



**HAL**  
open science

**Dendrochronologie du Chêne (*Quercus robur*, *Quercus petraea*), influences des facteurs stationnels et climatiques sur la croissance radiale, cas des sols hydromorphes et des climats atlantiques. Applications paléo-écologiques aux bois subfossiles du marais de Brière (Loire-Atlantique).**

Olivier Girardclos

► **To cite this version:**

Olivier Girardclos. Dendrochronologie du Chêne (*Quercus robur*, *Quercus petraea*), influences des facteurs stationnels et climatiques sur la croissance radiale, cas des sols hydromorphes et des climats atlantiques. Applications paléo-écologiques aux bois subfossiles du marais de Brière (Loire-Atlantique).. Sciences de l'environnement. Université de France-Comté (UFC), 1999. Français. NNT: . tel-04659087

**HAL Id: tel-04659087**

**<https://theses.hal.science/tel-04659087>**

Submitted on 22 Jul 2024

**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.

Public Domain

# THÈSE

présentée à

L'U.F.R. DES SCIENCES ET TECHNIQUES  
DE L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

pour obtenir le

GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ  
DE FRANCHE-COMTÉ  
Spécialité Sciences de la Vie

**Dendrochronologie du Chêne  
(*Quercus robur*, *Quercus petraea*), influences  
des facteurs stationnels et climatiques  
sur la croissance radiale, cas des sols  
hydromorphes et des climats atlantiques.  
Applications paléo-écologiques aux bois  
subfossiles du marais de Brière (Loire-Atlantique).**

par

Olivier GIRARDCLOS

soutenue le 2 mars 1999 devant la Commission d'Examen :

Directeur de thèse

M. BIDAULT Professeur émérite de l'Université de Franche-Comté

Rapporteurs

L. TESSIER Chargé de Recherche- CNRS, Aix-Marseille III  
O. U. BRÄKER Directeur de Recherche, Swiss Federal Institute for Forest,  
Birmensdorf-CH  
L. VISET Professeur à l'Université de Nantes

Invité

G.-N. LAMBERT Chargé de Recherche CNRS, Université de Franche-Comté

**Université de Franche-Comté**  
**U.F.R. des Sciences et Techniques**

N° attribué par la bibliothèque

**Thèse**

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE**  
**Mention Sciences de la Vie**

présentée et soutenue publiquement

par

**Olivier GIRARDCLOS**

le 2 mars 1999

**Titre :**

**Dendrochronologie du chêne (*Quercus robur*, *Quercus petraea*),  
influences des facteurs stationnels et climatiques sur la croissance  
radiale, cas des sols hydromorphes et des climats atlantiques.  
Applications paléo-écologiques aux bois subfossiles  
du marais de Brière (44).**

Directeur de thèse :

**M. M. Bidault**, professeur à l'Université de Franche-Comté

Jury

**M. L. Tessier**, Chargé de Recherches au CNRS, Marseille (rapporteur)  
**M. O. U. Bräker**, Directeur de Recherches, Swiss Federal Institute for Forest,  
Birmensdorf-CH (rapporteur)  
**M. L. Visset**, Professeur à l'Université des Pays de la Loire  
**M. G.-N. Lambert**, Chargé de Recherches au CNRS, Besançon

*En ce jour, il m'est agréable de remercier toutes les personnes qui ont contribué, par leurs collaborations, leurs conseils et leurs encouragements, à la réalisation de ce travail qui s'est accompli au sein du Laboratoire de Chrono-Ecologie de Besançon.*

*Je tiens à assurer les membres du jury de ma plus vive gratitude pour avoir accepté de juger mon travail :*

*Monsieur Michel BIDAULT, Professeur émérite de l'Université de Franche-Comté,*

*Monsieur Otto-Ulrich BRÄKER, Directeur de Recherches, Swiss Federal Institute for Forest, Birmensdorf-CH,*

*Monsieur Lucien TESSIER, Chargé de Recherches au CNRS,*

*Monsieur Lionel VISET, Professeur à l'Université des Pays de la Loire, qui est à l'origine de ce travail,*

*Monsieur Georges-Noël LAMBERT, Chargé de Recherches au CNRS, qui m'a accordé sa confiance et permis d'évoluer librement.*

*J'adresse mes plus vifs remerciements aux membres du Laboratoire de Chrono-Ecologie de Besançon.*

*Mes remerciements vont également à Annie BOULET, Chargée de l'environnement au Parc Naturel Régional de Brière, qui m'a fait découvrir la Brière et ses particularités ; au Parc Naturel Régional de Brière pour le financement des datations C14.*

*Je n'oublierai pas le précieux concours que m'ont prêté, Amandine, Catherine, Christelle, Christine, Christophe, Daniel, Didier, Mathieu et Séverine.*

*Enfin, que toutes les personnes qui m'ont apporté, à un moment ou un autre, leur aide et leur soutien amical, trouvent ici l'expression de ma gratitude et de ma sympathie.*



**CHAPITRE 1 DENDROCHRONOLOGIE ET CLIMATS ATLANTIQUES**

<b>I Historique et principe de la datation dendrochronologique</b>	<b>9</b>
<b>1 L'interdatation</b>	<b>9</b>
<b>2 Constitution des références</b>	<b>12</b>
<b>II Données climatiques cartographiées</b>	<b>16</b>
<b>1 Précipitations</b>	<b>16</b>
<b>2 Températures</b>	<b>18</b>
<b>3 Evapotranspiration, bilan hydrique potentiel</b>	<b>20</b>
<b>4 Zonation agroclimatique</b>	<b>21</b>
<b>5 Corrélation des précipitations le long d'un transect est ouest</b>	<b>22</b>
<b>III Lien cerne-climat en domaine océanique</b>	<b>26</b>
<b>1 Fonction de réponse</b>	<b>26</b>
<b>2 Années caractéristiques</b>	<b>27</b>
<b>3 Disponibilité en eau</b>	<b>27</b>
3.1 Relation cerne climat en Lorraine	27
3.2 Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers	29
<b>IV Synchronisation dendrochronologique entre zones océanique et semi-continentale</b>	<b>30</b>
<b>1 Forêts contemporaines</b>	<b>30</b>
1.1 Description des séries	30
1.2 Résultats et discussion	32
<b>2 Sites historiques : 1350-1450</b>	<b>36</b>
<b>3 Sites gallo-romains</b>	<b>37</b>
<b>4 Conclusion</b>	<b>39</b>

**CHAPITRE 2 PRESENTATION DES MARAIS DE BRIERE**

<b>I Milieu physique</b>	<b>41</b>
<b>1 Situation géographique</b>	<b>41</b>
<b>2 Géologie</b>	<b>42</b>
<b>3 Régime des eaux</b>	<b>43</b>
<b>4 Pédologie</b>	<b>44</b>
4.1 Hydromorphie	44
4.2 Principaux sols observables en Brière	45
4.2.1 Sols hydromorphes tourbeux ( <i>Histosols</i> )	
4.2.2 Gleys ( <i>Réductisols</i> )	
4.2.3 Origine des matériaux	
4.2.4 Sols sur l'île	
<b>II Végétation</b>	<b>47</b>
<b>1 Marais actuel</b>	<b>47</b>
<b>2 Forêts actuelles</b>	<b>48</b>

<b>3 Palynologie : évolution des peuplements anciens</b>	<b>48</b>
3.1 Zonations polliniques régionales	48
3.2 Végétation de la cuvette et environnante	50
3.2.1 <i>Fin du Boréal</i>	
3.2.2 <i>Atlantique</i>	
3.2.3 <i>Subboréal</i>	
3.2.4 <i>Subatlantique</i>	
<b>4 Datations radiocarbone en Brière</b>	<b>54</b>
4.1 Stratigraphie de A. VINCE (1965)	54
4.2 Généralisation spatiale de L. VISSET	56
4.3 Datation de la seconde génération de chênes	57
4.3.1 <i>Premières datations</i>	
4.3.2 <i>Datations après synchronisation relative</i>	

<b>Partie 2 DATATION DENDROCHRONOLOGIQUE DES MORTAS DE BRIERE</b>
---

## CHAPITRE 1 METHODES DENDROCHRONOLOGIQUES

<b>I Acquisition des largeurs de cernes</b>	<b>63</b>
<b>1 Préparation des échantillons</b>	<b>63</b>
<b>2 Mesures des largeurs</b>	<b>64</b>
2.1 Caractères anatomiques	64
2.2 Procédure de mesure	65
<b>II Recherche de synchronismes</b>	<b>66</b>
<b>1 Caractéristiques des séries de largeurs de cernes</b>	<b>66</b>
1.1 Les observations	66
1.2 Tendance	68
1.3 Dépendance sérielle	69
1.4 Stationnarité	69
1.5 Variation interannuelle	70
<b>2 Synchronisation non-paramétrique</b>	<b>71</b>
2.1 Transformation de la série brute	71
2.2 Gleichläufigkeit	71
2.3 Test de ECKSTEIN	71
<b>3 Modèle linéaire de la croissance</b>	<b>73</b>
3.1 Modèle de GRAYBILL	73
3.2 Signal étudié et bruit	74
<b>4 Standardisations</b>	<b>75</b>
Introduction	75
4.1 Modélisation par une fonction	76
4.2 Standardisations produisant un signal de haute fréquence	78
4.2.1 <i>Filtre passe-bas</i>	
4.2.2 <i>Indice Except</i>	
4.2.3 <i>Choix de l'information conservée</i>	
4.2.4 <i>Indice de HÖLLSTEIN</i>	
<b>5 Test de synchronisme avec données standardisées</b>	<b>87</b>
5.1 Coefficient de corrélation	87
5.2 Le test de Student et la sélection des dates	89
5.3 Estimations du risque	90

5.4 Influence de l'autocorrélation des séries sur la fonction de résultat de corrélation	92
<b>6 Représentativité des chronologies moyennes</b>	<b>95</b>
6.1 Matrice de corrélation	95
6.2 Qualité de la chronologie : “ Mean Correlation Technique ” ou technique de corrélation moyenne	97
6.3 Express Population Signal (EPS) ou représentativité statistique de la chronologie	97

## **CHAPITRE 2 REFERENCES DENDROCHRONOLOGIQUES DE L'AGE DU BRONZE**

Introduction	99
<b>I Référentiels régionaux</b>	<b>100</b>
1 Laboratoire dendrochronologique de Stuttgart-Hohenheim	100
2 Laboratoire dendrochronologique de Neuchâtel	102
<b>II Séries de l'Est de la France</b>	<b>108</b>
1 Situation et contexte d'étude des sites	108
1.1 Pirogue de Chalain (39) (fig. 59)	108
1.2 Chalon-sur-Saône (71)	108
1.3 Thonon (74)	109
1.4 Vandières (54)	109
1.5 Chamagne (88)	109
1.6 Saint Marcel (57)	109
1.7 Laines-aux-Bois (10)	109
1.8 Situation biogéographique	110
2 Chronologies moyennes de sites	112
2.1 Statistiques descriptives	112
2.1.1 Période d'étude	
2.1.2 Nombre d'échantillons	
2.1.3 Qualité du signal dendrochronologique	
2.1.4 Cohérence des chronologies moyennes	
2.2 Datations des chronologies moyennes de sites	115
<b>III Constitution d'un référentiel régional en Lorraine et Champagne</b>	
Introduction	117
1 Datation du site de Laines-aux-Bois (10) Bréban	118
1.1 Proposition de date faite en 1990	118
1.2 Statistiques descriptives de la chronologie moyenne BREBAN-M13 et M14	119
1.3 Homogénéisation de la chronologie moyenne du site	121
1.4 Comparaison de la datation des chronologies moyennes BREBAN-M13, M14, M20, M21	123
1.4.1 Résultats de datation en valeurs brutes	
1.4.2 Résultats de datation en indices Except	
1.4.3 Résultats de datation en indices de Hollstein	
1.4.4 Estimation du risque d'erreur associé aux datations	
1.4.5 Comparaison des résultats	

<b>2 Homogénéisation de la moyenne de site VANDIERES-M18 (54)</b>	<b>140</b>
<b>3 Homogénéisation de la moyenne de site CHAMAGNE-M102 (88)</b>	<b>145</b>
<b>4 Constitution de la référence régionale</b>	<b>149</b>
4.1 Intégration du site de Bréban	149
4.2 Datation des références homogénéisée et totale	150
4.3 Risque associé à la datation	151
4.4 Statistiques descriptives de Lorraine-Brz	151
4.4.1 <i>Statistiques pour la chronologie moyenne</i>	
4.4.2 <i>Statistiques en fonction du temps</i>	
4.4.2.1 Chronologie en valeurs brutes	
4.4.2.2 Chronologie standardisée	
4.4.2.3 Qualité du signal en fonction du temps	
4.4.2.4 Représentativité régionale en fonction du temps	

### **CHAPITRE 3 DATATION DE LA SECONDE GENERATION DE TRONCS DE CHENE**

Introduction	161
<b>1 Zones de prélèvement</b>	<b>162</b>
1.1 Localisation	162
1.2 Nombre d'échantillons prélevés	163
1.3 Observations sédimentaires	164
<b>2 Constitution d'une référence Brièronne</b>	<b>165</b>
2.1 Statistiques descriptives de Brière-Ref3	165
2.2 Corrélation entre les séries individuelles	167
2.3 Chevauchement entre les individus	170
2.3.1 <i>Matrice des chevauchements</i>	
2.3.2 <i>Bloc diagramme</i>	
2.4 Vérification du synchronisme entre les groupes de croissance	173
<b>3 Homogénéisation de Brière-Ref3</b>	<b>177</b>
3.1 Méthode d'exclusion des composantes	177
3.2 Méthode d'ordination de la matrice de corrélation	179
<b>4 Datation des chronologies brièronnes</b>	<b>182</b>
4.1 Datation de la référence totale Brière-Ref3	182
4.1.1 Résultats en valeurs brutes	
4.1.2 Résultats en indices de Hollstein	
4.1.3 Résultats en indices Except	
4.1.4 Interprétations	
4.2 Datation des références homogénéisées Brière-Ref4, Ref9 et Ref10	187
4.2.1 <i>Description des moyennes</i>	
4.2.2 <i>Résultats en valeurs brutes</i>	
4.2.3 <i>Résultats en indices de Hollstein</i>	
4.2.4 <i>Résultats en indices Except</i>	
4.3 Comparaison des résultats et estimation du risque d'erreur	198
4.4 Datation de moyennes d'EPS croissante	201
4.5 Modélisation LOWESS	202
<b>5 Constitution de chronologies en fonction de la topographie</b>	<b>205</b>
5.1 Introduction	205
5.2 Description des sites	206
5.2.1 <i>Localisation</i>	
5.2.2 <i>Sédimentologie et condition de développement des chênes</i>	
5.3 Description des chronologies moyennes	207

5.4 Datation des chronologies	208
<b>6 Statistiques en fonction du temps</b>	<b>210</b>
6.1 Chronologies en valeurs brutes	210
6.2 Chronologies standardisées	212
6.3 Qualité du signal en fonction du temps	215
6.4 Représentativité régionale en fonction du temps	218
<b>7 Conclusion du chapitre</b>	<b>220</b>

### **Partie 3 ANALYSE DENDROECOLOGIQUE**

Introduction	227
--------------	-----

#### **CHAPITRE 1 DONNEES CLIMATIQUES ET DE VARIATIONS DU NIVEAU D'EAU**

<b>I Climat</b>	<b>229</b>
1 Précipitations	229
2 Températures	231
3 Bilan hydrique potentiel à Montoir-de-Bretagne	234
<b>II Variations du niveau d'eau en Grande Brière</b>	<b>236</b>
1 Cycle annuel	236
2 Relations entre le climat et le niveau d'eau	240

#### **CHAPITRE 2 CARACTERISATION ECOLOGIQUE DES PLACETTES**

<b>I Localisation et type de peuplements</b>	<b>245</b>
1 Localisation	245
2 Type de peuplements et sylviculture	248
<b>II Description du milieu</b>	<b>249</b>
<b>1 Types de sols rencontrés</b>	<b>249</b>
1.1 Sols sur socle	249
1.2 Sols sur dépôts marins	251
<b>2 Tableau de variables descriptives du milieu</b>	<b>252</b>
<b>3 Résultats d'ACM</b>	<b>255</b>
3.1 Répartition des stations	255
3.2 Variables "corrélées" aux axes	255
3.3 Carte par types de variables	258
<b>4 Conclusion</b>	<b>259</b>
<b>III Description de la végétation</b>	<b>260</b>
<b>1 Tableau phytoécologique</b>	<b>260</b>
<b>2 Résultats d'AFC</b>	<b>260</b>
2.1 Carte des stations	260
2.2 Carte des espèces	261
2.3 Caractère indicateur des espèces	263
<b>3 Conclusion</b>	<b>264</b>

## CHAPITRE 3 CARACTERISATION DENDROCHRONOLOGIQUE DES PLACETTES

<b>I Interdatation</b>	<b>265</b>
<b>1 Constitution des moyennes stationnelles</b>	<b>265</b>
<b>2 Emondage des arbres</b>	<b>267</b>
2.1 Observations anatomiques	267
2.2 Périodicité des coupes et dendrochronologie	267
2.3 Chronologie des émondages	273
<b>3 Interdatation après troncature</b>	<b>275</b>
<b>II Homogénéisation des moyennes stationnelles</b>	<b>278</b>
<b>1 Synchronisme entre les séries individuelles</b>	<b>278</b>
<b>2 Datation sur des références locales</b>	<b>280</b>
<b>3 Homogénéisation par station</b>	<b>282</b>

## CHAPITRE 4 RELATIONS ENTRE LA LARGEUR DE CERNE ET LES FACTEURS DU MILIEU

<b>I Tendance d'âge et effet de la compétition</b>	<b>285</b>
<b>1 Estimation d'une loi de sénescence</b>	<b>285</b>
<b>2 Lois de sénescence de référence établies pour le Chêne</b>	<b>288</b>
2.1 Conversion des TSF	288
2.2 Loi de sénescence en Lorraine	288
2.3 Loi de sénescence en Franche-Comté	290
<b>3 Loi de sénescence des arbres actuels en Brière</b>	<b>294</b>
<b>II Relations entre le milieu et la croissance</b>	<b>295</b>
<b>1 Typologie des stations</b>	<b>295</b>
1.1 Typologie des séries stationnelles	296
1.2 Couplage des tableaux floristique et dendrochronologique	298
1.3 Couplage des tableaux mésologique et dendrochronologique	302
1.4 Conclusion	304
<b>2 Croissance en fonction des types dendrologiques</b>	<b>305</b>
2.1 Typologie des séries individuelles	305
2.2 Chronologies moyennes par type de stations dendrologiques	306
<b>III Relations entre les facteurs annuels et la croissance</b>	<b>308</b>
<b>1 Années caractéristiques</b>	<b>308</b>
1.1 Définition des années caractéristiques	308
1.2 Climat et niveau d'eau des années caractéristique	311
1.3 Conclusion	315
<b>2 Relation entre les cernes et le climat</b>	<b>317</b>
2.1 Variables climatiques explicatives	317
2.2 Nombre de régresseurs	318
2.3 Standardisation de la croissance	319
2.4 Fonction de réponse selon les types dendrologiques	321
2.5 Regroupement des variables	323
2.6 Fonction de réponse par type dendrologique après regroupement des variables	325
<b>IV Conclusion</b>	<b>327</b>

**CHAPITRE 1 EVOLUTION DU PEUPEMENT DE CHENE ET APPLICATIONS  
PALEO-ECOLOGIQUES**

<b>1 Contextes des découvertes de troncs de Chêne</b>	<b>331</b>
1.1 Peuplements de chêne sur sols tourbeux	331
1.2.1 Découvertes dans les îles britanniques	
1.2.2 Découvertes en Basse Saxe (D)	
1.2 La seconde génération de troncs en Brière	332
1.3 Information paléo-écologique	333
1.3.1 Présence des troncs	
1.3.2 Largeurs de cerne	
<b>2 Abondance des chênes</b>	<b>334</b>
2.1 Couverture de Brière M28 et Brière Ref3	334
2.2 Couverture en fonction de la topographie	335
2.3 Relation entre la présence des troncs et l'enregistrement de la pluie pollinique	337
2.4 Evolution du nombre de chênes	339
<b>3 Description de la croissance des chênes entre -1358 et -978</b>	<b>339</b>
3.1 Observations anatomiques	339
3.2 Largeurs brutes	340
3.3 Années caractéristiques	343
3.4 Comparaison des méthodes	347
<b>4 Relation entre la croissance et l'évolution du peuplement</b>	<b>348</b>
4.1 Mort des arbres	348
4.1.1 Observations anatomiques	
4.1.2 Dates de mort des individus avec l'écorce	
4.2 Bloc diagramme	353
4.3 Dynamique du peuplement	355
4.4 Dynamique du peuplement et loi de sénescence	356
4.4.1 Loi de sénescence des chênes en Brière vers -1000	
4.4.2 Lois de sénescence de peuplements non gérés	
<b>5 Information paléo - hydrologique</b>	<b>363</b>
5.1 Variations à long terme	363
5.2 Variations du moyen terme	367

<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES</b>	<b>371</b>
------------------------------------	------------





# INTRODUCTION

Depuis les années 1950-60, les approches de l'archéologie visent toujours plus à intégrer les observations faites sur les sociétés humaines dans leur environnement. La description des éléments matériels pérennes des sociétés anciennes, les artefacts, est toujours de plus en plus objective et plus fine. A travers un cadre chronologique précis, elle aboutit souvent à déterminer la fonction des outils, à montrer les choix technologiques opérés pour le réaliser et l'utiliser, à retracer les chaînes opératoires de transformations impliquées. Les caractéristiques de l'homme et de son groupe ne prennent cependant leur sens le plus complet que si elles permettent de montrer de quelle façon la société exploite et donc transforme son environnement. Retracer dans le temps l'équilibre peuplement, techniques, fonctionnement social et environnement transformé est un moteur de recherche en archéologie et particulièrement en préhistoire (PETREQUIN *et al.* 1995). Ceci revient à construire une image des changements de niches écologiques opérés par l'homme.

Cette maturation de l'archéologie doit beaucoup à l'utilisation puis à une véritable intégration de vues propres aux sciences dites "dures". A la suite du Carbone 14, presque devenu un nom propre, de nombreuses disciplines principalement physiques et naturalistes, dont la plupart existaient auparavant, ont été appliquées à l'archéologie. Elles forment aujourd'hui la communauté archéométrique. Chacune poursuit son développement dans son champ propre et dans le cadre de ses applications archéologiques.

Au sens large, l'analyse dendrochronologique est l'étude de la variation de facteurs internes et externes à l'arbre, abordés par la prise en compte de variables, anatomiques, physiques et chimiques en fonction du temps. Née au début du siècle avec les travaux de l'astronome A.E. DOUGLASS qui cherchait une relation entre la croissance radiale des

---

végétaux et les cycles d'activité solaire, à qui on peut attribuer le développement de la dendrochronologie moderne constituée de voies écologiques, plus résolument biologiques, climatiques, forestières voire mathématiques ou archéologiques.

La largeur du cerne est une variable très imparfaitement représentative de l'accroissement de la biomasse annuelle des végétaux ligneux (BADEAU 1995) qui fondamentalement reflèterait le fonctionnement de l'écosystème. Mais elle est d'acquisition assez simple même pour de grands ensembles d'échantillons et surtout permet l'étude rétrospective de l'influence de l'environnement sur la croissance. La production annuelle de bois peut être jugée fonction d'un système de facteurs internes à l'arbre (génétique, physiologie, âge) et fonction d'un système de facteurs externes (climat, milieu, biotope) dans lequel l'homme et son action sur la forêt, volontaire (sylviculture) ou involontaire (pollution), ont une place particulière.

\* Parmi l'étude des variables explicatives de la largeur de cerne, les variables climatiques ont joué un rôle majeur. La dendroclimatologie a connu son premier développement dans les situations où le lien entre le cerne et le climat est le plus direct. La formation du cerne est alors très dépendante d'un seul facteur climatique écologiquement limitant. Les arbres situés sur les limites altitudinales (SERRE 1978) et latitudinales (BRIFFA *et al.* 1990) ont été utilisés pour la reconstitution annuelle sur de longues périodes de températures mensuelles ou annuelles.

\* Dans les domaines océaniques et continentaux où le climat est moins contraignant pour la croissance, le lien avec le cerne est plus complexe, laissant la place à de nombreuses compensations et amplifications de facteurs. Pour trouver une corrélation entre les variables anatomiques et les variables climatiques, le traitement préalable des signaux dendrochronologique et climatique sont obligatoires (BRIFFA *et al.* 1983). Beaucoup de variables climatiques présentent une relation significative avec la croissance (BRIFFA *et al.* 1983).

\* Pour le chêne en Angleterre, les températures en début de saison de végétation puis les précipitations principalement aux mois de mai, juin, juillet ont un rôle positif sur la croissance (PILCHER et GRAY 1982). Il est également montré une relation forte entre la croissance en cours et les cernes antérieurs. Ceci sous-entend une action de facteurs climatiques d'années antérieures et un rôle important joué par le stockage de réserves. BECKER *et al.* (1994) montrent l'action de températures et précipitations jusqu'à 4 années antérieures à la formation du cerne pour le chêne sessile et 5 années pour le chêne pédonculé en Lorraine.

\* Les conditions de milieu : microclimat, sol, dynamique du peuplement interviennent aussi sur la croissance et interfèrent avec les influences climatiques. Le déterminisme de ces facteurs locaux est de mieux en mieux mis en évidence (FRITTS *et al.* 1965, 1976). La prise en compte de variables écophysiologicals, pédologiques et climatiques dans un modèle du bilan hydrique journalier d'un peuplement feuillu (BREDA 1994, GRANIER *et al.* 1995) permet de très bien rendre compte des variations de la croissance du hêtre (BADEAU 1995). Ces études montrent que la croissance est très dépendante de la réserve hydrique dans le sol utilisable pendant la saison de végétation en fonction de caractéristiques pédologiques et physiologiques (BADEAU 1995). La dynamique du peuplement forestier, et consécutivement la gestion sylvicole, est également une grande source de différences de croissance pour le sapin (BERT 1992), le hêtre (BADEAU 1995), et le chêne (NIEMINEN 1988 et BECKER *et al.* 1994).

---

\* L'arbre et son habitat, constitué du peuplement et du milieu physique, forment un ensemble que le climat influence (TESSIER 1984). Cependant, il existe, en général, suffisamment d'action limitante des facteurs régionaux pour permettre l'interdatation des croissances sur des aires biogéographiques vastes, comme le sud du domaine médio-continental, s'étendant des plateaux subalpins de Bavière aux rives du Main et du Rhin (HUBER et GIERTZ-SIEBENLIST 1978, BECKER *et al.* 1985), l'est de la France (LAMBERT et LAVIER 1992a) ou le Bassin parisien (BERNARD 1997). Deux séries de largeurs de cernes représentatives de sites provenant d'une aire suffisamment homogène synchronisent parce qu'une part des facteurs dont dépend la croissance leur sont communs. Les variables climatiques sont les meilleurs descripteurs de ces facteurs régionaux mais ne sont probablement pas les seuls. Des facteurs internes tels que le génome ou la capacité de réponse à un stress, les types de sols, la dynamique des peuplements d'une façon globale peuvent participer à l'homogénéité des croissances, pour une période et une aire de datation donnée. La part de signal exploitable pour la recherche des synchronismes n'est donc pas la même que pour les études dendroclimatiques de reconstructions climatiques.

La largeur de cerne enregistre donc de nombreuses variations de l'environnement qui peuvent avoir également exercées une influence sur les sociétés passées. Dans cet environnement, l'homme tient une place particulière, par l'exploitation, la surexploitation, la gestion puis la fertilisation ou la pollution de la forêt. L'enjeu archéométrique de la dendrochronologie est donc double : dater les restes et tenter de dégager du signal synthétique de l'information environnementale. Cette dernière opération est encore sous-exploitée en France car les concepts et les méthodes restent incomplets.

\* Il est difficile de définir l'information enregistrée dans un lot de séries historiques, car le milieu d'origine des bois transportés sur le site archéologique n'est pas connu. Il est cependant possible de décrire des types d'arbres (dendrotypes) en combinant des caractères morphologiques des pièces de bois, des caractères anatomiques tel un changement abrupt de croissance, calés dans le temps par rapport aux phases de coupes qui renseignent sur les formations forestières anciennes et les cycles d'exploitation (BILLAMBOZ 1992 et 1996).

Nous avons pu montrer qu'une hiérarchisation des types de croissances fine, à l'échelle du site, peut être obtenue par des méthodes multivariées (GIRARD CLOS 1992). La méthode appliquée à un massif forestier actuel permet d'associer des types de croissances à des ensembles de types de stations forestières. Appliquée à des lots de bois anciens transportés par l'homme, elle peut montrer des différences d'approvisionnements. Cependant les contraintes d'échantillonnage sont très lourdes pour les sites archéologiques car tous les arbres analysés doivent couvrir toute la période d'étude. La hiérarchisation en type de croissance peut reposer sur l'estimateur de synchronisme, ce qui peut s'appliquer à des arbres partiellement contemporains. JANSMA (1995) utilise l'EPS (Express Population Signal WIGLEY *et al.* 1984) dérivé des coefficients de corrélation entre les séries pour proposer une aire de provenance de bois importés et construire des références dont le signal est plus homogène.

\* Les longues références du chêne (HOLLSTEIN 1980, PILCHER *et al.* 1984, BECKER *et al.* 1985, LEUSCHNER 1992) ont été construites avec du matériel provenant de grandes aires biogéographiques en associant de très nombreux échantillons. L'information globale qu'elles contiennent permet d'assurer la cohésion de toutes les chronologies d'Europe tempérée (PILCHER *et al.* 1984). Une chronologie a une valeur régionale si l'on peut démontrer qu'elle se rattache à ces schémas généraux de la croissance. Plusieurs chronologies

---

françaises sont construites sur ce modèle (LAMBERT et LAVIER 1992a, LAMBERT *et al.* 1996, BERNARD 1997, DOUCERAIN et GIRARDCLOS 1998).

Le contexte de datations dendrochronologiques à l'Age du Bronze en France reste cependant très défavorable, car il n'existe pas de chronologies de référence. Les sites de l'est de la France permettent d'en constituer une centrée sur la Lorraine qui présente des périodes de sous-échantillonnage importantes. Celle-ci peut cependant être rattachée aux étalons des laboratoires de Neuchâtel (EGGER *et al.* 1985) et Stuttgart (BECKER *et al.* 1985), les plus avancées pour cette période. Dans ce contexte, tout site localisé dans l'ouest de la France devra être datées sur ces étalons éloignés, représentatifs d'aires biogéographiques médio-continentales.

\* Ce travail, basé sur l'étude d'un lot de 130 bois découverts, depuis 1992 à la suite des analyses palynologiques réalisées par L. VISSET (1979), dans les marais de Brière (Loire-Atlantique), va s'attacher à démontrer que la datation d'une chronologie représentative d'arbres soumis à une influence climatique atlantique littorale peut être réalisée sur ces références médio-continentales.

La datation est réalisée dans des conditions très défavorables. Elle appelle donc un développement méthodologique poussé pour justifier au mieux le résultat. Ce développement tend à rejoindre les observations faites par JANSMA (1995) qui établit que les chronologies homogénéisées, sur le critère du synchronisme entre les séries, portent une information régionale de bonne qualité. Cependant, dans la composition des groupes construits sur la base de la synchronisation, il est impossible de savoir, sur le matériel historique, quelles sont les influences des facteurs régionaux et locaux. La critique et la justification partielle de ces hypothèses reposent sur l'étude de matériel vivant mais aussi subfossile.

L'analyse de ces bois, découverts sur le lieu même où les arbres ont poussé, permet d'associer des descriptions du milieu, réalisées notamment par la palynologie, et l'analyse de la croissance. Elles contribuent à mieux connaître les relations entre la croissance et le milieu dans une situation où l'action de l'homme est très différente de celle d'aujourd'hui. La comparaison avec des forêts actuelles reste un outil indispensable pour justifier des hypothèses mais en retour, la datation et l'étude paléo-écologique des bois subfossiles, comme elle a été menée dans les Marais de Brière, apporte des informations utilisables pour les arbres transportés sur les sites archéologiques.

Les analyses, essentiellement palynologiques, des sédiments de marais côtiers, d'estuaires, de niveaux organiques d'estrants, et des marais continentaux de l'ouest de la France ont conduit à des synthèses paléo-écologiques pour le massif armoricain. MORZADEC-KERFOURN (1974) retrace l'évolution de la végétation depuis le Hollstanien. Ses analyses côtières permettent de reconstruire les variations du niveau marin régional liées à la transgression Flandrienne. Pour le sud du massif armoricain, la végétation et des manifestations transgressives dans les marais de Brière sont décrites depuis le tardiglaciaire par VISSET (1979). Les tourbières continentales sont étudiées en liaison avec des sites archéologiques par MARGUERIE (1992). L'introduction dans cette dernière étude d'analyses anthracologiques permet de montrer l'influence humaine sur la végétation ligneuse.

Ces études ont peu exploité les dépôts de bois subfossiles, présents dans les marais. Dans d'autres régions, ce matériel est une source d'information paléo-écologique importante. Les troncs de chêne découverts dans les sédimentations tourbeuses sont à l'origine de chronologies très longues dans les Iles Britanniques entre 5289 et 200 av. J.-C. (BROWN *et al.*

---

1986), de 6266 à 928 av. J.-C. en Basse Saxe (LEUSCHNER et DELORME 1988), et de 2260 à 1159 av. J.-C. aux Pays-Bas (JANSMA 1995).

L'information paléo-écologique portée par ce matériel est principalement de deux types. D'une part, la présence et l'abondance du chêne constitue un marqueur en rapport avec la genèse du marais et l'évolution des peuplements. LEUSCHNER *et al.* (1987) montrent que les variations de forte amplitude de la nappe dans le sol conditionnent l'installation, induisent la disparition et la conservation des troncs dans les bas-marais. En Irlande, la chênaie sur tourbe évolue vers les haut-marais. Les chênes disparaissent lorsque la tourbification est trop importante, remplacés par des peuplements à sphaignes (PILCHER 1990). Lorsque l'étude dendrochronologique peut être associée à des analyses palynologiques comme en Brière, le peuplement dominé par le chêne peut être comparé à ceux qui le précèdent et lui font suite.

D'autre part, les largeurs de cernes renseignent sur les conditions de croissance des chênes. Les arbres retrouvés dans les marais se développaient souvent dans des conditions extrêmes (LEUSCHNER 1992). Des périodes marquées par une réduction de croissance sont observées par tous les auteurs (LEUSCHNER 1992, PILCHER *et al.* 1996) mais leur interprétation pose des questions.

La croissance de ces chênes est effectivement dépendante de facteurs régionaux qui permettent la corrélation sur de longues distances, par exemple entre les étalons britanniques et allemands (PILCHER *et al.* 1984, 1996). Cependant, l'étude du déterminisme climatique pour ces chênes se heurte à l'absence de véritables formations forestières actuelles qui se développent dans des conditions analogues (LEUSCHNER *et al.* 1987, PILCHER *et al.* 1996). Il n'y a pas de forêts sur tourbe en Brière mais de jeunes peuplements colonisant la périphérie du marais, où les variations du niveau de la nappe sont, de plus, enregistrées, (MAILLARD et BOULET 1988), permettent d'apporter des éléments de réponse.

Les séries de cernes étroits montrent le stress de populations entières pendant plusieurs années induisant la mort d'un nombre plus ou moins important d'arbres (LEUSCHNER 1992). L'influence des variations du niveau de la nappe dans le sol peut aboutir à une dynamique du peuplement irrégulière (LEUSCHNER 1992). Mais, BAILLIE et MUNRO (1988) montrent que ces milieux sont aussi très sensibles à des phénomènes globaux comme les voiles de thépha émis par les volcans. Les arbres subfossiles, retrouvés dans leur habitat peuvent être considérés comme des enregistreurs des variations de leur environnement, quelle que soit la source de ces modifications, globale, régionale ou locale, naturelle ou anthropique.

Le premier objectif est donc de préciser la date à laquelle une chênaie a dominé le marais de Brière. La datation du site en dehors des zones étalonnées, permet de débiter un référentiel pour l'âge du Bronze dans l'ouest de la France. Dans un contexte défavorable de datation, l'aspect méthodologique a tout particulièrement été poussé. L'étude paléo-écologique de 130 troncs permet de préciser la dynamique de succession depuis un peuplement hygrophile à une formation moins spécialisée puis à la disparition de celle-ci. Les hypothèses des conséquences sur la croissance des variations du niveau de la nappe et de la dynamique de colonisation sont analysées en comparaison avec une étude dendroécologique de populations situées également sur des sols tourbeux. L'influence du niveau de la nappe et de l'évolution du peuplement sur la croissance du chêne offrent des informations paléo-écologiques utilisables pour préciser la date d'événements régressifs du marais de Brière, liées aux variations du niveau marin, et pour comparer l'action de groupes humains sur la dynamique forestière.





# Partie 1





---

# Chapitre 1

## DENDROCHRONOLOGIE ET CLIMATS ATLANTIQUES

### I Historique et principe de la datation dendrochronologique

#### 1 L'interdatation

L'étude de la croissance des arbres tient depuis très longtemps une place importante dans l'histoire naturelle. Les premières sources écrites parviennent de l'Antiquité. Théophraste (372-287 av. J.-C.) montre l'accroissement en diamètre de l'Olivier à l'aide d'une pierre enchâssée qui se trouve recouverte par le bois (STUDHALTER 1956). Caton l'Ancien (234-149 av. J.-C.) et Columelle (1er siècle ap. J.-C.) traitent également du bois et de la croissance (CORONA 1983). Cependant, ces auteurs, analysant la croissance d'espèces méditerranéennes (Olivier, Chêne vert et liège) ne concluent pas à l'alternance annuelle des "veinures". De même, Pline l'Ancien (23-79 ap. J.-C) rapporte que des formations claires et sombres s'alternent chez le Sapin mais ne leur prête pas un rythme annuel (CORONA 1983).

La dendrochronologie repose probablement sur l'observation de L. De Vinci qui est parmi les premiers à relier la largeur des cernes à la variation annuelle de l'environnement des arbres : " Les cercles des branches d'arbres sciées montrent le nombre de leurs années, mais aussi lesquelles furent les plus humides et les plus sèches selon leur taille " (*in* CORONA 1983, *in* LOCATELLI 1994). Cette observation est réitérée et étayée par les naturalistes du XVIIIe siècle comme Duhamel du Monceau et Buffon. Duhamel, en 1751, met au point une technique permettant d'inclure de fines lames d'étain au contact de l'écorce et du bois. Elles sont progressivement recouvertes indiquant précisément la période de croissance (STUDHALTER 1956).

---

Duhamel et Buffon, en 1737, datent de 1708-1709, en comptant les cernes, des défauts de formation du bois de coeur dont le double aubier ou faux aubier. Ils relient la formation de ce tissu dans plusieurs arbres à la même date, à l'hiver très froid de 1708-1709 (BADEAU 1995). Linné, répète l'expérience (1741, 1751) en Suède, et observe un cerne étroit cette même année. Des dommages liés au gel du même hiver sont également décrits sur des hêtres et sur d'autres arbres par l'allemand Burgsdorf en 1783. Cent ans après Duhamel et Buffon, en 1839-40, Candolle observe l'effet négatif sur la croissance de genévriers du gel de 1708-1709. Seul celui-ci devait connaître les travaux de ses prédécesseurs. La compilation de ces observations, rapportée par STUDHALTER (1956), constitue probablement la première expérience d'interdatation ou " cross-dating ". Des événements enregistrés par plusieurs arbres provenant de régions différentes peuvent être datés en comptant les cernes annuels.

Au XIXe siècle dans divers pays, Twinning dans le Connecticut (1827), Babbage en Grande Bretagne (1838) ainsi que Candolle (1833) et Henry en 1898 en France (d'après Studhalter 1955 *in* BADEAU 1995), des expériences faisant plus ou moins appel à l'interdatation se multiplient. A la suite de ces précurseurs, la première école de dendrochronologie se développe aux États Unis. Dans le premier tiers du XXe siècle, A. E. Douglass, astronome à Flagstaff (Arizona) analyse un nombre d'arbres croissant. Le groupe qu'il crée, à Tucson (Arizona), développe des outils descriptifs de la croissance, des outils techniques et met en place la revue *Tree-Ring Bulletin* en 1934. Douglass observe que les largeurs de cernes ne se reproduisent pas dans le temps, comme il le pensait, en fonction des cycles d'activité solaire, mais qu'elles se reproduisent parfaitement dans les arbres contemporains. Il pratique alors l'interdatation de façon intensive, d'abord par synchronisation d'années particulièrement étroites ou plus rarement larges puis en utilisant toutes les largeurs de cernes. Les années repères, ou caractéristiques, sont nombreuses sous des conditions climatiques semi-arides qui contraignent fortement la croissance. Il applique également la réciproque de l'interdatation :

si des arbres ont enregistré les mêmes événements alors ils sont contemporains.

Ceci permet au groupe de Tucson de dater de nombreux restes archéologiques (DOUGLASS 1921). En 1934, dans le premier numéro de *Tree-Ring Bulletin*, DOUGLASS indique que la longue chronologie de plusieurs siècles, permettant les datations, est en développement depuis 1904.

En Europe, vers 1908, Kapteyn, astronome à Durch (Hollande) construit également une chronologie de largeurs de cernes, à partir de chênes, longue de plusieurs siècles. Il en compare une partie à des enregistrements météorologiques (JANSMA 1995). Cependant, ces travaux ne donnent pas lieu au développement d'une école.

A partir de 1940, B. Huber, à Munich, est à l'origine d'un groupe d'étude qui construit de nombreuses chronologies. Le développement des séries est cependant beaucoup plus lent que dans l'est américain car les arbres soumis à des conditions climatiques méditerranéennes sont plus jeunes et la diversité des croissances plus grande. Le matériel utilisé est le Mélèze et le Hêtre que HUBER et VON JAZEWITSCH (1956) jugent très sensibles au climat mais aussi le Chêne sessile, le Pin sylvestre, le Pin cembro et l'If dont la synchronisation des croissances ne peut être facilement réalisée en utilisant uniquement les années caractéristiques. Une nouvelle méthode est donc mise au point. Elle utilise la concordance des écarts entre les largeurs de cernes consécutives (HUBER et VON JAZEWITSCH 1956, Cf. partie 2). Jusque vers 1960, il apparaît même impossible aux botanistes irlandais d'utiliser la dendrochronologie, car les conditions climatiques océaniques ne sont pas jugées limitantes de la croissance. Les précipitations relativement élevées et l'absence de sécheresses ne permettraient pas de pallier la diversité des conditions locales (JANSMA 1995). En Allemagne

du nord (DELORME 1972), en Hollande (BAUCH 1968) et dans les îles britanniques (BAILLIE et PILCHER 1976), il est cependant montré que des méthodes statistiques, qui reposent sur le calcul du coefficient de corrélation (BAILLIE et PILCHER 1973, cf. partie 2), permettent de synchroniser, avec un risque d'erreur faible, les croissances provenant de régions sous influences océaniques assez vastes, pour construire de longues chronologies.

L'interdatation doit en fait être exprimée en terme de population. Les largeurs des cernes de croissance annuels d'une période donnée, suffisamment longue, sont statistiquement similaires entre les arbres d'une population, elle-même suffisamment homogène, et ne se répètent pas dans le temps.

En effet, dans toutes les régions tempérées, où la croissance radiale a une rythmicité annuelle, elle est largement affectée par des facteurs externes à l'arbre. Toutefois le rythme n'est très probablement pas initié par l'action des facteurs externes. De jeunes plans de Chêne cultivés dans des conditions contrôlées sous éclairage continu, température constante et alimentation constante conservent une croissance rythmique dont la période est d'environ 1,5 à 2 mois pendant plusieurs années (MILLET et MANACHERE 1983). Le rythme de croissance est donc probablement endogène mais très largement synchronisé et influencé par des facteurs externes.

Parmi ces facteurs, le macroclimat affecte une région et présente une variation dans le temps, à pas annuel, totalement aléatoire. L'étude de la relation cerne-climat montre qu'une part de la croissance est expliquée par les variations des variables climatiques (Cf. *infra*). Du

fait qu'une part de la croissance est liée à des facteurs externes dont les variations peuvent affecter toute une région, les cernes d'arbres appartenant à une population soumise à ces variations présentent des similitudes. De plus, comme ces facteurs ne se répètent pas dans le temps, une série de cernes est typique de son époque. Par conséquent, lorsque deux séries de cernes peuvent être significativement synchronisées, elles sont contemporaines. Si la date de formation d'un cerne est connu, par construction, toutes les séries synchronisées sont datées. Cette date n'est réellement connue que pour les cernes en cours de formation. Les datations dendrochronologiques sont donc toutes obtenues en rattachant, par construction, les séries de largeurs de cernes à celles des arbres vivants. Un référentiel de datation est par conséquent établi à partir de l'étude de la croissance d'arbres vivants puis, par synchronisation de séries partiellement contemporaines, ainsi le temps est progressivement remonté (fig. 1).

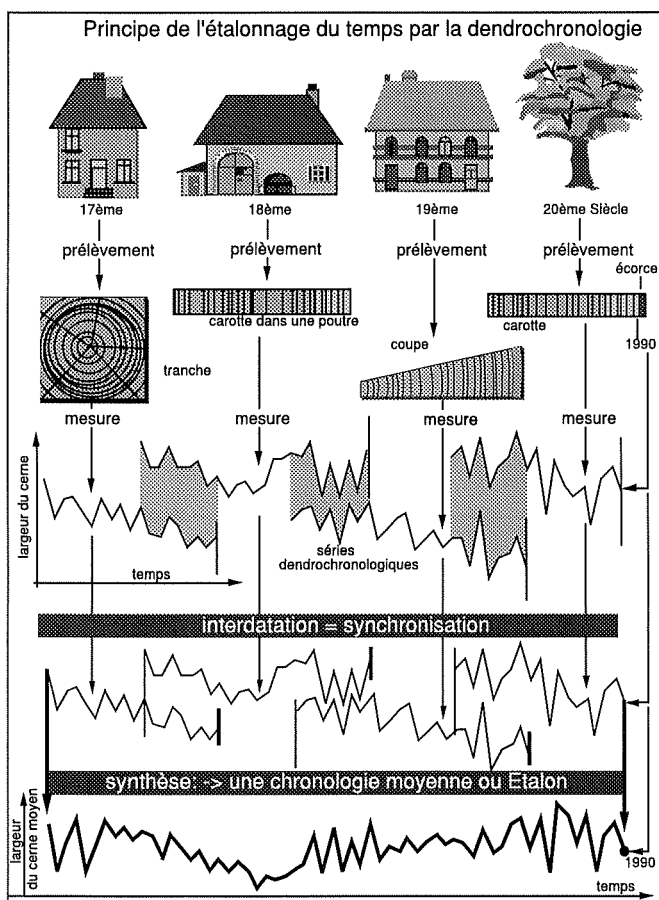


Figure 1 : schéma de construction d'un référentiel (d'après LAMBERT et LAVIER 1990)

## 2 Constitution des références

La largeur du cerne intègre en réalité l'action de tout un système de facteurs internes et externes. La production de bois est le résultat d'un fonctionnement physiologique très complexe. Des facteurs propres à l'individu, comme son génome ou son âge, entrent en jeu dans ce fonctionnement. L'âge explique la plus grande part de la variance de la largeur de cernes (DUPOUEY *et al.* 1992). Parmi les facteurs externes, certains présentent peu de variations à l'échelle de la vie d'un arbre. Il s'agit surtout de facteurs édaphiques comme la composition ou la profondeur du sol. D'autres, comme la composition du peuplement ou le statut de l'arbre dans ce peuplement, évoluent plus ou moins lentement durant la vie de l'arbre. Seul le climat présente une variation annuelle. Les facteurs externes interagissent, quelle que soit la période de leurs variations. Par exemple, une part des précipitations est interceptée par le peuplement et évaporée sans atteindre le sol ; la fermeture ou l'ouverture du couvert fait donc varier la disponibilité en eau de l'arbre (BECKER 1971, BREDA 1994). Les précipitations au sol, en fonction des caractéristiques de celui-ci, vont plus ou moins directement alimenter la réserve extractible par les racines. Cette réserve est d'autant plus accessible à un individu qu'il subit peu de compétition... Le climat, source de l'interdatation, n'agit donc pas sur l'arbre en lui-même mais sur le peuplement et le milieu dans lequel celui-ci se développe (TESSIER 1984). En conséquence, la largeur du cerne est un intégrateur des variations complexes de l'environnement.

Deux séries de largeurs de cernes synchronisent car une part des influences extérieures sont communes aux arbres analysés. La corrélation est donc d'autant meilleure que les sources de variations sont communes. D'une façon générale, les arbres issus d'un type de station forestière synchronisent fortement et ceux provenant d'une petite région naturelle ont des croissances plus similaires que s'ils proviennent de régions aux caractéristiques différentes. Ce principe n'est pas toujours observé, car il est très difficile d'estimer si une série est bien représentative des conditions dans lesquelles les arbres ont été prélevés et du fait de l'interaction des facteurs. La disponibilité du matériel pour construire une référence oblige fréquemment à regrouper les arbres provenant d'une région. Ce regroupement se fait sur deux types de critères distincts. Les critères *a priori*, antérieurs à l'essai de datation, sont basés sur la connaissance biogéographique des régions, leur homogénéité macroclimatique et d'ensembles de substrats notamment. Toutefois, l'intégration de séries à une référence est acquise sur les critères de synchronisme. Dans la moitié nord de la France, les références sont développées, pour de grandes régions biogéographiques, de l'An Mil environ à nos jours (fig. 2). La construction de ces étalons repose sur l'homogénéité climatique régionale mais au fur et à mesure de l'avancement des datations, des références plus locales, pour lesquelles les arbres intégrés subissent l'action de facteurs communs plus nombreux, sont développées. Le nombre de sites et de bois historiques datés est suffisant uniquement en Bourgogne pour permettre de débiter ces analyses.

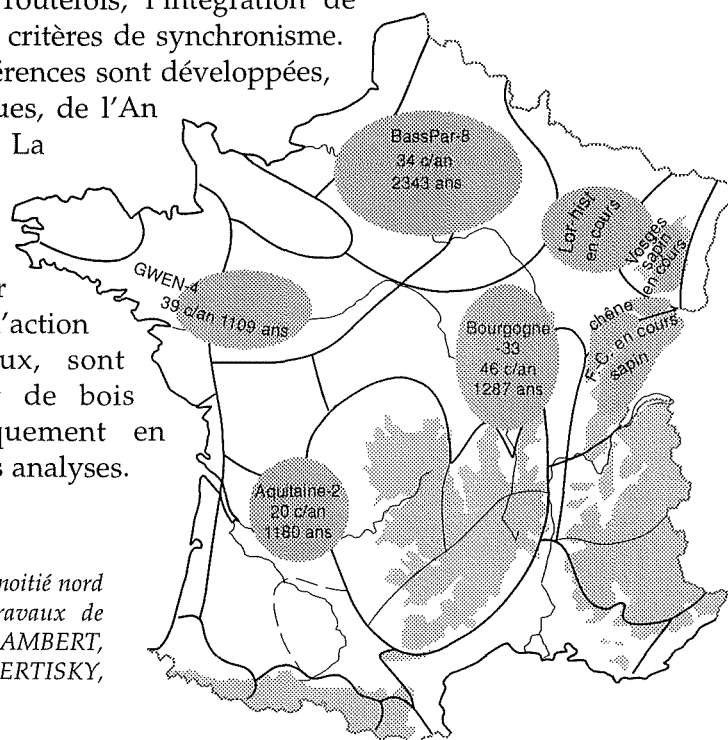


Figure 2 : références historiques développées dans la moitié nord de la France (d'après LAMBERT *et al.* 1996) travaux de BERNARD, BOURQUIN, DOUCERAIN, LAVIER, LAMBERT, LOCATELLI, GIRARD-CLOS, PERRAULT, SZEPERTISKY, TRENARD (Zones climatiques régionales cf. 1.2)

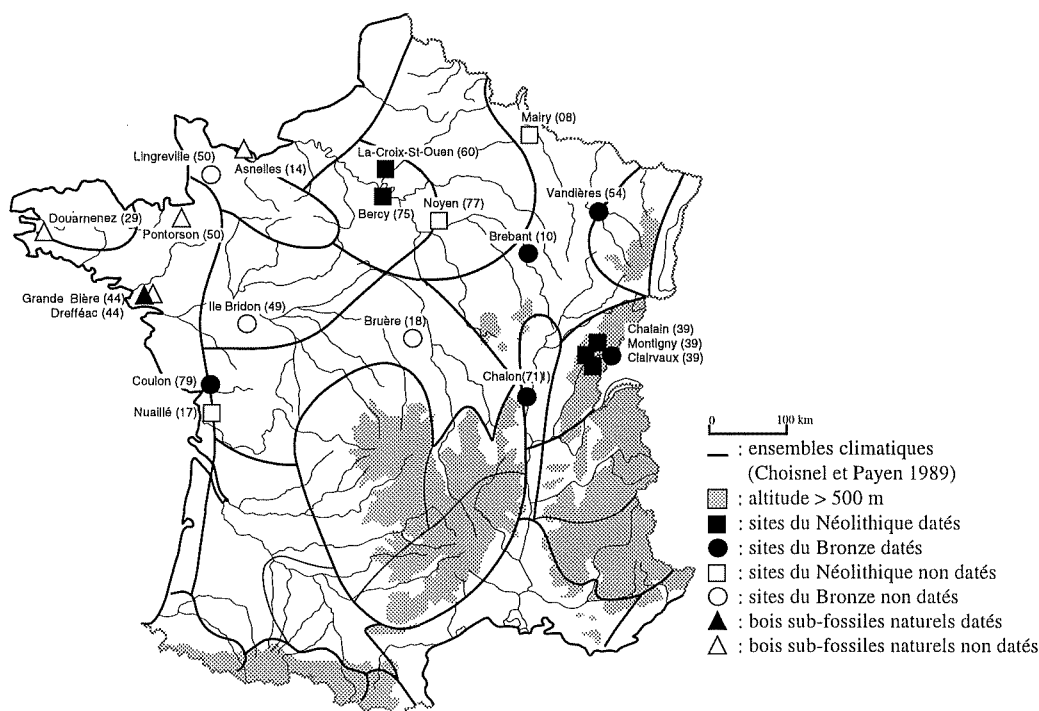


Figure 3 : localisation des sites préhistoriques analysés en dendrochronologie dans la partie nord de la France

Par contre, sur la même surface, le matériel préhistorique est très dispersé (fig. 3) (GIRARDCLOS *et al.* 1996). Les sites des lacs péri-alpins livrent de grandes quantités de matériel dans deux périodes : l'Age du Bronze final et le Néolithique final. Une chronologie s'étendant de -3659 à -2916 a pu être réalisée (LAVIER 1996, VIELLET 1997) avec des restes de constructions provenant des sites de Chalain et Clairvaux (fig. 3). Les lacs du Jura français n'ont pas livré suffisamment de bois pour construire une référence de l'Age du Bronze au contraire de ceux du Jura suisse (cf. partie 2 chap. 2). En dehors du contexte lacustre, les sites sont plus rares et le nombre de bois souvent inférieur. Probablement que le potentiel des zones alluviales est encore sous exploité. Des fouilles récentes ont, en effet, mis au jour de nombreux restes d'habitats néolithiques sur les berges de la Seine et de l'Oise (fig. 3) qui ont permis la construction d'une chronologie allant de -3228 à -2708 (BERNARD 1997). Les sites de l'Age du Bronze sont moins dispersés en Lorraine (fig. 3). Pour cette région, des données acquises par les laboratoires de Bohlingen et Besançon ont été mises en commun. 4 sites livrent une quarantaine d'individus que nous pouvons associer en une référence (cf. partie 2 chap. 2).

Il n'y a pas aujourd'hui de région française pour laquelle l'étalon est continu des périodes historiques à la Préhistoire. Pour dater les restes de l'Age du Bronze et préhistoriques en général, il est donc indispensable d'utiliser les étalons construits dans les pays limitrophes : l'Allemagne et la Suisse. La collaboration entre les laboratoires de Neuchâtel et de Stuttgart, détenteurs de références solidement construites pour l'Age du Bronze (cf. partie 2 chap. 2), et celui de Besançon, date des origines de la discipline, au début des années 1980. La progression des références est facilitée dans les régions limitrophes de celles qui sont déjà étalonnées. Les caractéristiques macroclimatiques prenant souvent la forme de gradients, le développement des chronologies se fait classiquement de proche en proche. En France, depuis 1980, ce développement a donc toujours suivi un axe est ouest, quelle que soit la période, basé sur les étalons de nos voisins (LAMBERT *et al.* 1992). L'échange des données apparaît donc comme primordial pour faire progresser la connaissance des croissances régionales mais aussi pour démontrer que les nouvelles références sont bien intégrées au schéma global de la croissance européenne.

Le développement de proche en proche a permis l'élaboration des références historiques (LAMBERT *et al.* 1996) et de l'Antiquité (LAMBERT *et al.* 1992). Pour la Préhistoire, et l'Age du Bronze, des sites isolés sur le littoral atlantique et de la Manche (fig. 3) imposent de modifier cette démarche. Les marais littoraux ont fait l'objet d'analyses paléo-écologiques principalement palynologiques (MORZADEC-KERFOURN 1974, VISETT 1979), sédimentaires et archéologiques (PRIGENT 1977). D'une part, l'analyse dendrochronologique des bois découverts en dépôt naturel dans ce contexte permet d'apporter des informations complémentaires à ces études et d'autre part le grand nombre de troncs découverts représente un potentiel très important pour constituer des références utilisées ensuite pour dater des sites archéologiques moins riches en échantillons.

L'exploitation de ce matériel impose de synchroniser des séries soumises à des influences climatiques différentes. Le long d'un gradient climatique, le synchronisme entre les séries de largeurs de cernes va en diminuant en fonction de la distance (FRITTS 1976, HOLLSTEIN 1980). Des corrélations significatives ont cependant déjà été dégagées entre des séries provenant d'une zone large en Europe du nord-ouest. L'expérience la plus importante a été menée en 1984, (PILCHER *et al.* 1984) par les laboratoires de Belfast, de Stuttgart et de Cologne. La continuité des références pendant la période de l'Age du Fer n'a pu être assurée que par le synchronisme entre les étalons d'Allemagne du sud (bassin du Rhin, du Main et du Danube), d'Allemagne du Nord et des îles britanniques (fig. 4). Les corrélations entre ces références aboutissent à des valeurs *t* de Student supérieures à 4 qui, dans ces conditions, peuvent être jugées significatives à un faible risque d'erreur près (fig. 4). L'ensemble est alors

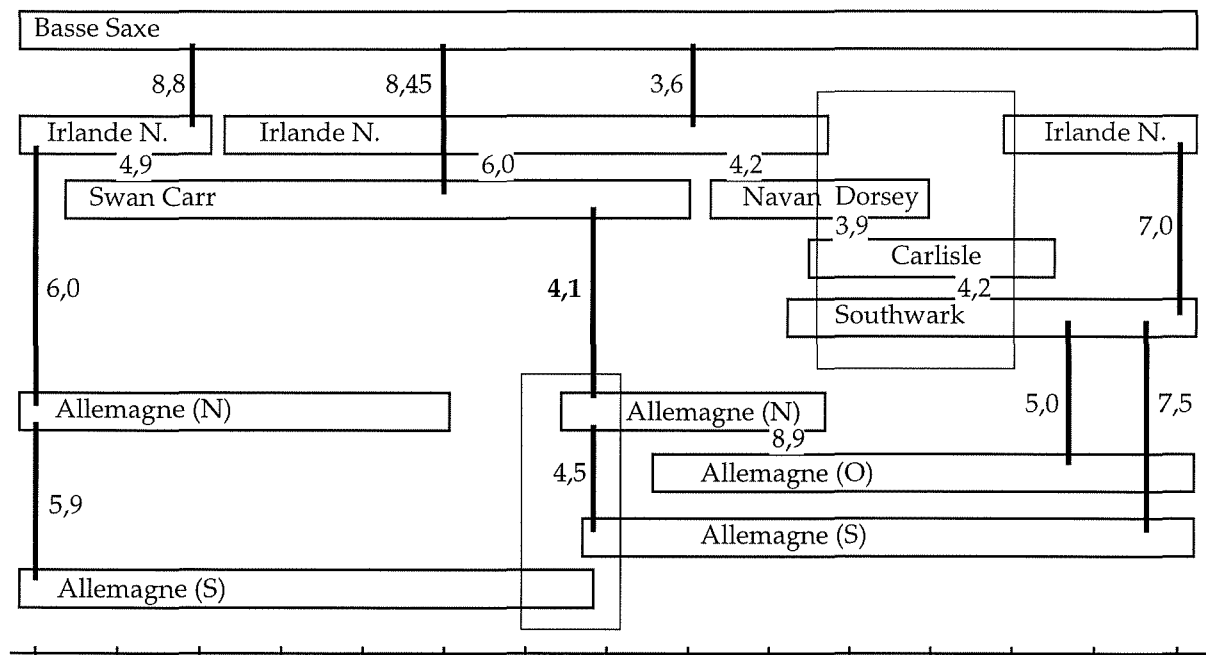


Figure 4 : interdatation (valeur *t* de Student) des références d'Europe de l'ouest (d'après PILCHER *et al.* 1984 et BAILLIE 1995). Auteurs : Irlande Baillie et Pilcher, Allemagne du sud Becker, Allemagne ouest Hollstein, Allemagne nord Schimdt et Basse Saxe Leuschner et Delorme. Encadré : périodes de recouvrement critique.

continu pour 7272 années. Toutefois, le lien entre les composantes dans l'Age du Fer dépend de deux périodes de recouvrement critique des chronologies de sites. Les étalons d'Allemagne comportent moins de 20 échantillons en moyenne entre -500 et -600. Quelques années dans cette période sont représentées par 3 individus (BAILLIE 1995). Plusieurs séries dispersées en Irlande et en Angleterre sont nécessaires pour franchir la période comprise entre 229 et 13 av. J.-C. dans celui des îles britanniques (BAILLIE 1995). LEUSCHNER et DELORME (1988) ont construit, indépendamment des chronologies participant à la mise au point des 7272 années, une référence s'étendant de 785 ap. J.-C à 4008 av. J.-C. Une justification

supplémentaire des périodes de recouvrements critiques est réalisée à l'aide de cette chronologie (BROWN *et al.* 1986). Le synchronisme entre les références britanniques et de Basse Saxe atteint des valeurs très significatives malgré l'éloignement (fig. 4). Depuis cette unification des références aussi bien des laboratoires allemands (NEYES 1991) que britanniques (BAILLIE 1995) ont étayé la zone critique de l'Age du Fer. Cette période reste cependant non documentée en France.

La plupart des synchronisations de références éloignées sont calculées avec un très grand nombre de cernes. Une valeur significative à un faible risque d'erreur près (4,1) est toutefois observée entre la référence d'Allemagne du nord et celle de Swan Carr alors que le recouvrement est inférieur à 200 ans. Les publications ne mentionnent pas directement le nombre d'individus intégrés à chaque étalon mais on peut supposer qu'il est souvent supérieur à 30. La description des références d'Allemagne du Sud (BECKER *et al.* 1985) montre par exemple que la quantité d'information est très variable dans le temps autour de 30 individus. Elle passe de quelques individus, pendant les périodes critiques, à une centaine. Le synchronisme évolue également en fonction du temps. Des chronologies des îles britanniques d'une part, et d'Allemagne du Sud d'autre part, ont été comparées par séquences de 400 ans décalées de 100 ans (BECKER *et al.* 1985). L'estimateur du synchronisme utilisé est le coefficient de coïncidence (cf. partie 2). Entre 2000 av. J.-C. et 500 ap. J.-C., il apparaît significatif pour toutes les séquences sauf entre -1600 et -1200 et varie de 54,4% à 61,6% (tab. 1).

Séquence		%G
2000	1600	56,4
1900	1500	54,6
1800	1400	54,6
1700	1300	54,4
1600	1200	<50
1500	1100	56,4
1400	1000	56,1
1300	900	58,1
1200	800	60,9
1100	700	60,4
1000	600	58,4
900	500	58,1
800	400	56,6
700	300	57,1
600	200	57,9
500	100	58,1
400	av./ap. J.-C	56,6
300	100	55,8
200	200	58,6
100	300	57,5
av./ap. J.-C	400	60,3
100	500	61,6

Tableau 1 : pourcentage de coïncidence des pentes (%G) entre la synthèse des références du sud de l'Allemagne et celle des îles britanniques (BECKER *et al.* 1985)

La synchronisation à longue distance repose sur la cohésion du climat et de la relation entre celui-ci et les cernes, dans les zones de provenance des arbres. Les chênes des marais de Brière (44) doivent être datés sur les références suisses et allemandes ainsi que sur celle construite en Lorraine. Les données climatiques permettent de montrer les différences entre l'est et l'ouest de la France mais aussi que les précipitations estivales présentent une corrélation élevée le long d'un transect. Ces précipitations représentent, au mieux, la disponibilité de l'eau pendant la période de déficit hydrique estival qui est régulièrement observé dans les climats océaniques et semi-continentaux. Disponibilité que les analyses de la relation entre les cernes et le climat montrent comme limitante de la croissance.



---

## III Lien cerne-climat en domaine océanique

### 1 Fonction de réponse

Les analyses de la relation entre le climat et les largeurs de cernes ont été menées, dans un premier temps, à l'aide de variables facilement disponibles, les précipitations et les températures mensuelles. Les méthodes de régressions multiples permettent de juger du degré de dépendance de la variable expliquée, la largeur de cerne, vis-à-vis de chacune des variables mensuelles, explicatives. Une fonction de réponse climatique de la croissance (FRITTS 1976) permet de déterminer les mois pour lesquels les températures ou les précipitations ont une action significative sur la croissance. Les relations mises en évidence sont basées sur la corrélation. Elles expriment en fait un niveau de dépendance statistique et ne signifient pas obligatoirement un lien de cause à effet. Il est donc souvent indispensable de justifier le lien observé par d'autres méthodes dont celles de l'écophysiologie. Le développement de ces méthodes a pris son plein essor dans les situations particulières où la croissance est limitée par un petit nombre de facteurs, à la suite des analyses de *Pinus aristata* multimillénaires dans les White Mountains en Californie (LAMARCHE et STOCKTON 1974). En Europe, c'est particulièrement le cas en altitude, à la limite d'extension des forêts (SERRE 1978) pour le Mélèze d'Europe (*Larix decidua*) et dans les forêts boréales pour le Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) (BRIFFA *et al.* 1990) ou le Mélèze de Sibérie (*Larix siberica*) (BRIFFA *et al.* 1996). Dans ces cas, les températures de l'été limitent fortement la croissance qui peut s'exprimer sous forme d'un modèle n'incluant que quelques paramètres. Le modèle peut alors être utilisé en fonction de transfert : les facteurs climatiques retenus sont reconstruits à partir des cernes (SERRE 1978, BRIFFA *et al.* 1990, BRIFFA *et al.* 1996).

Dans le cas des climats océaniques, les analyses de fonctions de réponses, comme celles de HUGHES (*et al.* 1978) réalisées sur du matériel des îles britanniques, ont montré la complexité des rapports entre les largeurs des cernes et les variables mensuelles. GRAY (*et al.* 1981) indique une certaine stabilité des réponses pour des sous-échantillons du même site et dans le temps pour le XXe siècle mais des différences assez marquées entre sites. A Fontainebleau, la comparaison de la croissance des chênes quadri-centenaires avec les enregistrements des températures et précipitations de Paris ne montre pas un lien cerne-climat significatif pour la période 1800-1869 (GRAY *et al.* 1981). Par contre, pour deux populations, la corrélation entre les températures et les largeurs est significative pour la période 1870-1969. Les mois ayant l'action directe la plus marquée sont février et mai alors que octobre de l'année précédant la saison de végétation a une action inverse. Les relations avec les précipitations restent non significatives. Les données climatiques ne seraient en fait pas homogènes dans le temps et affectées par leur mesure en ville (GRAY *et al.* 1981).

De façon plus générale, après l'analyse de 13 sites des îles britanniques et de Fontainebleau, BRIFFA *et al.* (1983) indiquent que les chênes répondent de façon directe aux températures du début de la saison de végétation et aux précipitations de mai, juin, juillet. Ils mettent en évidence une corrélation significative entre les croissances des 14 sites considérés ensembles et la température des mois de juin à août d'une part et les précipitations cumulées d'avril à août d'autre part. Les données météorologiques sont moyennées pour de nombreux postes répartis en Angleterre et Pays de Galles. Les croissances sont alors utilisées comme variables prédictives. Elles sont orthogonalisées grâce à l'emploi d'une analyse en composantes principales. Les données climatiques sont reconstruites et le lien cerne-climat est analysé en comparant les séries enregistrées et reconstruites. BRIFFA *et al.* (1986) comparent également les croissances des 14 sites aux variations de la pression rapportée au niveau marin des mois de mai à juillet calculées à partir de données instrumentales pour 16 points

---

d'intersection d'une grille de latitude longitude comprise entre 45°N et 60°N et entre 20°W et 10°E.

Les corrélations entre les croissances et le climat apparaissent significatives en généralisant les données. Plusieurs sites doivent être utilisés à l'aide de l'analyse en composantes principales et les variables climatiques doivent être synthétiques. C'est le cas de la pression rapportée au niveau marin qui indique le type de masses d'air, anticycloniques ou dépressionnaires, ayant principalement affecté une vaste région. Les débits des rivières ont également été utilisés pour généraliser les caractéristiques hydriques d'une période (JONES *et al.* 1984). Ces modèles permettent, en général, d'expliquer entre 25 et 40% de la variance des largeurs de cernes (JONES *et al.* 1984, BRIFFA *et al.* 1986, PILCHER *et al.* 1996).

## 2 Années caractéristiques

L'influence des caractères globaux du climat atlantique sur la croissance du Chêne a également été montrée par KELLY *et al.* (1989) à partir de 39 sites répartis en Europe du nord-ouest, de l'Irlande à la moitié nord de la France et de l'Allemagne, jusqu'au Danemark. Les croissances de ces sites très divers présentent des similitudes. La variation de la largeur d'une année sur l'autre, ou écart interannuel, a été étudiée. Les auteurs définissent une année caractéristique lorsque 80% des chronologies, soit 32 des 39, présentent un écart interannuel concordant. Entre 1851 et 1970, 10 années caractéristiques sont représentées par un écart positif, le cerne de l'année en cours est plus grand que le précédent, et 10 le sont par un écart négatif. Dans 17% des années, la grande majorité des arbres analysés répartis sur une surface aussi vaste que l'Europe du nord-ouest ont une croissance concordante. Ces années, repères temporels, justifient les recherches de synchronisme et les datations dendrochronologiques sur des aires assez vastes. KELLY *et al.* (1989) montrent que les répartitions en Europe du nord-ouest de la pression, rapportée au niveau de la mer, des 10 années caractéristiques positives présentent des similitudes. L'activité dépressionnaire est plus importante que la moyenne (calculée pour la période 1951-80) de mars à août. Ce résultat est corroboré par des précipitations supérieures à la moyenne de mars à mai. Les variables climatiques des années caractéristiques négatives sont moins homogènes. Les masses d'air sont principalement anticycloniques et le rôle de la température de juin à août serait contradictoire selon la latitude. Pour le nord des îles britanniques, les étés froids seraient responsables des cernes étroits alors que pour le sud de ces îles ainsi que pour le nord de la France, les étés chauds sont jugés limitants.

Les analyses dendroclimatiques réalisées sur de grandes surfaces montrent donc que la croissance est partiellement dépendante des variations générale du climat. Cette influence justifie, par exemple, la corrélation entre les courbes de références allemandes et irlandaises (PILCHER *et al.* 1996). Cependant, beaucoup de variables présentent des corrélations significatives avec la croissance, montrant la complexité de la relation cerne-climat qui doit s'entendre sous forme de systèmes en interactions. La diversité des réponses par site implique également une forte dépendance vis-à-vis des conditions locales, d'habitat.

## 3 Disponibilité en eau

### 3.1 Relation cerne climat en Lorraine

Des études plus récentes et plus proches du fonctionnement écophysologique de l'arbre, plutôt considéré comme l'interface entre l'atmosphère et le sol, ont été réalisées sur une aire plus restreinte en faisant appel à un nombre d'échantillons beaucoup plus élevé. 1036

---

Chênes pédonculés et sessiles des forêts d'Amance et de Champenoux, en Lorraine, ont fait l'objet d'études dendroécologiques (NIEMINEN 1988, BECKER *et al.* 1994). Ces analyses sont intégrées dans un programme de mise en évidence et d'interprétation d'une dérive positive, sur le XXe siècle, de la croissance de différentes espèces notamment le Sapin pectiné (*Abies alba*) dans les Vosges (BECKER 1989), et dans le Jura (BERT 1992), le Hêtre (*Fagus sylvatica*) en Lorraine (BADEAU 1995) et le Pin laricio (*Pinus nigra laricio*) dans les Pays de Loire (LEBOURGEOIS 1995). Cette dérive positive est également observée pour les chênes mais la modification à grande échelle du traitement sylvicole des chênaies, la conversion des taillis-sous-futaies en futaies, nécessite d'être prise en compte (BECKER *et al.* 1994). Les seuls facteurs climatiques ne sont pas suffisants pour expliquer cette dérive. Par contre, l'enrichissement de l'atmosphère en CO<sub>2</sub> apparaît, concordant avec celle-ci. L'intégration dans deux modèles, propre à chaque espèce, de 21 variables climatiques pour *Quercus petraea* et de 23 pour *Quercus robur* en plus de l'augmentation de CO<sub>2</sub> atmosphérique permet d'expliquer environ 80% de la variance des largeurs de cernes (BECKER *et al.* 1994).

La dérive à long terme représentant une grande part de la variance de la croissance pour le XXe siècle, l'augmentation du CO<sub>2</sub> est fortement explicative dans les modèles. Les variables climatiques dont la corrélation avec la croissance est la plus significative peuvent être divisées en trois types, en fonction de la phénologie de l'arbre. Le climat agit pendant la période de végétation, l'hiver précédent celle-ci, et avec un retard de quelques années. Les conditions hivernales précédant la saison de végétation sont représentées par l'action négative des températures les plus basses du mois de janvier. Le Chêne sessile, en accord avec son caractère thermophile, est plus affecté par les baisses de températures hivernales. Les précipitations de mars ont une action négative qui peut être expliquée par un démarrage en retard de la saison de végétation ou un effet défavorable de l'excès d'eau dans le sol au moment de l'activité racinaire. Pendant la saison de végétation, les précipitations du mois de juin sont les plus explicatives. Toutefois, pour toute la période de mai à août, la disponibilité en eau est une contrainte. En effet, les précipitations des mois de mai à août corréleront significativement avec les indices de croissance. Les modèles mettent également en évidence une très forte action différée de nombreux facteurs. Le pourcentage de variance expliquée passe d'environ 40-50%, en utilisant que les variables climatiques de l'année de végétation en cours, à 75-80% en incluant des variables décalées de 1 à 4 années. L'effet de facteurs survenus 5 années avant l'élaboration du cerne est observé uniquement pour le Chêne pédonculé. L'action des précipitations de mars est négative avec 1 et 2 années de retard. Les précipitations des mois de mai et août corréleront positivement avec la croissance avec un décalage de 1 à 3 ans. Les températures du mois d'août ont l'action différée la plus longue (négative), 4 ans pour *Quercus petraea* et 4 à 5 ans pour *Quercus robur*. Les conditions du mois de juillet, représentées par les températures (négativement corrélées aux précipitations) ont alternativement une action directe et inverse sur la croissance. Pour 1 an et 3 ans de retard, l'action est négative alors qu'elle est positive décalée de 2 ans. BECKER *et al.* (1994) montrent, qu'en dehors de phénomènes liés à la complexité des modèles, ce résultat peut s'expliquer par une action inverse des conditions de juillet sur la croissance des parties aériennes et racinaires. Un mois de juillet sec serait défavorable à la croissance aérienne mais favorable à celle des racines. Par répercussion, l'année suivante la croissance aérienne pourrait bénéficier de l'effet sur les racines.

Ces modèles montrent que la croissance est en rapport de façon moyenne avec les précipitations et les températures de la saison de végétation de plusieurs années consécutives et pas uniquement dans le cas d'années exceptionnelles. Les précipitations et les températures représentent dans les modèles, de façon facilement accessible pour de longues périodes, la disponibilité en eau de l'arbre par rapport à la demande climatique.

---

### 3.2 Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers

Des mesures de la croissance radiale et de la réserve en eau du sol à pas de temps journalier montrent que le Chêne sessile arrête sa croissance lorsque la fraction utile de la réserve hydrique atteint 40% (BREDA 1994). En-dessous de ce seuil, l'arbre entre en stress hydrique et réduit sa transpiration par fermeture des stomates (GRANIER *et al.* 1995).

Pour établir de façon fine l'état de la réserve hydrique du sol, qui semble le facteur le plus directement contraignant la croissance, un modèle journalier est développé par GRANIER *et al.* (1995). Celui-ci comporte une estimation de la partie des précipitations qui rechargent effectivement la réserve hydrique utile, extractible par les racines. Cette estimation est fonction du développement des feuilles, qui interceptent une part des précipitations, de la structure du peuplement, de la structure du sol et du système racinaire. Si la réserve hydrique ne forme pas une contrainte, la transpiration des arbres est proportionnelle à l'évapotranspiration potentielle selon Penman et au niveau de développement des feuilles. Lorsque la contrainte hydrique existe, la transpiration est diminuée de façon linéaire avec l'assèchement. La part de la réserve utile effectivement disponible est estimée par la différence entre les pluies efficaces et la transpiration. Le modèle permet de produire plusieurs variables décrivant les flux hydriques et l'état de la réserve. Ces variables peuvent être cumulées à partir des dates journalières. C'est notamment le cas du déficit de réserve qui représente la différence entre la réserve actuelle et la réserve critique induisant l'arrêt de croissance.

La simulation de l'état de la réserve hydrique a pu être réalisée sur une période comprise entre 1950 et 1992 pour laquelle des données climatiques journalières de la région de Nancy peuvent être utilisées. GRANIER *et al.* (1995) montrent qu'en considérant un sol de forte réserve utile, égale à 160 mm, des déficits hydriques moyens à forts sont observés pour 26 des 43 années étudiées. Ces déficits sont à même d'affecter la photosynthèse et la croissance (GRANIER *et al.* 1995). 9 années sur cette période sont caractérisées par une absence de déficit de réserve.

Le déficit de réserve cumulé sur les mois de juin, juillet et août permet d'expliquer à lui seul jusqu'à 60% de la variance des accroissements du hêtre en Lorraine (GRANIER *et al.* 1995 et BADEAU 1995). Un effet de retard d'un an de cette variable est également observé. La relation entre la croissance du Chêne et le déficit de réserve n'est pas encore publiée. On peut cependant penser que les précipitations de mai à août, explicatives de la croissance des Chênes pédonculé et sessile (BECKER *et al.* 1994), sont en fait des variables représentant la disponibilité en eau et la capacité de transpiration de l'arbre plus imparfaitement que le déficit de réserve.

La Lorraine, et d'une façon plus générale les plateaux calcaires de l'est de la France, sont soumis à un climat aux composantes semi-continentales. Cette continentalité s'exprime particulièrement dans l'amplitude annuelle des températures et la répartition des précipitations. Dans ces conditions, le rôle contraignant sur la croissance radiale du Chêne du déficit hydrique estival peut être démontré. Dans la relation cerne-climat, le sol doit être considéré comme un réservoir tampon entre les précipitations et la transpiration réelle. Seul un modèle d'analyse fin de la réserve hydrique, à pas de temps journalier, permet de bien retracer son évolution annuelle. Le déficit hydrique potentiel estival, estimé par des paramètres climatiques mensuels, est utilisable uniquement pour caractériser une région. La répartition de ce déficit climatique montre que la zone soumise à l'influence semi-continentale en France, est favorisée par des précipitations estivales moyennes assez fortes (fig. 10). Des analyses comportant suffisamment d'individus et l'utilisation de la modélisation

---

de la réserve hydrique sont indispensables pour connaître en détail l'influence du déficit hydrique estival sur la croissance dans des conditions plus atlantiques. On peut toutefois remarquer que les études réalisées avec peu d'échantillons répartis sur une grande surface montrent une relation entre la croissance et les précipitations de la saison de végétation et avec les températures du début de la saison (BRIFFA *et al.* 1983). L'analyse de KELLY *et al.* (1989) des 39 sites répartis sur l'Europe du nord-ouest indique le rôle positif sur la croissance des régimes dépressionnaires. Ces études tendent donc à montrer que le climat, présente des facteurs généraux suffisamment cohérents pour avoir une action concordante sur la croissance des arbres répartis sur une grande surface. La difficulté d'interpréter les différences de réponses climatiques entre les sites est probablement liée à l'absence de prise en compte des facteurs édaphiques. Le déficit hydrique potentiel pourrait être une variable qui exprime cette cohésion.

Il est évident que lors de l'analyse de séries anciennes, les conditions édaphiques d'origine des bois ne sont pas connues. Pour synchroniser les séries de sites séparées par des distances assez importantes une représentativité régionale, qui maîtrise ces influences, est nécessaire. Des synchronisations significatives, comme entre les références irlandaises et allemandes (PILCHER *et al.* 1984) sont observées. Cette signification est très probablement liée à la cohésion du climat et de la relation cerne-climat sous ces conditions (PILCHER *et al.* 1996).

La datation des bois subfossiles des marais de Brière sur les références de Lorraine, de Stuttgart et de Neuchâtel, est basée sur des corrélations à longue distance significatives (cf. partie 3). Le nombre d'individus considérés, ainsi que la part de signal conservée par la standardisation, influencent la qualité de cette corrélation. Egalement, nous pouvons montrer que l'influence des facteurs locaux sur la datation à longue distance est très importante, comme une application du fait que le sol est un réservoir tampon à prendre en considération dans la relation cerne-climat sous influence atlantique. En effet, au contraire du matériel archéologique, les conditions locales de développement des chênes en dépôt naturel peuvent être partiellement décrites.

## IV Synchronisation dendrochronologique entre zones océanique et semi-continentale

### 1 Forêts contemporaines

#### 1.1 Description des séries

Les analyses réalisées dans divers contextes par tous les intervenants au laboratoire de Chrono-écologie permettent de disposer de 13 groupements forestiers distribués dans la moitié nord de la France (fig. 15). La répartition des données est, quelles que soient les époques, très liée au développement des chronologies à partir des étalons construits d'abord en Allemagne et en Suisse. Le déséquilibre le long d'un transect est-ouest est donc très important, aussi bien en nombre d'individus, qu'en nombre de sites ou de types de stations forestières. Il n'est par conséquent pas question de faire ici une analyse de la corrélation le long de ce transect mais de se placer, à 3 époques différentes, dans une situation de datation d'un site soumis à une influence climatique océanique et de présenter le type d'information régionale portée par les chronologies historiques.

Les séries des sites français sont également comparées aux principaux étalons disponibles pour la période. En général, les publications de ces références ne permettent pas de déterminer, par période, le nombre d'individus et de sites intégrés à la chronologie moyenne.

Les chronologies pour la période Contemporaine sont construites en intégrant des chênes sessiles et pédonculés (non distingués par leur bois) provenant de forêts qui appartiennent à des petites régions homogènes du point de vue biogéographique. Elles peuvent être considérées comme un équivalent des chronologies de références locales qui regroupent les séries provenant de sites anciens découverts sur une surface restreinte.

La période d'analyse est comprise entre 1880 et 1980. Elle est intégralement traversée par toutes les chronologies, sauf Moulins-sur-Céphon qui débute en 1900 et les étalons de Munich, de Trèves et de Weser-Leine qui se terminent respectivement en 1962, 1964 et 1970. Ces manques d'information n'ont pas d'incidence majeure sur les résultats exposés. Par contre, le nombre d'individus constituant les chronologies est très variable, allant de 5 à 91 (tab. 3). Il influe sur les résultats ainsi que les conditions locales. A l'intérieur des groupes forestiers, les stations sont dans des situations édaphiques comparables mais elles présentent une grande diversité entre les régions. Les massifs présentant des types de stations forestières très différents font l'objet de deux séries. C'est le cas des forêts domaniales de Chaux et Fontevraud. Dans les deux massifs, des sols hydromorphes, dont le niveau de nappe est contraignant pour l'enracinement, peuvent être opposés aux sols drainés. Le type de station 111 de la forêt de Chaux est une chênaie pédonculée-boulaie-tremblaie mésoacidiphile à molinie bleue sur sol hydromorphe appauvri (taux de saturation 3-5%) (BAILLY 1989). La série 310 regroupe 3 types de chênaies sessiliflores-boulaies plus ou moins hyperacidiphiles localisées sur des sols très drainants, et très désaturés (<5%), à texture grossière plus ou moins enrichie en limons se développant sur des cailloutis du tertiaire principalement en bordure de plateau (BAILLY 1989). Pour les deux massifs, l'association de séries individuelles provenant de types de stations très différents induit une forte baisse du pourcentage d'années caractéristiques (cf. partie2) (tab. 3). Cette baisse indique que les arbres issus de types de stations très différents présentent des croissances dont les écarts interannuels (signal de haute

lieu	Nb stations	Nb indiv.	Nb.c./an 1880-1980	%caract.	auteurs
G FD Gâvre (44)	1	9	9	61	Keller
F-d Cravant (37) FD Fontevraud(49)	5 sol drainé	42	38	45	Girardclos, Genre
F-h FD Fontevraud (49)	2 sol hydro.	12	12	55	Girardclos
	synthèse	7	54	46	Girardclos
P Perche (64)	3	20	19	45	Doucerain, Lambert
R Rouvray (76)	1	5	5	69	BERNARD (1997)
C-C Compiègne (96)-Chantilly (60)	4	29	29	40	TRENARD et DUCHATEAU (1985) BERNARD (1997)
M Moulins/Céphon (36)	1	11	8	60	Lavier, Lambert
C Charollais (71)	4	24	22	44	Guibal, Perrault
DV Dépression périvosgienne (70)	4	60	55	43	GUIBAL (1992)
C111 FD Chaux (39)	3 type 111	28	22	49	Perrier, Lavier, Lambert
C310 FD Chaux (39)	4 type 310	22	21	64	Perrier, Lavier, Lambert
	synthèse	7	50	43	Girardclos
F FD La Ferté (71)	1	10	9	55	Girardclos
J Jura-sud (39)	9	91	75	27	Perrier, Lambert
Be Beroche (Ne-Ch)	-	27	27	57	Gassmann
T Trèves (D)	-	-	-	-	HOLLSTEIN (1965)
W-L bassin Weser et Leine (D)	-	-	-	-	DELORME (1972)
M Munich (D)	-	-	-	-	HUBER, GIERTZ-SIEBENLIST (1978)
Me Bassin Meuse (B)	-	-	-	-	HOFFSUMMER (1989)

Tableau 3 : description des séries contemporaines

---

fréquence) peuvent se contrarier (GIRARDCLOS 1992). Le taux d'années caractéristiques faible de la chronologie Jura-sud est expliqué également par la provenance des arbres de divers types de stations mais ici liées à l'altitude, comprise entre 300 et 700 m. Pour toutes les autres séries, ce taux est supérieur à 30% qui peut être considéré comme une limite, observée pour les longues références.

Localement, pour chaque groupement forestier, les conditions de traitement sylvicole sont assez homogènes. Cependant, comparées sur toute la surface, elles sont très différentes. Les parcelles échantillonnées de la forêt de Chaux sont principalement des taillis-sous-futaies dont la rotation est restée établie, proche de 30 ans, depuis la naissance des arbres jusque récemment. Par contre, les forêts de Compiègne et de Chantilly sont des futaies assez régulières où la compétition interindividuelle peut être jugée plus forte. La plupart des sélections de tiges d'avenir sont réalisées en favorisant les pieds issus de graines, sauf pour les forêts de Cravant et de Fontevraud où des sélections sur souche ont été pratiquées.

Comme dans une situation de datation dendrochronologique, les données sont donc très dispersées sur plusieurs plans : d'un point de vue statistique (le nombre d'individus varie fortement), édaphique et de traitement sylvicole. On peut facilement imaginer que chacun de ces facteurs influe sur l'information portée par la séquence moyenne de chaque groupement forestier. Pour palier au mieux à ces biais, les séries individuelles sont standardisées. L'indice E est utilisé (Cf. partie 2). Il permet de conserver principalement les variations de hautes fréquences, comprises entre quelques années consécutives. Celles-ci sont les plus à même de représenter l'influence des facteurs régionaux sur la croissance exploitée pour la datation. Le test de synchronisme utilisé est le test dit de Student (cf. partie 2). Dans les conditions de calcul, une valeur t de Student supérieure à 4 peut être jugée significative.

## *1.2 Résultats et discussion*

Une matrice carrée permet de montrer le synchronisme entre chaque paire de séries (tab. 4). La valeur t moyenne de la matrice s'élève à 4,03 et la médiane à 3,95. Le lien entre chaque série est donc en moyenne significatif : il existe une cohésion assez élevée entre les croissances sur l'aire de distribution. Dans le cas de séries d'époque Contemporaine, la datation proprement dite est en fait réalisée par comptage des cernes. Dans la très grande majorité des comparaisons, le résultat de synchronisme le plus élevé correspond bien à la datation attendue.

Toutefois, la qualité du synchronisme subit de fortes variations dans la matrice, les valeurs extrêmes observées sont 18,6 entre les étalons de Neuchâtel et de Boll et 0,09 entre Weser-Leine et Chaux111. La structure très complexe des données explique une part de ces variations. Le nombre d'échantillons par chronologie ne présente pas de corrélation avec la valeur t moyenne calculée pour une ligne ou une colonne complète car les autres sources de variations interfèrent. Par contre, si l'on admet un découpage en 4 groupes de la matrice (tab. 4). La valeur t moyenne entre les chronologies d'un même groupe présente un coefficient de corrélation qui s'élève à 0,6 avec le nombre de bois inclus dans la chronologie. Dans ce cas, la source de variation due aux régions est maîtrisée mais les différences édaphiques et de localisation dans la région peuvent encore interférer. Le calcul est réalisable sur 12 paires et le coefficient est significatif pour un test de Student. Par contre, il n'y a pas de lien significatif entre le nombre de bois et le synchronisme des chronologies issues des groupements forestiers sur les étalons ou sur celles des régions voisines. Ceci montre que des séries comportant peu d'échantillons peuvent comporter une information régionale.

C'est particulièrement le cas de 5 arbres de la Forêt de Rouvray. Malgré ce nombre d'individus, la série moyenne corrèle fortement avec celles de régions éloignées. La valeur t de Student s'élève par exemple à 5,03 entre cette série et C310, elle reste significative (4,93) avec l'étalon de Neuchâtel et de 3,93 avec W-L, la référence la plus éloignée (tab. 4). Toutefois, cette situation reste exceptionnelle. La représentation spatiale des valeurs t obtenues entre la série de la FD de Gâvre et toutes les autres (fig. 15) montre des valeurs inférieures à celles obtenues avec les arbres de Fontevraud et de Cravant (fig. 16). La différence du nombre d'individus (tab. 3) peut expliquer une part de cette augmentation mais il n'existe pas un lien simple entre richesse en nombre et niveau de corrélation.

	T	Me	W-L	M	N	B	Be	J	F	C310	C111	synt.	DV	C	C-C	R	P	M	F-d	F-h	synt.	G	
	1 étalons							2 zone est							3 B. Paris. 4 zone ouest								
T	8,06	5,13	5,01	4,55	3,68	4,96	3,27	1,38	4,53	3,06	4,75	5,35	3,61	3,82	4,75	5,32	2,42	2,03	4,15	3,64	3,30		
Me	8,06	7,00	4,19	2,25	1,80	2,31	2,18	3,64	3,40	3,39	2,79	3,95	3,18	3,45	4,84	6,99	2,30	3,05	3,31	3,47	3,93		
W-L	5,13	7,00	6,34	2,03	1,73	1,97	0,45	3,46	2,55	0,09	2,58	2,80	1,53	4,90	3,93	3,26	2,41	3,14	3,20	3,56	2,40		
M	5,01	4,19	6,34	3,56	2,49	3,58	3,68	3,17	2,98	1,90	2,70	3,50	3,38	5,67	3,76	3,10	2,46	2,65	3,22	3,33	2,72		
N	4,55	2,25	2,03	3,56	18,63	-	4,96	1,33	5,67	3,00	5,03	4,48	5,65	4,87	4,93	3,08	5,05	2,05	3,23	3,07	3,24		
B	3,68	1,80	1,73	2,49	18,63	13,25	4,05	1,06	5,48	3,05	4,68	4,16	5,04	4,75	4,40	3,26	4,71	2,61	3,19	3,12	2,47		
Be	4,96	2,31	1,97	3,58	-	13,25	5,45	0,87	5,10	2,57	4,52	4,13	4,67	4,28	4,59	3,00	4,91	1,58	2,86	2,48	3,47		
J	3,27	2,18	0,45	3,68	4,96	4,05	5,45	4,23	6,54	6,76	7,50	7,71	8,19	3,05	3,65	4,94	4,56	1,36	2,84	2,48	4,17		
F	1,38	3,64	3,46	3,17	1,33	1,06	0,87	4,23	2,31	2,96	3,20	4,12	4,60	1,69	2,36	3,46	1,76	3,29	1,96	2,84	2,94		
C310	4,53	3,40	2,55	2,98	5,67	5,48	5,10	6,54	2,31	7,48	-	8,08	6,68	3,35	5,03	5,89	3,58	2,06	3,98	3,53	2,40		
C111	3,06	3,39	0,09	1,90	3,00	3,05	2,57	6,76	2,96	7,48	-	9,41	6,23	1,70	3,42	7,12	2,81	2,21	2,70	2,90	3,13		
synt.	4,75	2,79	2,58	2,70	5,03	4,68	4,52	7,50	3,20	-	-	8,64	7,27	3,29	5,16	4,40	3,62	3,04	3,55	4,33	2,34		
DV	5,35	3,95	2,80	3,50	4,48	4,16	4,13	7,71	4,12	8,08	9,41	8,64	7,95	5,17	4,72	6,29	3,80	3,67	4,01	4,45	3,66		
C	3,61	3,18	1,53	3,38	5,65	5,04	4,67	8,19	4,60	6,68	6,23	7,27	7,95	4,43	4,78	6,19	5,83	4,49	4,29	4,77	4,32		
C-C	3,82	3,45	4,90	5,67	4,87	4,75	4,28	3,05	1,69	3,35	1,70	3,29	5,17	4,43	6,05	3,66	4,17	4,29	3,05	3,86	2,74		
R	4,75	4,84	3,93	3,76	4,93	4,40	4,59	3,65	2,36	5,03	3,42	5,16	4,72	4,78	6,05	6,47	3,76	3,67	5,56	5,44	3,97		
P	5,32	6,99	3,26	3,10	3,08	3,26	3,00	4,94	3,46	5,89	7,12	4,40	6,29	6,19	3,66	6,47	3,53	4,33	5,06	5,30	3,58		
M	2,42	2,30	2,41	2,46	5,05	4,71	4,91	4,56	1,76	3,58	2,81	3,62	3,80	5,83	4,17	3,76	3,53	3,96	5,38	5,57	3,84		
F-d	2,03	3,05	3,14	2,65	2,05	2,61	1,58	1,36	3,29	2,06	2,21	3,04	3,67	4,49	4,29	3,67	4,33	3,96	8,05	-	3,80		
F-h	4,15	3,31	3,20	3,22	3,23	3,19	2,86	2,84	1,96	3,98	2,70	3,55	4,01	4,29	3,05	5,56	5,06	5,38	8,05	-	5,19		
synt.	3,64	3,47	3,56	3,33	3,07	3,12	2,48	2,48	2,84	3,53	2,90	4,33	4,45	4,77	3,86	5,44	5,30	5,57	-	-	5,19		
G	3,30	3,93	2,40	2,72	3,24	2,47	3,47	4,17	2,94	2,40	3,13	2,34	3,66	4,32	2,74	3,97	3,58	3,84	3,80	5,10	5,19		

Tableau 4 : valeur t de Student entre les chronologies des groupements forestiers. Données en indice E sur la période 1880-1980. Gras : valeurs significatives, encadrés : groupes de chronologies

Notamment, le type de station forestière interfère fortement dans cette relation. A nombre d'individus comparable, les valeurs t obtenues avec les séries C110 et C310 présentent des écarts importants. En moyenne, les coefficients observés avec la série représentative du type de station sur sols hydromorphes sont inférieurs à ceux obtenus avec C310. Ceci est également le cas à Fontevraud mais le nombre d'individus n'est pas comparable. Le synchronisme est en fait de qualité médiocre entre C111 et les étalons, alors qu'avec les chronologies de l'est de la France, les valeurs sont un peu supérieures à celles obtenues avec C310 (tab. 4). Les séries issues de types de stations forestières différents du même massif présentent entre elles un synchronisme élevé :  $t=8,05$  dans le cas de Fontevraud et  $t=7,48$  pour la FD de Chauv. Ces valeurs sont supérieures à la plupart de celles observées entre les séries de groupements forestiers différents. Il est donc possible, au moins dans ces deux cas, de juger les influences liées au type de stations moins importantes que celles liées à la région. De même, les coefficients obtenus en intégrant tous les individus des massifs dans une synthèse (tab. 3 et tab. 4) sont légèrement améliorés. On peut juger, dans ce cas, que la perte d'homogénéité, liée à l'influence du type de station, concordante de l'augmentation du nombre d'individus se traduit par une augmentation de l'information régionale. Toutefois, l'intégration de bois trop diversifiés peut se traduire par un amortissement du signal.



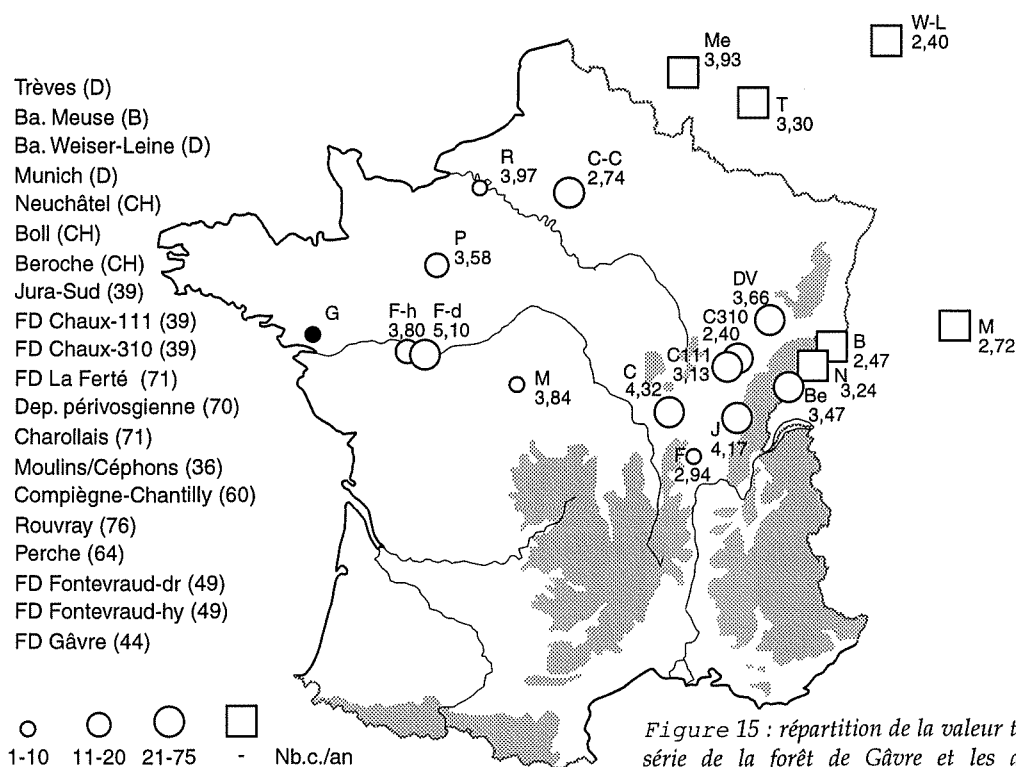


Figure 15 : répartition de la valeur  $t$  de Student entre la série de la forêt de Gâvre et les autres groupements forestiers

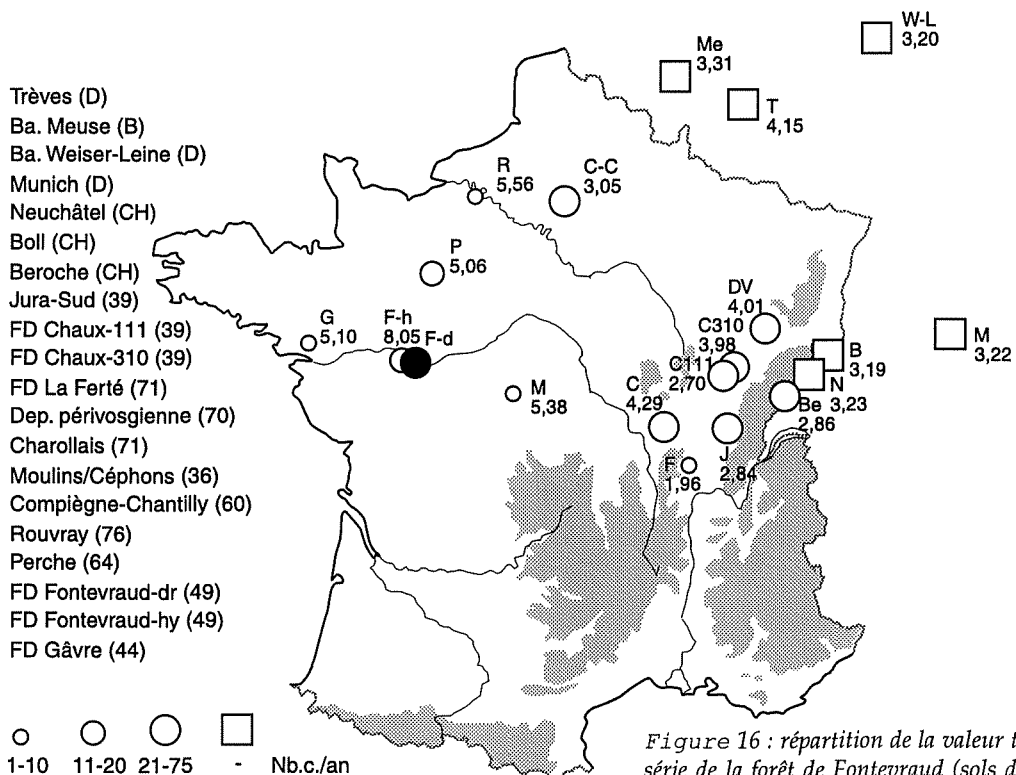


Figure 16 : répartition de la valeur  $t$  de Student entre la série de la forêt de Fontevraud (sols drainés) et les autres groupements forestiers

Malgré la structure très complexe des données et la multiplicité des facteurs pouvant avoir des répercussions sur le synchronisme entre les chronologies des groupements forestiers, 4 groupes, fonction de la géographie, peuvent être dégagés (tab. 4). Ils sont basés sur la part d'information régionale portée par les séries. Il est possible de considérer ensemble les étalons extérieurs à la France bien que des différences nord-sud opposent la chronologie de la Weser-Leine et celles de la région de Neuchâtel. Les séries de l'est et de l'ouest de la France corréleront davantage entre elles qu'avec leurs voisines. Les deux séries de Rouvray et de Compiègne

sont isolées dans le Bassin parisien. Leur synchronisme est élevé (6,05) mais il est à noter que la chronologie de Rouvray est également fortement synchronisée avec celle du Perche (6,47). Les valeurs *t* moyennes calculées pour chaque chronologie des trois principaux groupes montrent nettement l'organisation du synchronisme le long du gradient est-ouest (tab. 5).

lieux		Zone ouest	Zone est	étalons
Trèves (D)	T	3,48	3,71	<b>5,23</b>
bassin Meuse (B)	Me	3,84	3,22	<b>4,27</b>
bassin Weser Leine (D)	W-L	3,00	1,92	<b>4,03</b>
Munich (D)	M	2,91	3,04	<b>4,20</b>
Neuchâtel (CH)	N	3,29	<b>4,30</b>	<b>6,20</b>
Boll (CH)	B	3,23	3,93	<b>6,93</b>
Beroche (Ne-CH)	Be	3,05	3,90	<b>5,21</b>
Jura-sud (39)	J	3,39	<b>6,82</b>	3,43
FD La Ferté (71)	F	2,71	<b>3,57</b>	2,13
FD Chaux (39)	C310	3,57	<b>6,22</b>	<b>4,24</b>
	C111	3,48	<b>6,57</b>	2,44
	synt.	3,55	<b>6,65</b>	3,86
Dép. périvosgienne (70)	DV	<b>4,31</b>	<b>7,65</b>	<b>4,05</b>
Charollais (71)	C	<b>4,98</b>	<b>6,82</b>	<b>3,87</b>
Perche	P	<b>4,36</b>	<b>5,47</b>	<b>4,00</b>
Moulin/Céphon (36)	M	<b>4,46</b>	3,71	3,47
FD Fontevraud (49)	F-d	<b>5,04</b>	2,87	2,44
	F-h	<b>5,90</b>	3,33	3,31
	synt.	<b>5,35</b>	3,61	3,24
FD Gâvre (44)	G	<b>4,30</b>	3,28	3,08

La valeur *t* entre les séries de l'ouest et les étalons suisses et allemands atteint 4, uniquement pour les forêts du Perche (tab. 5). En moyenne, le synchronisme à chaque extrémité du transect n'est donc passif. Dans le cas de comparaisons de chronologies provenant de zones limitrophes, les valeurs obtenues dépassent plus fréquemment 4. Cependant, il reste assez rare que la corrélation soit significative sur une majorité des références. Les valeurs *t* entre chaque paire (tab. 4) montrent que les chronologies de l'est de la France sont mieux datées sur les étalons de Neuchâtel et de Trèves, plus proches, que ceux de Munich ou du bassin de la Weser-Leine. De même, la chronologie du Charollais présente les valeurs *t* les plus fortes avec les séries de l'ouest, ce qui peut en partie s'expliquer par la position géographique de ces forêts. La répartition des valeurs *t* de Student, obtenues

Tableau 5 : valeur *t* de Student moyenne par chronologie en fonction des zones de regroupements. Gras : valeurs significatives

entre la série issue des sols drainés de la forêt de Fontevraud et les autres groupements forestiers, montre également que la limite de signification atteint partiellement la zone est (fig. 16). La représentativité des chronologies locales ne permet donc pas, à partir de 100 cernes, de les dater à travers le gradient climatique est-ouest de la moitié nord de la France.

Les séries de cernes de la zone ouest, qui synchronisent assez fortement, peuvent être assemblées en une seule. La référence (refOuest) comporte alors 98 individus pour un nombre de cernes moyen par an s'élevant à 54. Le taux d'années caractéristiques tombe à 29,8%, proche de ce qui est classiquement observé pour les étalons régionaux. La qualité du synchronisme entre cette référence et les chronologies de l'est de la France, ainsi qu'avec les séries allemandes et suisses, est alors nettement augmentée. La corrélation est significative pour toutes les comparaisons sauf avec la série de Beroche (tab. 6). Un niveau de représentativité régionale est donc indispensable pour réaliser une datation à longue distance. Toutefois, le lien entre le nombre de bois, l'origine des bois et la qualité de la corrélation n'est pas direct.

référence	refOuest
Trèves (D)	5,17
bassin Meuse (B)	6,00
bassin Weser Leine (D)	4,31
Munich (D)	4,06
Neuchâtel (CH)	4,30
Boll (CH)	4,20
Beroche (Ne-CH)	3,89
Jura-sud (39)	4,61
FD La Ferté (71)	4,01
FD Chaux (39)	5,27
Dép. périvosgienne (70)	6,32
Charollais (71)	7,24
Rouvray (76)	7,33
Compiègne-Chantilly(60)	4,75

Tableau 6 : valeurs *t* de Student entre refOuest et les chronologies de l'est de la France et les étalons suisses et allemands (indice E, période 1880-1980)

## 2 Sites historiques : 1350-1450

La qualité du synchronisme d'une série provenant du château de Durtal (49), datée de 1567, se dégrade également le long d'un transect est-ouest dans la partie nord de la France (fig. 17).

Références régionales

- Trèves (D)
- Ba. Meuse (B)
- Ba. Weiser-Leine (D)
- Munich (D)
- Neuchâtel (CH)
- Boll (CH)
- Bassin Parisien
- Northern-France

Références locales

- Amiens (80)
- Verdun (55)
- Chaumont (52)
- Montbéliard (25)
- Besançon (25)
- Dijon (21)
- Semur-en-Auxois (21)
- Cluny (71)
- Loches (36)
- Riveau (37)
- Montsoreau (49)
- Durtal (49)
- Laval (53)
- Maxent (35)

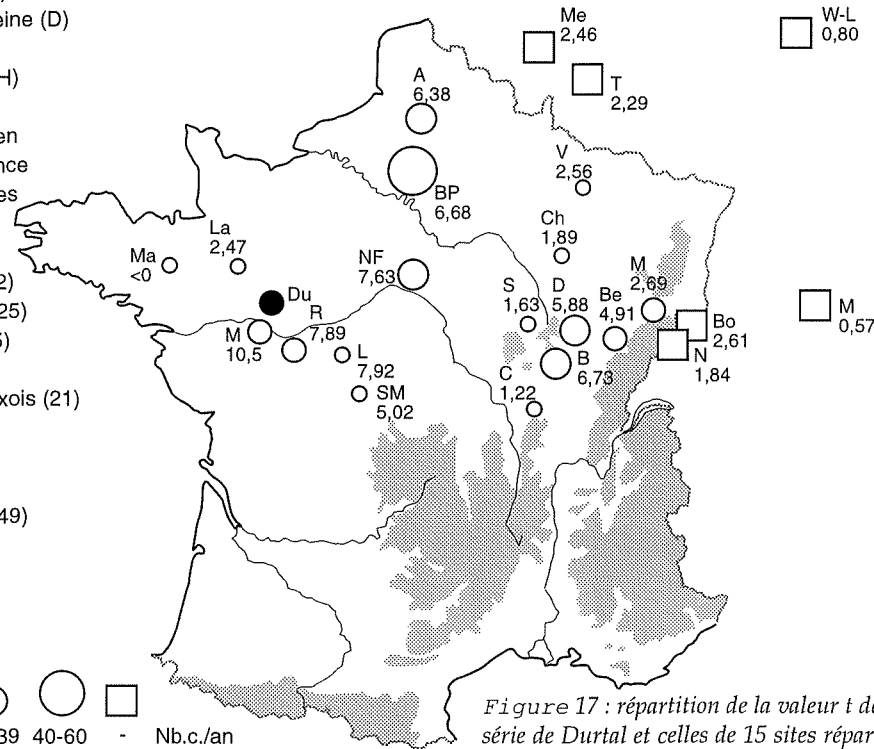
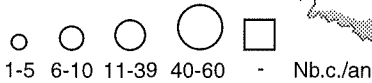


Figure 17 : répartition de la valeur t de Student entre la série de Durtal et celles de 15 sites répartis d'est en ouest. (indice E, période 1350-1450)

lieu	Nb.indiv.	Nb.c./an 1350-1450	Nb c.	%année caract.	auteurs
A Amiens (80)	77	22	101	29	Hoffsumeur
V Verdun (55)	10	3	101	65	Lavier
Ch Chaumont (52)	20	5	101	57	Lavier
M Montbéliard (25)	104	10	101	41	Lavier
Be Besançon (25)	18	8	101	58	Lavier
D Dijon (21)	70	10	101	51	Lavier Bernard Girardclos
B Beaune (21)	39	17	87	43	Lavier Ponsot
S Semur-en-Auxois (21)	12	3	101	63	Ponsot Lavier
C Cluny (71)	57	5	101	55	Ponsot Lavier
L Loches (36)	4	4	101	83	Lavier
SM Saint-Marcel (36)	13	5	101	58	Lavier
R Rivau (37)	33	12	83	39	Doucerain
M Montsoreau (49)	20	11	88	60	Doucerain
Du Durtal (49)	28	11	101		Doucerain
La Laval (53)	9	6	92	57	Doucerain
Ma Maxent (35)	9	4	101	41	Doucerain
références régionales					
BP Bassin Parisien	980	40	101	20	BERNARD (1997)
NF "Northern France"		24	101		PILCHER (1987)
Me bassin de la Meuse (B)			101		HOFFSUMMER (1989)
T Trèves (D)			101		HOLLSTEIN (1965)
W-L bassin Weser et Leine (D)			101		DELORME (1972)
M Munich (D)			101		HUBER, GIERTZ-SIEBENLIST (1978)
Bo Boll (CH)			101		Egger
Ne Neuchâtel (CH)			101		EGGER, GASSMANN, BURRI (1985)

Tableau 7 : description des séries historiques

La série datée est composée de 18 individus, soit un nombre de cernes moyen par an de 11. La période d'étude comprise entre 1350 et 1450 est choisie pour disposer de suffisamment d'information. 15 sites traversent presque entièrement cette période (tab. 7). Le nombre de cernes minimum utilisé est 83, pour la chronologie de Rivau. Le manque de cerne ne semble pas affecter les résultats.

La couverture moyenne, en nombre de cernes par année (tab. 7), qui estime la quantité d'individus utilisés sur la période 1350-1450, est très variable. Comprise entre 3 et 22 pour les chronologies des sites, elle dépasse 40 pour les étalons régionaux. La quantité d'information et la répartition géographique, favorisées en Bourgogne et en Franche-Comté, influencent les résultats. Il existe un assez fort décalage entre le nombre d'individus intégré à une chronologie locale comme celle de Montbéliard ou de Cluny et les individus disponibles pour la période 1350-1450 car ces séries approchent 600 à 800 ans de longueur. Le milieu d'origine des bois ne peut être connu, ainsi que le type de gestion pratiquée. Il est donc également très probable que d'importantes différences de conditions locales agissent sur le niveau de corrélation. Pour maîtriser au mieux une part de ces influences, les séries sont standardisées (indice E cf. partie 2).

Elles présentent cependant une part d'information régionale. Le synchronisme entre celle de Durtal et les plus riches en éléments de Bourgogne est significatif sur la base de cette information. C'est également le cas de celles issues de Besançon et d'Amiens. Par contre, les valeurs restent faibles sur les étalons trop éloignés.

	références régionales	refOuest
NF	"Northern France"	12,38
BP	Bassin Parisien	8,90
	Bourgogne	8,63
T	Trèves (D)	5,48
M	Munich (D)	4,50
Bo	Boll (CH)	3,71
Me	bassin de la Meuse (B)	2,83
Ne	Neuchâtel (CH)	2,11
W-L	bassin Weser et Leine (D)	1,63

Les séries des trois châteaux, de Durtal, Monsoreau et Rivau peuvent être assemblées en une référence synthétique, refOuest. Le synchronisme, calculé pour la seule période de 1350-1450, reste non significatif. En utilisant la totalité des données disponibles, refOuest comporte alors un nombre de cernes moyen annuel qui s'élève à 22 pour une longueur de 388 années. Dans ces conditions, la représentation devient suffisante pour que la série soit datée sur les étalons de Trèves et de Munich (tab. 8).

Tableau 8 : valeurs *t* de Student entre refOuest et les étalons régionaux suisses et allemands (indice E, période 1880-1980)

### 3 Sites gallo-romains

La datation, de 53 av. J.-C., d'une série issue du site de Visseiche (35) montre également que le synchronisme est significatif jusqu'en Bourgogne ou jusqu'à Vendresse dans les Ardennes (fig. 18). Les valeurs *t* obtenues sur les étalons plus à l'est sont par contre nettement plus faibles. La chronologie datée comporte 150 ans. Elle est composée de 18 individus, correspondant à une couverture moyenne de 8 cernes par années. Comme pour les autres périodes, une partie de cette observation est liée à l'information régionale contenue dans les séries, mais les conditions locales et la quantité d'information interfèrent fortement : c'est par exemple le cas de Sceaux-du-Gatinais, sous représenté (tab. 9).

Plusieurs sites gallo-romains ont livrés, pour la période comprise entre -200 et +100, un nombre d'individus important, pouvant atteindre 200 datés à Tours (tab. 9). Les relations entre tous les sites sont donc favorisées par cette qualité de l'information. Dans la matrice carrée présentant toutes les corrélations, les valeurs *t* sont en moyenne de 4,5 et de 4,9 si les références du Danube et des Pays Bas, très éloignées, ne sont pas considérées (tab. 10). La synchronisation de la série du site de Tours est significative à longue distance, avec l'étalon

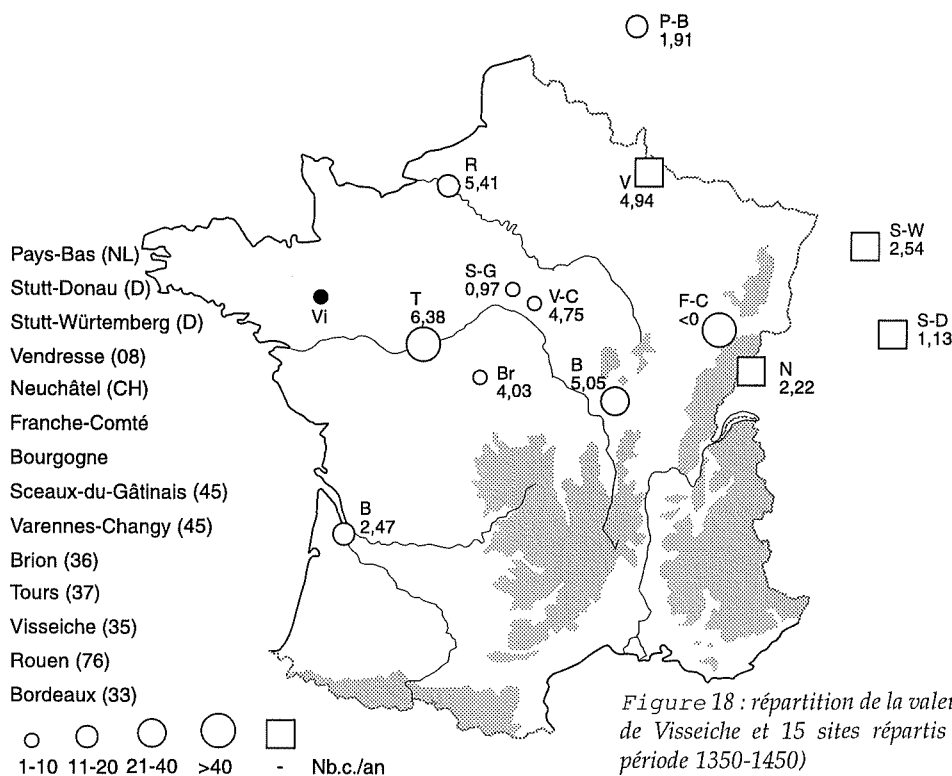


Figure 18 : répartition de la valeur t de Student entre la série de Visseiche et 15 sites répartis d'est en ouest. (indice E, période 1350-1450)

du Wurtemberg. Cette chronologie est riche en échantillons (tab. 9) et une longueur de 240 cernes est utilisée. De plus, la croissance des arbres est lente et très régulière.

références	Nb.indiv.	Nb.c./an	Nb.c.	auteurs
P-B NLRom_R.95	-	11	300	JANSMA (1995)
S-D Stutt-Donau100	-	-	300	Becker
S-W Stutt-Wurt1200	-	-	300	Becker
V Vendresse(08)	-	-	263	Tegel
N Neuch-ROM1990	-	-	300	Gassmann
F-C Franche-Comté-Classic2	192	65	240	Girardclos Lavier
B Bourgogne-Classic7	150	26	300	Lavier
S-G Sceaux-du-Gâtinais (45)	3	3	107	Lavier
V-C Varennes-Changy(45)	39	9	224	Lavier
Br Brion (36)	18	7	238	Lavier
T Tours (37)	201	61	240	Locatelli Doucerain
Vi Visseiche (35)	18	8	150	Perrault
R Rouen (76)	30	10	300	Lavier Locatelli
B Bordeaux (33)	54	12	283	Lavier Ponsot

Tableau 9 : description des séries gallo-romaines

Il a été observé d'une façon assez générale que les conditions de datation sont favorables pendant la période de -200 à +100. La disponibilité du matériel peut expliquer une part de cette remarque. Cependant, BERNARD (1997) montre que pour des sites où les forêts ont été très exploitées, comme autour des villes de Rouen et d'Amiens, les pièces d'architectures sont réalisées pendant le premier siècle av. J.-C. jusqu'au deuxième siècle ap. J.-C. dans des bois à croissance assez lente et régulière, dont le synchronisme est élevé. Ces caractéristiques vont en se dégradant et les pièces architecturales réalisées dans des arbres jeunes, nerveux et nouveaux, sont nombreuses aux III<sup>e</sup> et IV<sup>e</sup> siècles. Les conditions de datation sont alors délicates d'une façon générale, car les séries comportent peu de cernes et corréleront peu. Beaucoup de références sont interrompues durant cette période. Il est possible de relier cette diminution de la qualité du bois utilisé en architecture à l'exploitation intensive des siècles précédents. Des peuplements en régénération stable, peu exploités, ont probablement été déséquilibrés pendant le premier et le deuxième siècle de notre ère, soit par une exploitation intense, soit par des règles de gestion peu adaptées pour le bois d'oeuvre comme la mise en taillis. Les droits d'accès aux bois de réserve, de gros volume, peuvent également avoir changés entre les deux périodes. D'autres indices, comme le transport, des adaptations techniques, dont l'apparition du sciage (BERNARD 1997) montrent qu'une économie du bois se développe avec l'empire romain. La gestion sylvicole prend alors de l'importance. Elle implique une dynamique des peuplements moins régulière qui explique peut-être une part de la différence de niveau de corrélation avant et après le deuxième siècle de notre ère.

références	P-B	S-D	S-W	V	N	F-C	B	S-G	V-C	Br	T	Vi	R	B
P-B NLRom_R95		2,71	4,06	2,96	1,32	3,10	3,47	1,92	2,50	2,90	3,93	1,91	1,61	3,12
S-D Stutt-Donau100	2,71		11,18	3,21	5,72	3,70	4,67	2,65	0,96	1,25	0,03	1,13	2,15	1,06
S-W Stutt-Wurt200	4,06	11,18		4,99	7,00	8,44	10,18	6,30	6,60	3,17	5,15	2,54	4,70	3,17
V Vendresse(08)	2,96	3,21	4,99		4,32	4,49	8,49	3,53	6,92	4,39	5,82	4,94	4,04	0,57
N Neuch-ROM1990	1,32	5,72	7,00	4,32		4,09	8,36	1,56	4,06	2,40	3,58	2,22	4,63	1,13
F-C Franche-Comté-Classic2	3,10	3,70	8,44	4,49	4,09		7,58	4,54	3,19	2,75	3,75	-1,00	1,75	2,78
B Bourgogne-Classic7	3,47	4,67	10,18	8,49	8,36	7,58		6,13	13,26	8,51	9,30	5,05	8,09	4,04
S-G Sceaux-du-Gâtinais (45)	1,92	2,65	6,30	3,53	1,56	4,54	6,13		6,35	4,06	4,07	0,97	2,13	4,79
V-C Varennes-Changy(45)	2,50	0,96	6,60	6,92	4,06	3,19	13,26	6,35		6,84	10,40	4,75	7,39	4,28
Br Brion (36)	2,90	1,25	3,17	4,39	2,40	2,75	8,51	4,06	6,84		5,96	4,03	6,08	3,06
<b>T Tours (37)</b>	<b>3,93</b>	<b>0,03</b>	<b>5,15</b>	<b>5,82</b>	<b>3,58</b>	<b>3,75</b>	<b>9,30</b>	<b>4,07</b>	<b>10,40</b>	<b>5,96</b>		<b>6,38</b>	<b>7,17</b>	<b>5,22</b>
Vi Visseiche (35)	1,91	1,13	2,54	4,94	2,22	-1,00	5,05	0,97	4,75	4,03	6,38		5,41	2,47
R Rouen (76)	1,61	2,15	4,70	4,04	4,63	1,75	8,09	2,13	7,39	6,08	7,17	5,41		2,83
B Bordeaux (33)	3,12	1,06	3,17	0,57	1,13	2,78	4,04	4,79	4,28	3,06	5,22	2,47	2,83	

Tableau 10 : valeur t de Student entre les chronologies gallo-romaines. (indice E, période -200 +100, encadrés : groupes de corrélation)

#### 4 Conclusion

Il est nécessaire que les chronologies soient représentatives de l'influence des facteurs régionaux pour les synchroniser à longue distance. Cette représentativité est recherchée à chaque opération dendrochronologique. D'une part, elle nécessite un nombre de cernes minimum et, d'autre part, l'influence des facteurs internes, individuels et locaux est amortie lorsque les croissances de plusieurs individus sont synthétisées dans une chronologie moyenne. Toutefois, il n'existe pas un nombre de cernes et d'échantillons à partir desquels une datation est possible, car les conditions locales interfèrent. La croissance de la population régionale peut être représentée avec une bonne qualité par un échantillonnage de quelques arbres comportant peu de cernes alors qu'un lot de plus de 50 individus se développant dans des conditions particulières peut rester atypique. Ces cas sont cependant rares. Les expériences réalisées dans trois périodes montrent que les chronologies constituées en moyenne de 10 à 20 cernes par an ne peuvent être datées que dans la zone limitrophe de celle dont elles sont issues. Par contre, en associant environ 30 à 60 individus, pour 200 à 300 cernes, la datation de séries soumises aux influences climatiques océaniques peut être réalisée sur celles de l'est de la France, de l'ouest de la Suisse et de l'Allemagne, sous influences climatiques plus continentales. Ces observations apparaissent en accord avec les résultats présentés par BECKER *et al.* (1985) entre les étalons des îles britanniques et allemands.



# Chapitre 2

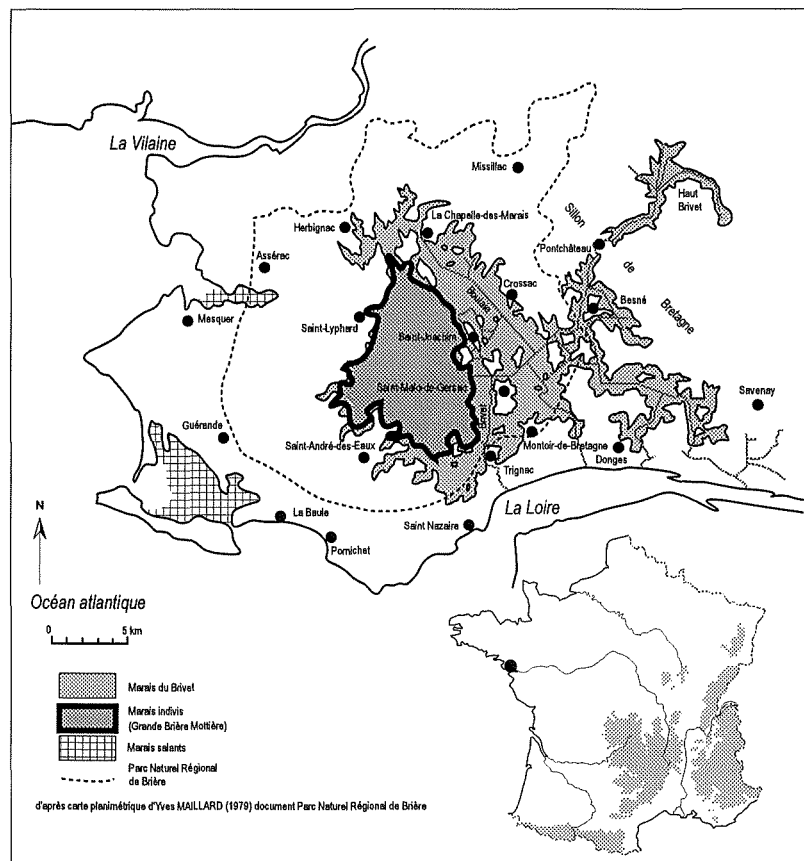
## PRÉSENTATION DES MARAIS DE BRIÈRE

### I Milieu physique

#### 1 Situation géographique

Les marais de Brière sont situés dans le département de la Loire Atlantique, entre les estuaires de la Loire et de la Vilaine (fig. 19). Ils forment un vaste ensemble de terres inondables d'environ 20000 ha drainé par le Brivet qui rejoint la rive droite de l'estuaire de la Loire. Cet ensemble est divisé en plusieurs unités géographiques. D'une part, les marais du Haut-Brivet, représentant 2000 ha, en

Figure 19 : situation générale des marais de Brière (Loire Atlantique - Massif Armoricain)





amont de Pontchâteau, isolés du reste des marais de Brière par un anticlinal, le sillon de Bretagne. La dépression briéronne, d'autre part, peut se diviser en deux selon une ligne qui rejoint la Chapelle-des-Marais et Montoir-de-Bretagne. A l'ouest de cette ligne, les 7000 ha de la Brière Mottière, ou Grande Brière, ont un statut juridique particulier. Ils sont une propriété indivise des habitants des 21 communes adjacentes. Les droits de pêche, de chasse, de coupe du roseau, de pâturage et anciennement de tourbage y sont définis par ces communes et leurs syndicats. Cette partie est la plus inondée des marais de Brière. Les marais privés, plus élevés en altitude sont essentiellement voués à l'élevage bovin. Ils se situent à l'est de la ligne reliant La Chapelle à Montoir. Il s'agit des marais de Donges, de la Boulaie et de Besné (fig. 20).

Les marais de Brière sont séparés de l'estuaire de la Loire par un cordon littoral et alluvial qui s'étend entre Montoir-de-Bretagne et Saint Nazaire. L'industrialisation de cette partie est intense depuis le XIXe siècle. Les chantiers maritimes de l'Atlantique à Saint Nazaire et un terminal méthanier à Montoir sont les installations les plus importantes. Ces aménagements ont contribué à imperméabiliser le cordon. Celui-ci isole actuellement les marais briérons des influences marines directes, ce qui n'est pas le cas de certains marais au sud de Savenay qui subissent des inondations estuariennes et des marais salants de Guérande ou de Mesquer (fig. 19).

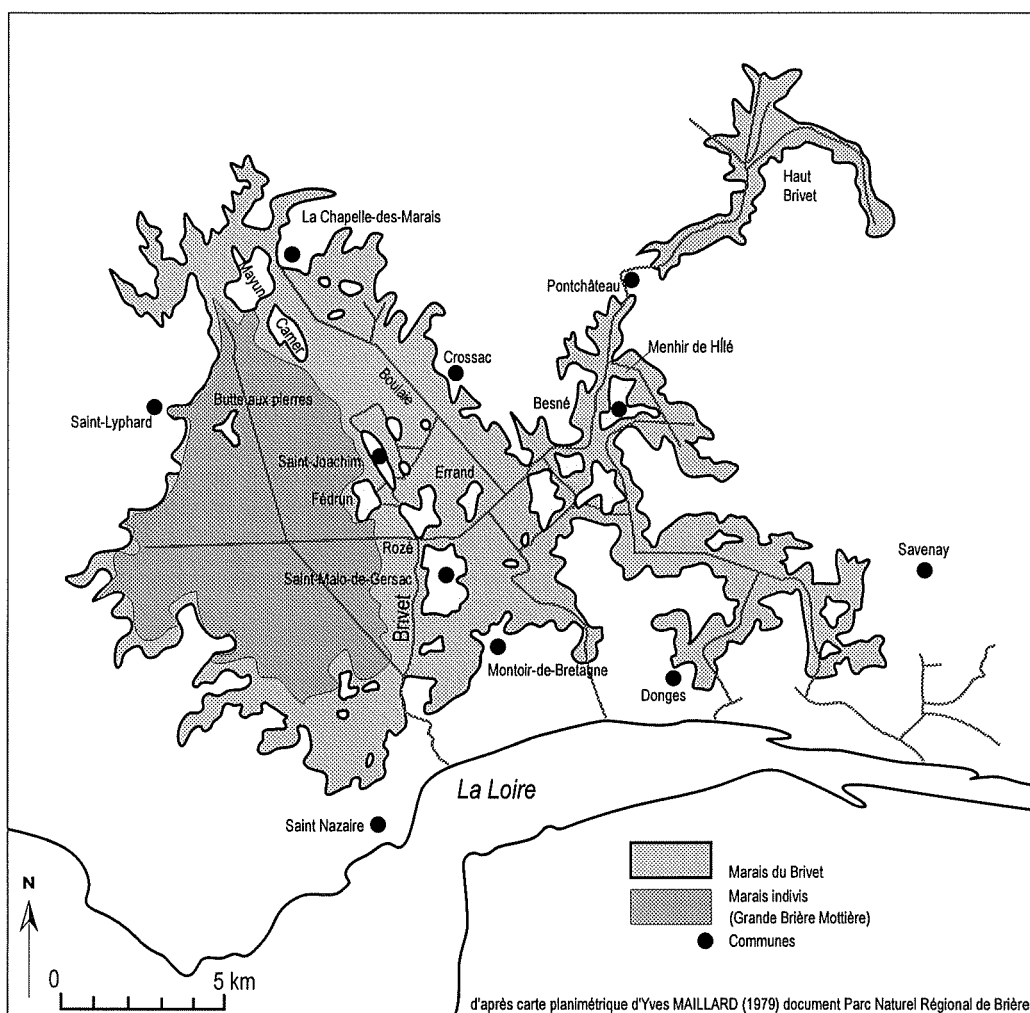


Figure 20 : situation des marais en Brière

## 2 Géologie

Les marais de Brière s'étendent dans une vaste cuvette dont l'origine résulte d'un basculement du secteur compris entre les failles du sillon de Bretagne à l'est et du coteau de

---

Guérande à l'ouest (VISSET 1997). Ces fractures sont orientées nord-ouest sud-est. Le plateau de Guérande, dont l'altitude est proche de 35 m, est constitué de granites alors que le sillon de Bretagne comporte des granulites feuilletées, injectées de quartz et s'élève jusqu'à 60-70 m. Des roches métamorphiques, gneiss et micaschistes sont principalement observées en direction du coteau de Guérande. Ces roches émergent localement du marais constituant ainsi des "îles". Celles-ci constituent un ensemble orienté nord-ouest sud-est, parallèlement au sillon de Bretagne, qui sépare la Grande Brière des marais privés. Les îles de Mayun, de Camer, de Saint Joachim, de Fédrun et de Rozé sont les plus importantes de cette ligne divisant les marais de Montoir à la Chapelle-des-Marais (fig. 20). A l'ouest de la ligne rocheuse, le relief est monotone. De rares îles, comme celle de la Butte-aux-Pierres constituée de granites, émergent du comblement récent. Plus à l'est, en direction de Besné, les marais forment des dendrites pénétrant des formations granitiques et métamorphiques. Les marais du Haut Brivet sont situés à l'est du sillon dans une dépression plus large refermée à Ponchâteau au passage de l'anticlinal. Celle-ci est bordée du nord-ouest au sud-est par des formations sédimentaires secondaires, elles-mêmes localement recouvertes de dépôts alluvionnaires tertiaires. Au sud et à l'ouest, les marais sont au contact des terrains primaires du sillon de Bretagne.

Les sédiments des marais eux-mêmes sont essentiellement des vases argileuses marines résultant de la transgression flandrienne et de la tourbe développée depuis le milieu du Subboréal. Des lambeaux de calcaires du Lutétien et un dépôt sablo-graveleux pouvant être attribué au Pléistocène sont les témoins de dépôts marins antérieurs mais l'érosion des périodes régressives n'a pas permis de conserver de sédiments d'autres époques.

### 3 Régime des eaux

La vaste dépression des marais de Brière présente une très faible pente. L'altitude en Brière est comprise entre 0,4 m et 1 m (BOULET 1992) alors qu'elle atteint 3 m pour le Haut-Brivet. Le régime des eaux est donc davantage lié à la pluviométrie et à l'évapotranspiration qu'aux capacités de ruissellement et de drainage. Le climat atlantique se caractérise par une saisonnalité des précipitations bien observée pour les stations de La Baule, de Montoir ou de Nantes-Bouguenais (cf. Partie 3). Une phase sèche, regroupant le plus souvent l'été et l'automne, est suivie d'une phase humide hivernale et printanière. Le marais présente un régime des eaux qui est très dépendant de ces deux périodes. Les actions de gestion menées par l'union des syndicats du marais du bassin du Brivet sont donc largement guidées par ces deux périodes (MAILLARD et BOULET 1988). Lors de la saison humide, les précipitations sont en moyenne de 600 mm. L'eau s'accumule dans les marais. Bien que les écluses et les vannes opèrent le plus possible des chasses, le marais est inondé. En période sèche, le bilan hydrique climatique est négatif. Le déficit cumulé atteint 340 mm en utilisant l'évapotranspiration de Penman à la station de Montoir (cf. Partie 3). Le marais s'assèche, il se compartimente fortement jusqu'à un étiage qui survient en septembre. Cette compartimentation est d'autant plus importante que les aménagements et surtout l'exploitation de la tourbe sont responsables de variations d'altitude dont l'amplitude atteint le mètre. Les marais en été sont alors constitués d'un tissu très complexe de secteurs élevés en prairie humide, et de "piardes" en eau libre. Ces deux extrêmes sont reliés par de nombreux types de peuplements où dominent toutefois les phragmites. Pour "tenir" cet étiage, les gestionnaires sont parfois amenés à "renflouer" des compartiments du système hydraulique par des "envois de marées" depuis l'estuaire (MAILLARD et BOULET 1988). L'influence des marées affectait le sud du marais via le Brivet avant la mise en place des systèmes de gestion du niveau d'eau (BOULET 1992). Il est probable que cette influence serait aujourd'hui toujours importante sans la gestion et l'imperméabilisation par les constructions industrielles et portuaires le long du cordon littoral de Montoir à Saint Nazaire. L'altitude des marais est

---

en effet nettement inférieure à celle des plus hautes mers situées vers 3 m NGF, (Nivellement Général de la France classiquement utilisé pour les altitudes terrestres). Le niveau du sol, en moyenne de 0,5 m, est même inférieur à l'altitude atteinte par les marées hautes de mortes eaux qui est de 1 m NGF (BOULET 1992).

En conséquence de la forte saisonnalité de précipitations, l'amplitude des variations annuelles du niveau d'eau est considérable. Elle peut être estimée entre 60 et 80 cm dans les enregistrements. Les niveaux extrêmes observés depuis une quarantaine d'années, malgré la gestion, se situent aux cotes de -0,25 m et +1,80 m NGF (BOULET 1992). Les enregistrements ont d'abord été réalisés à Pont de Paille, puis à Ile Fédrun dans de petits canaux. Les marais de Brière subissent donc un cycle annuel du régime des eaux qui peut se résumer par la séquence crue, décrue et étiage. Ce cycle structure fortement la totalité des autres facteurs du milieu comme la pédologie et le peuplement.

## 4 Pédologie

### 4.1 Hydromorphie

Les sols hydromorphes sont liés à des conditions stationnelles particulières (sols azonaux) qui permettent le maintien, au moins une partie de l'année, d'une nappe d'eau qui occupe toute la porosité du sol. Le fait que l'eau soit arrêtée ou ralentie peut être dû à la topographie ou à la nature du substrat. L'origine de l'eau est pluviale ou phréatique.

L'eau sature le sol quand un niveau inférieur, qui peut être profond, présente une imperméabilité ; c'est le cas de la nappe perchée (GAIFFE 1976). L'eau de gravité est, d'une façon plus générale, ralentie ou orientée dans son drainage par des différences de porosité, comme dans le cas des nappes de pentes (DUCHAUFOR 1984). Ces nappes sont souvent pluviales et temporaires. Leur présence dans le sol est en relation avec la pluviométrie et l'évapotranspiration. De l'eau d'origine phréatique peut cependant tamponner les variations climatiques. C'est le cas de sols près de sources à flanc de pente (BAILLY 1992). Quand la situation topographique est favorable (dépressions, vallons) ou dans le cas de nappes alluviales, la saturation du sol est plus permanente. Dans tous les cas, pendant cette période de saturation, la nappe induit des processus pédogénétiques particuliers : l'hydromorphie. Les oxydes de fer ont un important rôle indicateur de ces processus. Des phénomènes d'oxydoréduction provoquent des changements partiels d'état des oxydes de fer. Dans le cas de nappes réductrices, le fer est majoritairement à l'état ferreux, la couleur dominante tend vers le vert. Dans le cas de nappes oxygénées, comme une nappe alluviale courante, le fer est à l'état ferrique, rouille. La couleur des horizons renseigne sur le type de d'hydromorphie. Mais il ne s'agit que d'un élément. Les processus sont diversifiés et touchent à tous les constituants du sol, notamment le manganèse, les argiles donc la structure...

Il faut séparer dans les concepts intensité de l'hydromorphie sur la pédogenèse et contrainte pour le peuplement. Les sols à horizon réduit, les gleys réduits, ont une pédogenèse liée à l'hydromorphie et sont contraignants pour la végétation. Mais en milieu temporairement hydromorphe, la stagnation d'une nappe acide peut provoquer une dégradation des argiles et une dissociation des complexes qu'elles forment avec le fer. C'est le cas des sols lessivés dégradés qui comportent alors un horizon éluvé et un horizon d'accumulation. La pédogenèse est donc très dépendante de l'hydromorphie alors qu'elle n'est que temporaire. Les peuplements relevés sur ces sols en Brie champenoise sont

---

mésophiles (BAILLY 1992). Ils ne présentent donc pas de spécialisation. Dans ce cas, l'hydromorphie n'est pas en elle-même la contrainte majeure. Elle implique la spécialisation des peuplements hygrophiles notamment en fonction de la durée de saturation du sol, de la profondeur de la saturation et du niveau de réduction de la nappe.

#### 4.2 Principaux sols observables en Brière

Les principaux types de sols rencontrés en Brière sont dépendants du niveau d'hydromorphie, principalement phréatique, et de la nature des matériaux superficiels.

##### 4.2.1 Sols hydromorphes tourbeux (histosols)

La chronologie des peuplements végétaux (cf. *infra*) montre que la sédimentation, depuis environ 2800 à 2600 av. J.-C., est tourbeuse dans la plus grande part des marais actuels. Les périodes d'assèchement n'ont jamais été suffisantes pour induire un atterrissement observable en Brière mais la vitesse de développement et la nature de la tourbe varient dans le temps (VISSET et WILLKOMM 1988, VISSET *et al.* 1994). L'épaisseur de la couche atteint en général 2 m. La tourbe est actuellement relativement eutrophe, le pH-eau est voisin de 6 mais présente des variations et peut être seulement de 5 (ANONYME - société d'études techniques PRAUD - 1982) probablement en fonction des apports de crues. Ces apports se traduisent, dans un sondage réalisé par la société d'études techniques PRAUD dans les marais de Donges, par un horizon de surface plus riche en limons fins et argiles. Il n'est cependant jamais observé de calcaire (en surface) comme dans les tourbes du marais Poitevin dont le réseau fluvial traverse des terrains principalement sédimentaires (JAMBU 1971). Les apports en sel sont localisables aux débouchés des canaux assurant les "envois de marée" (MAGNANON 1991) mais sa distribution dans les autres parties du marais est très complexe, probablement fonction de la microtopographie (ANONYME 1982) et de la circulation générale des nappes. La teneur en matière organique est principalement fonction de la durée de la période d'inondation (MAGNANON 1991). Elle peut atteindre 74% alors qu'elle est en moyenne de 37% dans les parties les plus élevées du marais (MAGNANON 1991). Les alternances de périodes d'humidité et de sécheresse, les apports minéraux fluviaux et le pâturage notamment induisent une évolution de la matière organique très variable selon les situations. Le rapport C/N peut varier de 11 à 23 en surface, ce qui reste éloigné des tourbes acides (C/N de 30). Cependant, la minéralisation reste très limitée.

##### 4.2.2 Gleys (Réductisols)

Au sud des marais de Brière, des alluvions fluvio-marines de la Loire donnent naissance à des sols hydromorphes peu organiques aux caractéristiques très variables. L'argile domine souvent ces sols. Elle peut atteindre 60 à 80% de la fraction fine (MAGNANON 1991). La composition granulométrique est cependant assez variable en fonction de la nature des sédiments d'origine. La teneur en sel est également variable selon la composition chimique de la nappe et peut être assez élevée (MAGNANON 1991). Le calcaire est présent à proximité de la Loire (ANONYME 1982). Le fer est principalement à l'état réduit. L'argile grise de surface devient bleue verdâtre avec la profondeur. Des taches d'oxydoréduction sont observables sur la totalité du profil avec des concentrations variables. La structuration massive ne s'améliore qu'en été avec l'abaissement de la nappe.

En bordure de la Loire, ces sols peuvent être localement plus riches en matière

---

organique. Dans les marais du Haut-Brivet où l'assèchement est plus marqué, et où le substrat géologique peut être calcaire, le taux de matière organique de l'horizon de surface varie plus fortement. Des sols argileux ne comportant pas plus de 8% de matière organique peuvent être dits sols hydromorphes peu organiques comme les précédents (ANONYME 1982). Toutefois, ce taux atteignant 16% voire 24% (MAGNANON 1991) place certains d'entre eux parmi des sols hydromorphes moyennement organiques ou réductisols humifères. Le C/N de ces horizons est variable entre 11 et 15. MAGNANON (1991) relie ces différences aux pratiques agricoles, le pâturage induisant le développement d'espèces plus facilement minéralisables que le fauchage. L'hydromorphie reste très présente et les tâches d'oxydoréduction sont observées dès les premiers centimètres. Les sols apparaissent cependant plus structurés. Du calcaire actif est noté parfois dès 50 cm de profondeur (ANONYME 1982). L'extension du niveau d'argile marine est attestée par les sondages palynologiques (VISSET et WILLKOMM 1988) et par ceux que nous avons réalisés jusqu'au marais de la Crôle, dans la partie aval des marais du Haut-Brivet. La différence de pédogenèse notée en amont de ce marais (ANONYME 1982) s'explique peut-être par l'absence ou la forte réduction de puissance du niveau marin et par la formation des sols à partir du substrat calcaire.

#### 4.2.3 Origine des matériaux

Des sols dits "intermédiaires" ont été décrits (société d'études techniques PRAUD). Ils sont constitués d'horizons très différents dont les caractéristiques pédologiques les rapprochent de chacun des types précédents. Des sols à horizon argileux sur horizon tourbeux, ou histosols recouverts, et inversement, des sols à horizon tourbeux sur horizon argileux, sont représentés. Il est possible que le développement de ces sols soit lié à l'histoire de la sédimentation dans la cuvette briéronne (ANONYME 1982, MAGNANON 1991) (fig. 21).

L'argile marine, au sud de la Grande-Brière, recouvre la tourbe suite à une transgression marine que les études polliniques et les dates  $^{14}\text{C}$  peuvent situer au début de notre ère (cf. *infra*). L'âge de ce sédiment implique que les processus pédogénétiques sont peu avancés, ce qui permet de bien identifier la double origine des matériaux.

En marge de la dépression et en direction des îles, la couche de tourbe va en s'amenuisant. La pédogenèse intéresse alors également le matériau sous-jacent. La tourbification a débuté de façon générale vers 2800-2600 av. J.-C. (cf. *infra*). En bordure, l'édification a pu être très irrégulière, selon les périodes, en fonction du niveau d'eau. Près des îles, un apport terrigène par la surface s'ajoute aux éventuels dépôts de crues et le dépôt marin, sous la tourbe, peut être très sableux. Le premier horizon du sol est alors riche en matière organique, 54% proche d'Ile d'Errand (profil 23, ANONYME 1982) mais parfois moins, 35% à Besné (profil 4, ANONYME 1982). Il est en plus constitué d'une forte quantité d'argile (30% à Ile d'Errand et 37% à Besné), de limons fins (22% à Besné), ou de sables grossiers (4% à Ile d'Errand) et de graviers supérieurs à 2 mm. Ce matériau tourbeux subit de nombreuses alternances dessiccation humidification. L'inondation hivernale en moyenne le recouvre. Il subit également les plus longues périodes d'arrêt de tourbification quand le niveau baisse de façon générale. La matière organique est donc assez évoluée. Le C/N à Ile d'Errand est de 15 et de 16 à Besné (ANONYME 1982). Les fractions minérale et organique semblent alors très intimement liées. C'est particulièrement le cas vers les îles, où les jeunes peuplements forestiers se développent. Les sols sont complexes, constitués de niveaux organominéraux, soit de colluvionnement, soit d'apports marins où s'intercale le développement tourbeux qui comporte une importante fraction minérale (cf. Partie 3).

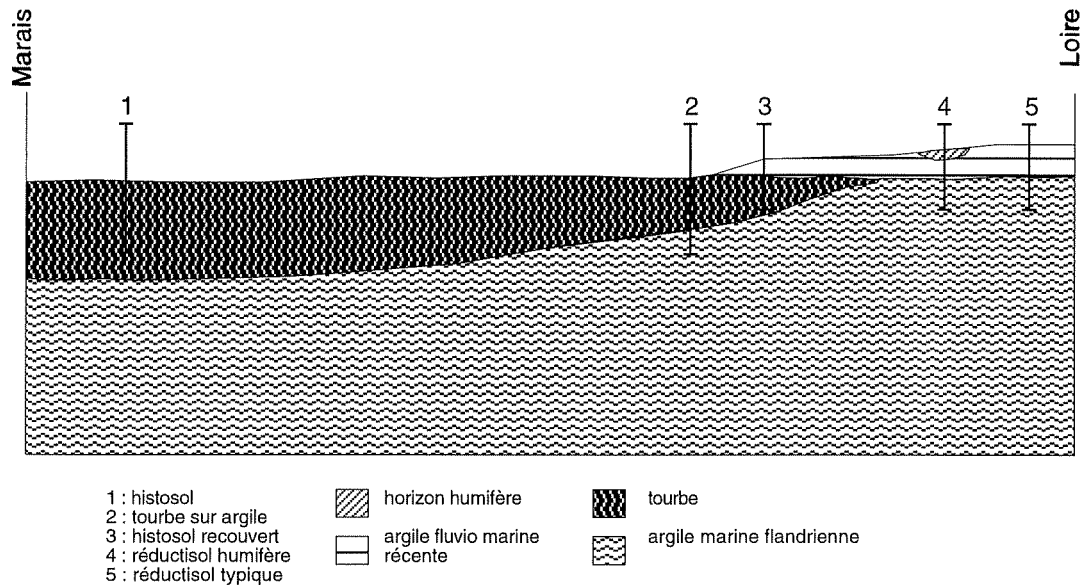


Figure 21 : stratigraphie schématique des formations superficielles

#### 4.2.4 Sols sur l'île

Nous avons pu observer deux sols sur l'île de Camer. Ils se développent sur des roches pyroclastiques et présentent des caractéristiques de sols bruns. Des éléments grossiers sont assez abondants tout au long des profils. Leur base est plus riche en argile mais il n'a pas été observé d'horizon éluvé. La profondeur reste limitée (inférieure à 120 cm). L'inondation hivernale n'atteint leur altitude que dans les années exceptionnelles. Par contre, les figures d'hydromorphie sont très nettes dès 60 cm. Le fer est principalement oxydé et forme un pseudogley lié au séjour temporaire de la nappe.

## II Végétation

### 1 Marais actuel

Les communautés végétales des marais de Brière ont fait l'objet de beaucoup d'études (GADECEAU 1923, DUPONT 1972, CLEMENT *et al.* 1982 *in* MAGNANON 1991), et ont été analysées lors de l'élaboration de la systématique des prairies hygrophiles atlantiques par FOUCAULT (1986). Les peuplements en marge du marais, qui ont des caractéristiques plus communes pour la région, n'ont pas été étudiés spécifiquement.

Les marais de Brière sont en effet un vaste ensemble où de très nombreuses communautés, depuis les groupements aquatiques aux prairies mésophiles, sont décrits. Des espèces rares et protégées sont également présentes (MAGNANON 1991).

L'étude de MAGNANON (1991) montre que le niveau d'eau, et plus particulièrement la durée d'inondation, le pourcentage de matière organique dans le sol mais

---

également les activités agricoles, le pâturage et la fauche sont les facteurs principaux structurant les formations du marais. Vers le sud, l'influence des dépôts historiques de vases de marée, ou les apports d'eau de l'estuaire, peuvent induire un taux élevé en sel. Cependant, la régulation hydraulique et l'imperméabilisation du bourrelet alluvial de Trignac a tendance à faire disparaître cette influence.

Les groupements principaux sont dominés par les héliophytes : *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea* et *Typha angustifolia*. *Carex elata* ou *Scirpus lacustris* peuvent être très abondants. Dans les parties où le sel est encore présent, des prairies subhalophiles à *Juncus gerardi*, *Triglochin maritima*, *Sonchus maritimus* voire *Scirpus maritimus* se développent. Quand le pâturage est plus intense, particulièrement dans le marais privé, qui a fait l'objet d'essais d'assèchements, les roseaux sont moins abondants et les prairies humides comportent *Agrostis stolonifera* et *Alopecurus geniculatus*. En direction des bordures *Salix atrocinerea* devient plus important et les peuplements contiennent *Myrica gale*, *Molinia caerulea*.

## 2 Forêts actuelles

Dans la dépression briéronne, il n'existe plus de véritables formations forestières. Des zones sont actuellement en cours de boisement à partir d'anciennes haies (cf. Partie 3). Les chênes pédonculés constituent avec *Frangula alnus*, *Fraxinus excelsior* ainsi que *Populus sp.*, un peuplement qui se développe jusqu'au contact des saulaies. *Salix atrocinerea*, présent également dans les haies, est observé mort dans les formations fermées. Les bosquets sont très dépendants de l'activité agricole. Leur développement rapide montre nettement que les marges du marais seraient beaucoup plus boisées si la pression anthropique diminuait.

## 3 Palynologie : évolution des peuplements anciens

### 3.1 Zonations polliniques régionales

Les études palynologiques de synthèse réalisées au niveau d'ensembles biogéographiques vastes, comme le Massif Armoricaire, l'Arc Alpin ou le Jura, permettent d'observer l'évolution générale des peuplements au cours du Tardiglaciaire et de l'Holocène. Ces analyses ont abouti à définir des chronozones, pour lesquelles les variations d'abondance des grains de pollen de certains taxons sont typiques d'une période. Globalement, ces chronozones se correspondent entre les régions, et permettent notamment de retracer l'évolution de la végétation postérieure à la glaciation du Würm pour la zone d'Europe némorale. Toutefois, l'évolution des peuplements après la glaciation est assez variable entre région, car la migration depuis les zones refuges des espèces n'est pas synchrone (RUFFALDI 1993). Il est donc plus délicat d'utiliser les cortèges polliniques, observés pour une région, pour définir des chronozones à l'Holocène qu'à des périodes plus froides comme le Tardiglaciaire.

Les études palynologiques menées en Brière montrent que l'évolution des peuplements peut être rattachée à celle décrite pour le Massif Armoricaire (VISSET 1979). Les chronozones de référence utilisées pour les peuplements briérons sont donc celles établies par MORZADEC-KERFOURN (1974) grâce à l'analyse de 33 sites du littoral armoricaire. Elle construit, sur l'observation des variations de l'abondance des grains de pollen surtout arboréens, une zonation pollinique proche de celle que GODWIN (1940) décrit pour l'Angleterre et le Pays de Galles. Des datations radiocarbone associées à ces variations permettent de les situer dans le temps. Elles impliquent des décalages par rapport aux

chronozones proposées par GODWIN. La zonation pollinique obtenue présente également des différences avec celle établie par MANGERUD (*et al.* 1974) pour le Norden (Allemagne du nord), utilisée de façon plus générale en Europe du Nord et proche de celle proposée par FIRBAS (1949) pour l'Europe moyenne. Les zonations construites dans l'est de la France, dans le Jura (RUFFALDI 1993), en Lorraine et dans le Bassin Parisien (LE ROYER 1997) correspondent également à celles de ces régions. L'originalité des chronozones armoricaines repose essentiellement dans la datation des limites entre les chronozones : Atlantique, Subboréal et Subatlantique.

Pour comparer les zonations polliniques régionales et les utiliser dans le cadre d'une analyse dendrochronologique, il est indispensable de calibrer les datations radiocarbone. Il est par ailleurs toujours plus exact de représenter le temps de façon linéaire après calibration des dates. En effet, les représentations en datations conventionnelles présentent une distorsion des durées nettement plus importante.

temps (années)	chronozones Massif Armoricaïn (Morzadec-Kerfourn 1974)	chronozones utilisées dans l'est de la France (d'après Mangerud 1974)
2000	dates $\pm 5$ BP [calibration 2 $\sigma$ ]	dates $\pm 5$ BP [calibration 2 $\sigma$ ]
1000	SUBATLANTIQUE	SUBATLANTIQUE
1		
-1000	[1304-1131] cal.BC	2700 [841-815] cal.BC
-2000	3000 transition [2018-1885] cal.BC	SUBBOREAL
-3000	3600 SUBBOREAL	
-4000	[4578-4467] cal.BC	4700 ATLANTIQUE récent
-5000	5700 ATLANTIQUE	6000 [4921-4842] cal.BC
-6000	[6611-6503] cal.BC	ATLANTIQUE ancien
-7000	7800 BOREAL	[7033-6725] cal.BC
-8000	9000 [8053-7977] cal.BC	8000 BOREAL
		9000 [8053-7977] cal.BC

Même si des sites de références existent, comme celui de Redon pour le Massif Armoricaïn (MORZADEC-KERFOURN 1974), les chronozones sont généralement définies après l'étude de nombreux carottages. Des "corrélations" des cortèges floristiques sont donc indispensables pour les associer. Les datations radiocarbone attribuées à une chronozone représentent, au mieux, les variations des courbes polliniques typiques de cette zone. Mais la datation ne correspond pas nécessairement à une limite de chronozone. La zonation pollinique régionale est donc le résultat de l'interprétation d'un ensemble vaste de données. Par conséquent, pour calibrer les dates associées aux chronozones, il n'est pas possible de disposer d'une date particulière ou d'un ensemble estimant cette limite. La limite proposée, en date conventionnelle, à la suite de cette interprétation, a donc été calibrée en lui attribuant

Figure 22 : Chronozones utilisées dans le Massif Armoricaïn et dans l'est de la France



---

une déviation faible ( $\pm 5$  ans). Elle a été choisie car le but principal est de rendre linéaire le temps. L'erreur de position de la limite est beaucoup plus complexe à estimer du fait de ce fort niveau d'interprétation.

La figure 22 présente les deux zonations polliniques utilisées en France après calibration des limites de chronozones. Les différences les plus importantes concernent les transitions entre l'Atlantique et le Subboréal ainsi qu'entre le Subboréal et le Subatlantique. Dans le Massif Armoricain, les auteurs soulignent la difficulté de situer ces limites car les taxons classiquement reconnus sont peu abondants (MORZADEC-KERFOURN 1974, VISSET 1979, MARGUERIE 1992).

Pour la zonation armoricaine, *Betula*, *Pinus* et *Corylus* dominent le Boréal. *Quercus* devient de plus en plus important sur la fin de la période. *Betula* et *Pinus* sont fortement diminués après [6611-6503] cal. BC. Après cette date, *Alnus* et *Tilia* se développent avec *Quercus*, marquant ainsi l'Atlantique. *Ulmus* reste rare, ce qui rend difficile à percevoir la diminution de ce taxon, classiquement attribuée au Subboréal (MORZADEC-KERFOURN 1974). La limite Atlantique-Subboréal est plus marquée par un développement d'*Alnus* et un déclin de *Quercus* (VISSET 1979). MORZADEC-KERFOURN note également une diminution de *Corylus*. Elle date cette évolution entre 5700 BP et 5500 BP soit entre [4578-4467] cal. BC et [4370-4340] cal. BC. La végétation conserve ces caractéristiques jusque vers [2018-1885] cal. BC où débute la transition entre le Subboréal et le Subatlantique. Cette transition est particulièrement longue et le Subatlantique typique n'est observé qu'à partir de [1304-1131] cal. BC. Pendant cette période, MORZADEC-KERFOURN observe une diminution d'*Alnus* et de *Tilia*. La disparition de *Tilia* et le développement de *Fagus* et de *Quercus* ne sont marqués qu'après [1304-1131] cal. BC. *Carpinus* reste très rare. La limite entre le Subboréal et le Subatlantique pose des problèmes de définition et sa manifestation principale est la diminution d'*Alnus*, avec les disparitions de *Tilia* et de *Ulmus* associées à la continuation du développement de *Fagus* (VISSET 1979).

### 3.2 Végétation de la cuvette et environnante

Les études palynologiques de synthèse réalisées par L. VISSET sont basées sur une quinzaine de sondages en Brière et permettent de retracer l'histoire des peuplements végétaux de la cuvette et des environs depuis la fin du Boréal (VISSET 1979, 1982). Cette évolution est présentée dans la figure 23. Les chronozones utilisées sont celles établies par MORZADEC-KERFOURN (1974). Les datations  $^{14}\text{C}$  réalisées sont regroupées dans les tableaux 11 et 12 et les conditions de calibration sont décrites au paragraphe 5.

#### 3.2.1 Fin du Boréal

La profondeur du substratum rocheux est très variable en divers points de la Grande Brière. Il est observé à -17 m et au delà de -20 m NGF dans les sondages du Canal des Fougères et des Quatre Canaux alors qu'il apparaît entre -3 m et -4 m NGF sur les sites de Rosé, de Camer ou du Menhir de Hélé (VISSET 1979). Ces derniers sites sont plus proches des îles qui atteignent une altitude comprise entre 5 et 10 m NGF. Il existe donc un paléo-relief en Brière, constitué de vallées dont la profondeur peut atteindre 35 m (VISSET 1990). Au Boréal, ces vallées ne sont pas comblées et la mer les pénètre. Elles ne sont pas marécageuses et la végétation enregistrée par les pollens dans le dépôt d'argile marine est comparable à celle de la région. Elle est constituée de *Corylus* qui domine *Quercus* associés à *Pinus*, *Betula* et *Ulmus* bien développé, ainsi que *Tilia*, *Acer*, *Salix* et *Carpinus* qui reste rare (VISSET et VOELTZEL 1996).

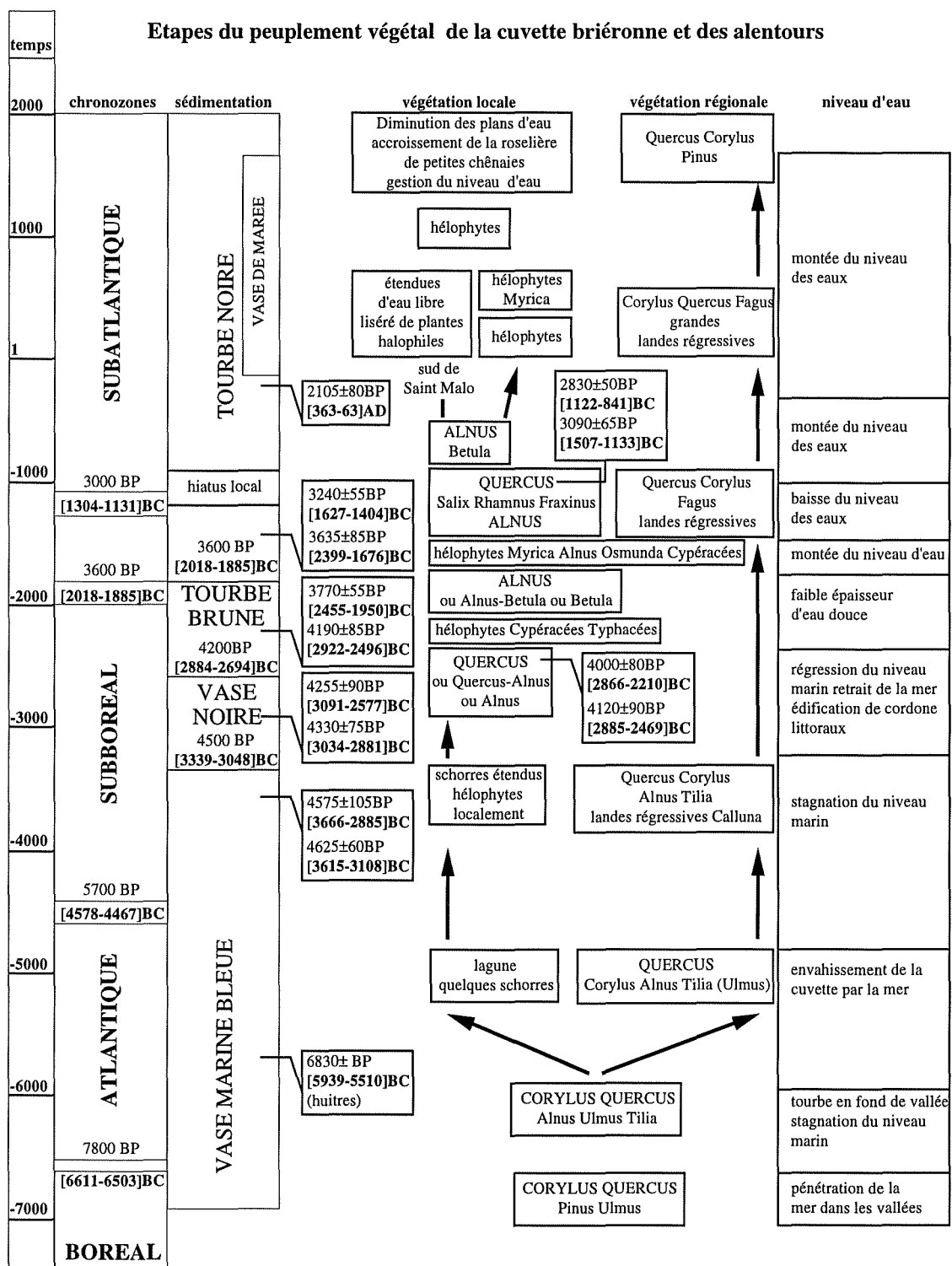


Figure 23 : étapes du peuplement végétal de la cuvette briéronne et des alentours d'après des données de L. VISSET (1979, 1982, 1988, et VOELTZEL 1996, et al. 1994)

### 3.2.2 Atlantique

Pour l'Atlantique, jusque vers 7000 BP, soit [5940-5766] cal. BC, la végétation montre peu de différences avec le Boréal. *Tilia* et *Ulmus* se développent et le peuplement évolue vers une chênaie mixte où *Alnus* est présent. A partir de cette date jusque vers 5700 BP, soit [4578-4467] cal. BC, *Quercus* devient dominant. Il est toujours associé à *Corylus* et à *Alnus*. *Ulmus* décroît alors que *Tilia* est nettement présent. *Betula*, *Fraxinus*, *Acer* et *Carpinus* sont observés.

---

La flore herbacée reste rare. La cuvette briéronne devait être assez librement occupée par la mer. Les reliefs ont progressivement été ennoyés par suite de la transgression. Les espèces de schorres sont peu perceptibles. Elles devaient se développer le long des îles et des voies d'accès à la mer.

### 3.2.3 Subboréal

Au Subboréal, *Quercus* régresse ainsi que *Tilia* et *Ulmus* alors qu'*Alnus* augmente et que *Carpinus* est observé. La baisse d'*Ulmus* est peut-être liée à une action anthropique signalée par l'augmentation de *Calluna* et de *Corylus*. D'une façon générale dans la cuvette, vers 4500 BP, soit [3339-3048] cal. BC, la sédimentation marine est interrompue par le développement d'une vase organique noire. Le sommet du dépôt d'argile marine bleue, localement organique à Ile d'Errand, est daté de 4575 ±105 BP, [3666-2885] cal. BC (VISSET 1982) et la vase noire est datée de 4255 ±90 BP, [3091-2577] cal. BC au Canal des Fougères (VISSET 1979). La cuvette enregistre alors moins la pluie pollinique régionale. Les espèces locales dominant le cortège. Les schorres prennent une extension très importante signalée par une forte augmentation des pollens d'espèces halophiles dans tous les diagrammes. La Brière peut être représentée par une immense étendue d'eau salée peu profonde où la sédimentation probablement ralentie contribue à former les schorres couverts par *Statice*, *Armeria*, *Plantago maritima* et des composées tubuliflores de type *Aster* (VISSET 1979). Certaines zones isolées par des cordons littoraux se soustraient de l'influence de la mer et sont peuplées d'hélophytes. Le développement de ces formations peut être mis en rapport avec une régression du niveau marin qui débute vers [3339-3048] cal. BC. Ce mouvement est également reconnu au niveau régional (MORZADEC-KERFOURN 1974). Par comparaison avec des peuplements actuels, il est permis de penser que le niveau des plus hautes mers se situait 4 m en dessous de plus hautes mers actuelles (-4m PHM) (VISSET 1982).

Après [3339-3048] cal. BC, une diminution rapide des pollens des espèces de schorres est observée. Le biseau salé régresse fortement et des cordons littoraux isolent la cuvette briéronne de la mer. La végétation devient principalement dépendante de la variation du niveau d'eau douce. En fonction de l'humidité des milieux, des plantes hygrophiles telles les hélophytes (Sparganiacées, Typhacées, Cypéracées) ou des peuplements arborés d'*Alnus* et de *Salix* se développent. La courbe de pollen et les troncs subfossiles indiquent qu'une futaie de Chêne parvient à s'installer sur les sols dessalés les moins humides. La régression est à son maximum. La première génération de chênes peut se développer entre 4200 BP [2885-2667] cal. BC et 4000 BP [2575-2461] cal. BC. Cette estimation est basée sur 5 datations 14C (arbre génération 1 tab. 11 et 12) réalisées sur du matériel provenant principalement des canaux de Rozé, des Fougères et proche de l'Ile de Fédrun.

Après cette période, le niveau d'eau douce augmente de façon générale dans la cuvette toujours isolée de l'influence marine directe. La chênaie est remplacée par un marais à *Typha* et à Cypéracées.

Le développement d'*Alnus* et de *Betula*, en concordance avec une diminution des pollens d'hélophytes, traduit une nouvelle baisse du niveau d'eau. La sédimentation est alors constituée de tourbe brune fibreuse dont la formation débute avant 4190 ±85 BP [2922-2496] cal. BC à Ile d'Errand (VISSET 1982). *Alnus* et *Betula* sont accompagnés de fougères dont *Osmunda regalis* et de *Salix*. Les parties les plus sèches sont dominées par *Betula*. Cette évolution est identifiée dans tous les sondages réalisés ce qui indique que la cuvette entière peut être jugée boisée de ce taillis humide jusque vers une date estimée à 3600 BP, [2018-1885] cal. BC. (VISSET et VOELTZEL 1996). Cette formation est probablement proche d'un "alder-carr", ou tourbière boisée, décrit dans beaucoup de régions d'Europe du nord-ouest où les marais maritimes, mais également continentaux (fenland), ont une grande extension, comme

---

dans les îles britanniques (PILCHER 1990), en Hollande et au nord de l'Allemagne (Basse Saxe) (LEUSCHNER 1992).

### 3.2.4 Subatlantique

Après [2018-1885] cal. BC *Alnus* et *Betula* voient leur courbe diminuer, d'une façon générale. Avec une grande diversité en fonction des localités, les Poacées, les Cypéracées et les Sparganiacées se développent de nouveau ainsi que localement *Myrica gale*. La sédimentation tourbeuse devient noire. Le développement de cet horizon est daté de 3635 ±55 BP [2139-1786] cal. BC à Ile d'Errand (VISSET *et al.* 1994). La formation de cette tourbe semble rapide jusque vers 1400 av. J.-C. (date dendro). Cette évolution signe une augmentation générale du niveau d'eau douce qui semble de courte durée. A Ile d'Errand, après [2139-1786] cal. BC, *Alnus* décline progressivement d'abord au profit de *Betula*, de *Salix*, de *Rhamnus* et de *Corylus* jusque vers 1400 av. J.-C. indiquant ainsi une baisse du niveau d'eau.

La régression atteint un maximum et le développement de la seconde génération de Chêne est possible à Ile d'Errand. L'étude dendrochronologique des troncs subfossiles réalisée ici permet de montrer que le peuplement a pu durer 400 à 500 années pendant lesquelles la sédimentation est arrêtée. L'augmentation de pollen des chênes n'est donc pas enregistrée dans la tourbe concomitante des troncs (VISSET *et al.* 1994). L'extension dans le marais de la chênaie est par conséquent difficile à déterminer.

Avant 2625 ± 80 BP, [914-529] cal. BC et déjà à la fin du peuplement de Chêne vers -1150 (cf. partie 4), le niveau d'eau remonte. La croissance des chênes est très affectée puis la végétation redevient plus hygrophile. Le niveau d'eau douce, bas en Brière, peut être mis en rapport avec des événements régressifs notés dans les marais de Dol (MORZADEC-KERFOURN 1974) et dans diverses régions vers 3000 BP, (cf. partie 4) (FAIRBRIDGE 1961, SHENNAN 1986). La reprise de la transgression marine jusque vers 2500 BP est également observée sur la base de données sédimentaires et archéologiques pour le secteur de la Basse Loire par PRIGENT (1977). L'étude dendrochronologique menée ici permet de bien préciser la chronologie de la transition d'un événement régressif à la remontée du niveau d'eau dans le marais (cf. partie 4).

Après 2105 ±80 BP, [363-63] cal. AD, au Canal des Fougères, un dépôt de vase marine est observé. D'une façon plus générale, le sud de la Brière est inondé par de l'eau saumâtre. Ce dépôt de vase marine implique des étendues d'eau libre bordées de végétation halophile. Les pollens de Chénopodiacées sont observés mais restent rares signalant que ces espèces restent limitées aux bords de la Loire. Un pic des pollens des Composées liguliflores est daté de 1240 ±80 BP, [603-1025] cal. AD à Ile d'Errand que la vase marine n'atteint cependant pas (VISSET 1982). Dans les parties plus septentrionales de la Brière, dont Ile d'Errand, l'aulnaie diminue, remplacée par des Cypéracées puis par des Poacées. A la date de [603-1025] cal. AD, la phragmitaie actuelle domine le marais et l'aulnaie a disparu. *Myrica gale* est localement abondant.

Cette description générale de la végétation est à nuancer pour chaque point de sondage. Elle essaie de retracer l'évolution globale des formations dominantes de la cuvette briéronne. Toutefois, le peuplement est, à toutes les époques, une mosaïque. Des communautés halophiles, hygrophiles ou des formations arborées de taillis humides à Aulne ou moins dépendantes du niveau de nappe à Chêne, coexistent. Les marais de Brière sont moins ouverts sur la façade maritime que ceux de Fenland (Royaume-Uni) dont SHENNAN (1986) fait une description théorique (fig. 24), mais on peut admettre que les variations du

niveau d'eau marine, puis celui d'eau douce, affectent une séquence de communautés végétales rendue très complexe par des variations de milieu. Le micro-relief et le paléo-relief

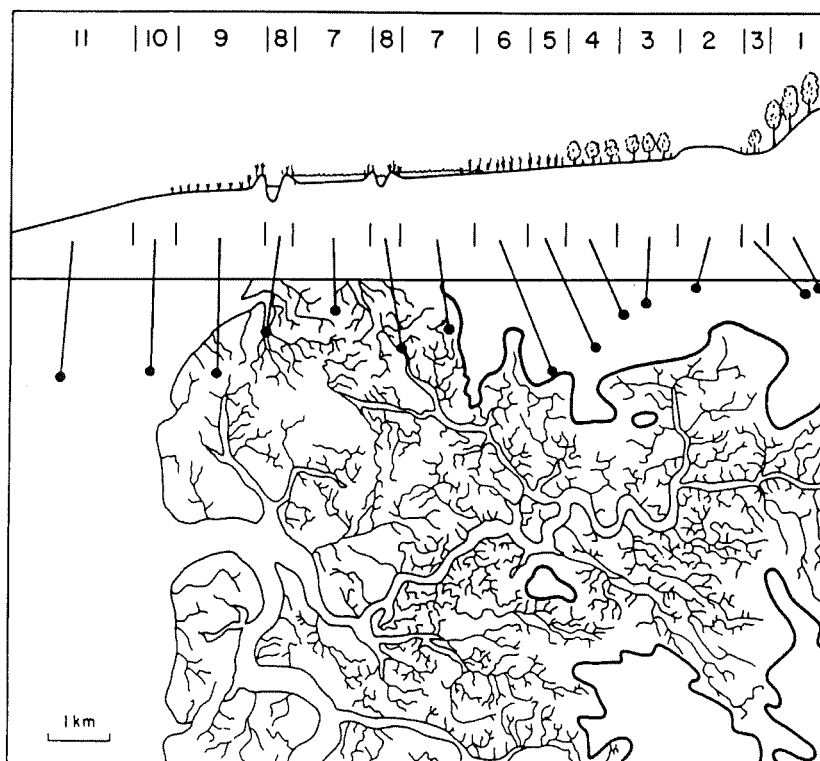


Figure 24 schématisation théorique d'un marais maritime (Fenland) (SHENNAN 1986).

semblent en effet encore conditionner la circulation générale de l'eau aussi bien venant de l'estuaire que s'évacuant par le Brivet et ainsi déterminer la dépendance vis-à-vis de l'hydromorphie des peuplements. L'estimation de l'extension dans le marais d'une formation est basée sur l'observation de caractéristiques communes aux divers diagrammes polliniques, mais reste en général délicate.

#### 4 Datations radiocarbone en Brière

##### 4.1 Stratigraphie de A. VINCE (1965)

Les premières datations radiocarbone en Brière ont été réalisées par le laboratoire de Saclay en 1957, à l'orée de la mise au point de la méthode, lors d'une étude chronostratigraphique menée sous la direction de A. VINCE (1965) à la jonction du canal de

sites	prof.	NGF	matériel daté	référence	date BP	date cal.BC
Rozé I	50	0,1	tourbe noire partie sup.	Sa 43	2770± 300	-
Rozé I	120	-0,6	ecorces entre t. brune et noire	Sa 53	4110± 300	-
Rozé I	160	-1	vase noire	Sa 41	4480± 300	-
Rozé I	170	-1,1	branche incluse dans la vase bleue	Sa 39	4630± 300	-
Rozé I	-	-	arbre génération 1 Quercus incliné	Sa 40	3880± 300	-
Marais de l'Isle	-	-	arbre génération 1	Sa 35	4040± 300	-
Fédrun	150	-	arbre génération 1 souche	Sa 46	4260± 300	-
Rozé II	130	-0,7	arbre génération 1	Ny 544	4100± 90	[2890-2455]
Rozé II	100	-0,4	branches Betula entre t. brune et noire	Ny 545	3335± 90	[1873-1418]

Tableau 11 : datations radiocarbone VINCE 1965, VISSET 1979

Rozé et du Brivet. Les écarts types très élevés (tab. 11) sont à rapprocher des conditions techniques de mesure de la teneur en  $^{14}\text{C}$  des échantillons. Du fait de ces valeurs, les dates conventionnelles ne peuvent pas être calibrées sur la courbe dendrochronologique. La fourchette produite approcherait 1000 ans. D'une part, la calibration est réalisée en considérant deux fois l'écart-type, c'est-à-dire ici environ 600 ans, et d'autre part cette courbe induit souvent une augmentation de la fourchette d'erreur, particulièrement si celle-ci est grande au départ. Cet effet est lié à la pente de la courbe de calibration qui, sur une longue période, est inférieure à celle de la bissectrice théorique liant les dates dendrochronologiques et conventionnelles. La date  $3880 \pm 300$  BP produirait le résultat [2870-1889] cal. BC. Ceci n'empêche aucunement l'interprétation des dates conventionnelles mais L. VISSET fait remarquer plusieurs difficultés lors de la comparaison de ces dates à celles obtenues plus récemment avec des écarts types plus faibles (VISSET 1979). Une déviation d'environ 80 à 100 ans permet une calibration.

L'étude stratigraphique de A. VINCE présente les principales caractéristiques sédimentaires observées dans toute la cuvette briéronne. Elle a servi de séquence type pour les études postérieures mais celles-ci montrent des divergences révélées par la précision des dates et la diversité des milieux étudiés. La vase marine bleue est interrompue par une vase organique datée de  $4480 \pm 300$  BP puis la tourbe brune (ici nommée jaune) apparaît. Un lit d'écorce sépare cette couche d'un niveau de tourbe plus pâteuse et noire. Ce lit est daté de  $4110 \pm 300$  BP. Celui-ci n'est pas observé dans toutes les coupes et d'autres niveaux d'écorces ont été notés inclus dans la tourbe noire, comme à Ile d'Errand (VISSET 1982). La datation proposée pour la transition de la tourbe brune à la tourbe noire paraît ancienne par rapport aux dates réalisées ensuite. Cette date est en fait proche de  $3770 \pm 90$  BP obtenue au Canal des Fougères compte tenue que 20 cm de tourbe ont été nécessaires et de l'écart type élevé de la mesure de la teneur en  $^{14}\text{C}$  (VISSET 1979). La formation de cette tourbe noire est interrompue par un niveau plus argileux qui indique que les incursions marines ont repris et ont atteint Rozé. Le sommet de la tourbe noire est daté de  $2770 \pm 300$  BP mais un prélèvement plus fin a livré  $2105 \pm 80$  BP au Canal des Fougères.

Plusieurs dates sont réalisées sur des mortas provenant de trois points différents de la Brière (tab. 11). Elles montrent que les arbres sont relativement contemporains entre  $4260 \pm 300$  BP et  $3880 \pm 300$  BP. Elles permettent de situer la première forêt de chênes au Subboréal (VINCE 1965). La date de  $3880 \pm 300$  BP, en dehors de l'imprécision liée à l'écart type, est plus récente que celles réalisées depuis mais l'arbre daté est retrouvé

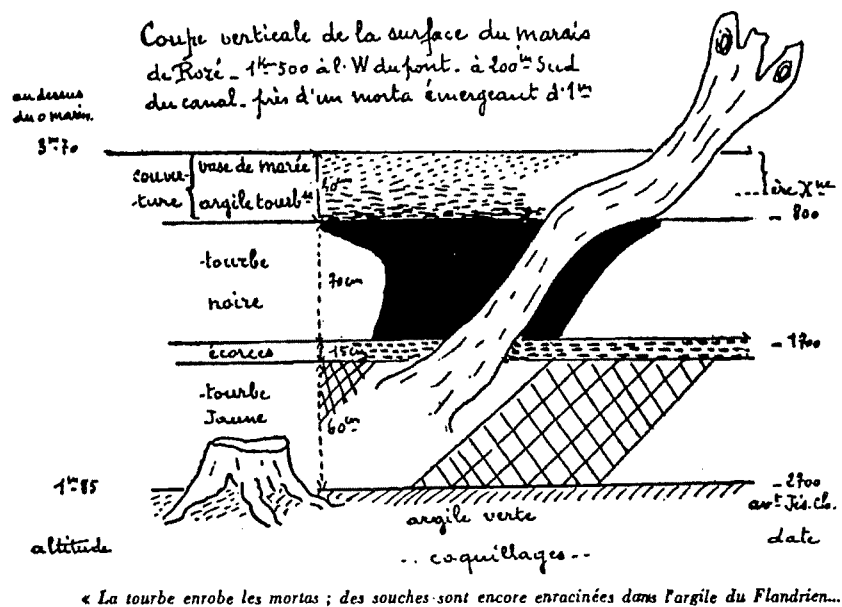


Figure 25 : stratigraphie au canal de Rozé (VINCE 1965)

dans une situation stratigraphique particulière, incliné dans la tourbe (VINCE 1965) (fig. 25). Pour que celui-ci se soit conservé dans ces conditions, il faut admettre que le niveau de tourbe s'est élevé très rapidement. En effet, la matière organique du tronc à l'air libre est minéralisée tout au plus en quelques dizaines d'années. Les souches observées enracinées par A. VINCE,

L. VISSET et moi-même ne font que quelques 20 à 30 cm de hauteur. Celles observées à Ile d'Errand (cf. partie 4) montraient les départs du collet, des racines traçantes et de petits pivots mais le tronc a été décomposé. De même beaucoup de troncs couchés sont très érodés sur leur face supérieure plus exposée lors de la sédimentation et lors des assèchements du marais. Il est classiquement admis que la conservation des troncs de Chêne nécessite la reprise de la tourbification (LEUSCHNER *et al.* 1987). Il est donc peu probable que le tronc ainsi incliné soit dans la situation qui a permis sa conservation.

A l'opposé, la date 4630 ±300 BP est plus ancienne que celles obtenues plus récemment sur les mortas de la première génération. Mais le fragment daté n'est en fait pas décrit comme appartenant à un arbre et a été découvert inclus dans la vase marine sous le niveau de tourbe (VINCE 1965). Il peut donc stratigraphiquement être antérieur aux arbres installés sur la vase marine. Cette date coïncide par ailleurs avec celles obtenues pour le sommet de la vase marine bleue, partiellement organique à Ile d'Errand (4575 ±105 BP et 4625 ±60 BP) (VISSET 1982).

Le relevé stratigraphique de A. VINCE a été complété par trois sondages palynologiques réalisés par L. VISSET sur le même site et deux nouvelles datations (VISSET 1979). La datation d'un morta, 4100 ±90 BP, démontre bien que la forêt de Chêne à Rozé est contemporaine de celle observée dans les divers points de la Brière. Par contre, la datation d'un niveau de branches de Bouleau de 3335 ±90 BP apparaît un peu rajeunie, par la présence de rhizomes de phragmites vivants, pour situer la limite entre les deux tourbes (VISSET 1979).

#### 4.2 Généralisation spatiale de L.VISSET

Toutes les datations disponibles, avec un écart-type qui autorise la calibration,

site	Prof.	NGF	matériel daté	taxons dominants	référence	date BP	date BC	A	B
Quatre canaux	1615	-15,55	huître, vase bleue	Quercus-Corylus-Ulmus-Tilia-Alnus	Ny 474	6830±100	[5939-5510]	5724	215
Ile d'Errand II	165	-0,85	vase bleue organique	Zone 2 Chénopodiacées		4830±75	[3774-3378]	3576	198
Ile d'Errand II	160	-0,8	vase bleue organique	Zone 2 Chénopodiacées-Poacées	Ly 5874	4625±60	[3615-3108]	3361	254
Ile d'Errand I	167	-0,87	vase bleue organique	Chénopodiacées-Composées tubuliflores	Ny 683	4575±105	[3666-2885]	3275	391
Ile d'Errand I	160	-0,8	vase noire	Poacées-Cypéracées-Sparganiacées	Ny 682	4330±75	[3034-2881]	2957	77
canal des fougères	185	-1,05	vase noire	Poacées-Cypéracées-Chénopodiacées	Ny 495	4255±90	[3091-2577]	2834	257
Menhir de Hélé	55	-0,05	branche	Quercus	Gif 3536	4230±110	[3094-2490]	2792	302
canal des fougères	140	-0,6	arbre 1 9m*60cm	Quercus	Ny 523	4120±90	[2885-2469]	2677	208
canal des fougères	130	-0,5	arbre 1 6,4m*52cm	Quercus	Ny 496	4000±80	[2866-2210]	2538	328
Ile d'Errand I	122	-0,42	base tourbe brune	Alnus-Salix-Osmunda	Ny 681	4190±85	[2922-2496]	2709	213
canal des fougères	160	-0,8	base tourbe brune	Alnus-Salix	Ny 494	4180±90	[2920-2493]	2706	214
canal des fougères	120	-0,4	sommet tourbe brune	Betula-Alnus	Ny 493	3770±90	[2455-1950]	2202	253
Ile d'Errand I	85	-0,05	sommet tourbe brune	Alnus-Osmunda	Ny 680	3635±85	[2399-1676]	2037	362
Ile d'Errand I	65	0,15	tourbe brune à noire	Alnus-Osmunda	Ny 679	3645±75	[2391-1688]	2039	352
canal des fougères	115	-0,35	base tourbe noire	Poacées	Ny 492	3475±85	[2014-1528]	1771	243
Ile d'Errand II	65	0,15	tourbe noire	Zone 5-6a Alnus-Osmunda-Salix	Ly 5873	3635±55	[2139-1786]	1962	177
Ile d'Errand II	44	0,36	écorce Alnus	fin Zone 6b baisse Alnus, Betula-Salix	Ly 5872	3240±55	[1627-1404]	1515	112
Ile d'Errand II	40	-0,4	arbre 2	Zone 7 Quercus	Ly 5827	3090±65	[1507-1133]	1320	187
Ile d'Errand II	40	-0,4	arbre 2	Zone 7 Quercus	Ly 5828	3000±50	[1393-1042]	1217	176
Ile d'Errand II	40	-0,4	arbre 2	Zone 7 Quercus	Ly 5826	2985±45	[1380-1036]	1208	172
Ile d'Errand II	40	-0,4	arbre 2	Zone 7 Quercus	Ly 5825	2910±50	[1260-925]	1092	168
Ile d'Errand II	40	-0,4	arbre 2	Zone 7 Quercus	Ly 5824	2830±50	[1122-841]	981	141
Ile d'Errand I	30	-0,4	arbre 2	Zone 7 Quercus	Ny 633	2505±75	[892-375]	633	259
Ile d'Errand I	30	-0,4	même arbre	Zone 7 Quercus	Ny	2495±85	[900-253]	576	324
Ile d'Errand I	35	0,45	tourbe noire	Alnus-Betula	Ny 678	2625±80	[914-529]	721	193
Ile d'Errand II	38	0,42	tourbe noire	Zone 8 Alnus-Salix-Myrica-Cypéracées	Ly 6181	2440±55	[780-393]	586	194
canal des fougères	50	0,3	tourbe noire	Poacées-Myrica	Ny 491	2105±80	[363-63] AD	213	150
Ile d'Errand I	15	0,65	tourbe noire	Poacées-Composées liguliflores	Ny 677	1240±80	[603-1025] AD	814	211

Tableau 12 : datations radiocarbones (VISSET 1979, 1982, et al. 1994). A centre de la fourchette de calibration (ne tient pas compte des pics de probabilité). B moitié de l'amplitude de la fourchette de calibration.

obtenues en divers points de la Brière sous la direction de L. VISSET, permettent d'avoir une chronologie globale des différentes périodes de sédimentation et du peuplement de la cuvette synthétisée dans la figure 23. Le tableau 12 présente ces datations et les différences locales.

Les calibrations sont réalisées en utilisant la date conventionnelle et 2 écarts types, sur la courbe dendrochronologique de STUIVER et PEARSON (1986) à l'aide du programme OXCAL (BRONK 1994) réalisé par le Research Laboratory for Archaeology and the History of Arts de l'université d'Oxford, disponible à l'adresse internet : [www.rlaha.ox.ac.uk/oxcal/](http://www.rlaha.ox.ac.uk/oxcal/)

### 4.3 Datation de la seconde génération de chênes

#### 4.3.1 Premières datations

L'analyse des sondages d'Ile d'Errand est la première à démontrer que les mortas de Brière appartiennent à deux générations (VISSET 1982). La première datation radiocarbone obtenue,  $2505 \pm 75$  BP, [892-375] cal. BC, confirmée par un second comptage ( $2495 \pm 85$  BP, [900-253] cal. BC), est plus récente que celles réalisées ensuite parallèlement à l'analyse dendrochronologique (tab. 12). Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ce décalage. Il faut peut-être admettre la présence de quelques chênes isolés dans l'Aulnaie jusqu'au début de l'Age du Fer. L'échantillon a pu être enrichi en  $^{14}\text{C}$ , par des rhizomes de phragmites ou des champignons. Enfin la courbe de calibration, après une période de pente forte jusque vers 800 av. J.-C. est très "plate" durant la période comprise entre 750 et 400 av. J.-C. ce qui induit souvent une grande fourchette de calibration (fig. 26). Les fourchettes observées ici sont assez

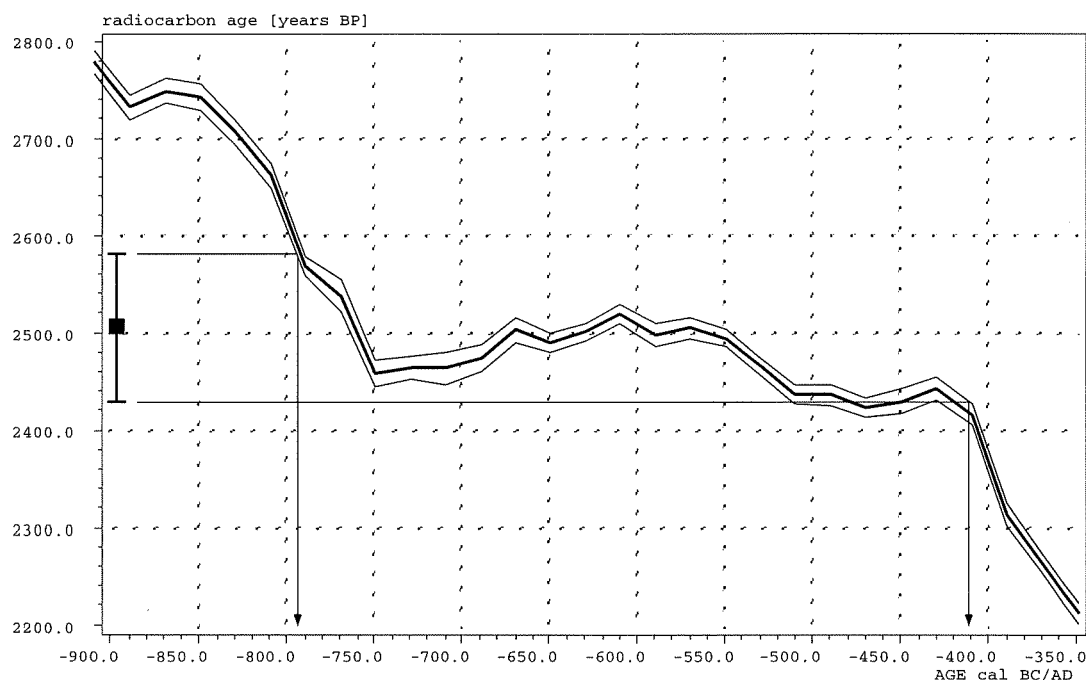


Figure 26 : calibration de la date  $2505 \pm 75$  BP

larges car l'écart-type de la mesure de la teneur est déjà assez élevé. Les fortes variations de la courbe de calibration observées avant et après -800 traduisent également de fortes différences dans l'alimentation en  $^{14}\text{C}$  de la haute atmosphère qui posent classiquement des problèmes d'interprétation des dates au début de l'Age du Fer.

A l'exception de cette datation, la deuxième génération de chênes s'est donc développée à la fin de l'Age du Bronze, au début du Subatlantique typique alors que la



première s'étendait en Brière au Subboréal, pendant le Néolithique final.

#### 4.3.2 Datations après synchronisation relative

L'analyse dendrochronologique a débuté par la mesure des largeurs des cernes d'environ 30 rondelles de mortas provenant d'Ile d'Errand (cf. chap. 3). Les croissances de ces arbres ont pu être synchronisées à l'aide des méthodes d'interdatation dendrochronologique

N° dendro	Nb cernes	N° 14C	r	t	risque*1000
IDE1-35	18	Ly 5824	0,51	7,08	1,02E-07
IDE1-31	24	Ly 5825	0,55	7,16	6,92E-08
IDE1-5	22	Ly 5826	0,67	10,21	1,72E-14
IDE1-36	24	Ly 5827	0,74	10,19	1,90E-14
IDE1-4	19	Ly 5828	0,77	12,59	1,20E-19

tableau 13 : synchronisme entre les croissances des individus datés par 14C et les chronologies de contrôle comportant les autres arbres interdatés. r coefficient de corrélation (standardisation Except), t valeur de Student

ce qui démontre qu'ils sont contemporains (cf. partie 2). Ces arbres permettent de construire une chronologie relative. Il est possible de réaliser des datations radiocarbone de fragments répartis dans cette échelle relative. 5 fragments qui comportent entre 18 et 24 cernes (tab.13) ont été prélevés dans 5 rondelles dont les croissances sont intégrées à la chronologie relative avec un risque d'erreur très faible. La qualité de cette intégration peut être estimée en retirant l'individu testé de la chronologie relative et en renouvelant la recherche de synchronisme entre les séries de cernes de l'individu et de la chronologie l'excluant. Ceci revient à comparer la croissance de l'individu testé à celle de tous les autres (cf. partie 2). Pour les 5 échantillons datés par 14C, la croissance individuelle est très fortement corrélée à celle de tous les autres (tab. 13). Les valeurs t de Student, toutes supérieures à 7,08, correspondent à des risques d'erreurs très faibles (cf. Partie 2).

N° dendro	N° 14C	1er c.	der. c.	date BP	date cal. BC	A	B
IDE1-4	Ly 5828	100	119	3000 ±50	[1393-1042]	1217	176
IDE1-31	Ly 5825	113	136	2910 ±50	[1260-925]	1092	168
IDE1-5	Ly 5826	177	198	2985 ±45	[1380-1036]	1208	172
IDE1-35	Ly 5824	285	302	2830 ±50	[1122-841]	981	141
IDE1-36	Ly 5827	288	311	3090 ±65	[1507-1133]	1320	187

tableau 14 : position relative des fragments et datations radiocarbone. A centre de la fourchette de calibration. B moitié de l'amplitude de la fourchette

Le nombre d'années qui séparent les fragments est donc connu. Les datations calibrées peuvent alors être comparées à cette échelle relative. Dans un premier temps, les résultats sont simplement juxtaposés. Puis la possibilité d'utiliser les dates en une seule séquence est exploitée par la méthode du "Wiggle-maching" (BAILLIE 1995).

Deux fragments "anciens" sont issus du premier quart de la chronologie, vers le centième cerne. Un fragment provient du centre de la chronologie, vers le cerne 200, et les deux derniers sont plus récents vers le cerne 300 (tab. 14). Les fourchettes des datations calibrées reflètent imparfaitement cette chronologie (tab. 14). Les dates Ly 5828 et Ly 5824 correspondent effectivement aux deux extrémités. Cependant, la datation Ly 5827 est la plus

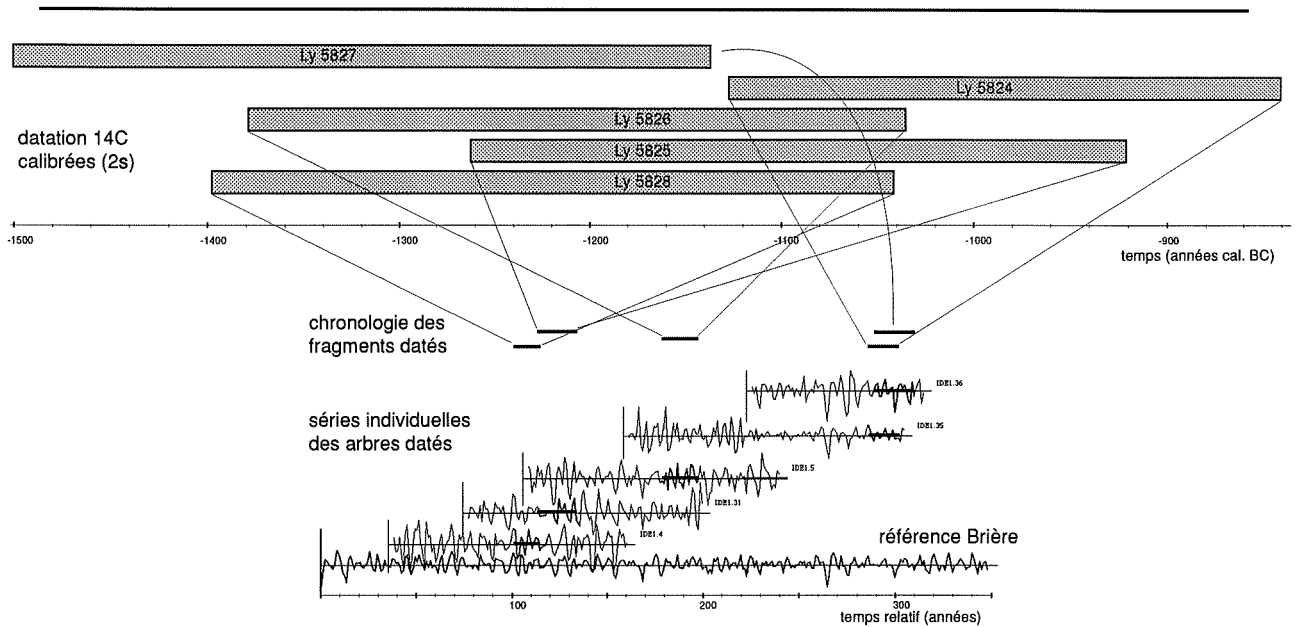


Figure 27 : comparaison des datations 14C et de la position relative des fragments datés

ancienne alors que l'échantillon provient de la partie la plus récente de la chronologie. De même en utilisant le centre des fourchettes de calibration, les dates Ly 5825 et Ly 5826 semblent respectivement trop récentes et trop anciennes. Cependant ces différences ne sont pas significatives. En utilisant les fourchettes entières, il est possible de reconstruire la chronologie relative (fig. 27). La figure 27 montre toutefois que la date Ly 5827 ne conduit pas

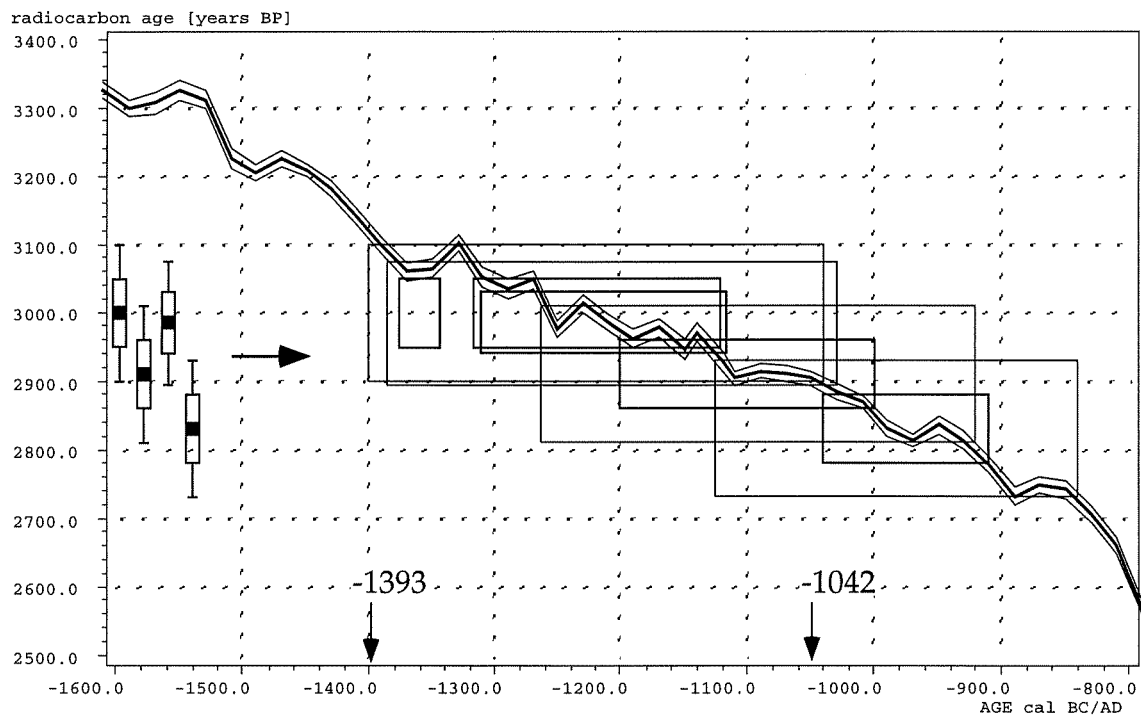


Figure 28 : représentation graphique de la calibration des dates radiocarbone individuellement

à une fourchette compatible avec la position du fragment par rapport aux autres. Il est difficile d'expliquer le vieillissement de l'échantillon qui signifie une perte de la teneur en 14C.

En utilisant les dates de façon indépendante, il apparaît donc qu'une d'entre elles ne peut être retenue et que les autres conduisent à des fourchettes de calibration d'environ 320 ans (fig. 28). Le fragment le plus ancien serait situé entre 1393 et 1042 av. J.-C. ce qui

correspond à une date du premier cerne de la chronologie environ 100 ans antérieur soit environ entre -1500 et -1140.

Le nombre d'années séparant chaque fragment étant connu, les 4 dates jugées satisfaisantes peuvent être considérées ensemble comme une séquence. La date du centre des

Identificateur	Dates	Agrément
Ly-5828	3000±50 BP	107%
Gap	16±1	
Ly-5825	2910±50 BP	75%
Gap	63±1	
Ly-5826	2985±45 BP	71%
Gap	106±1	
Ly-5824	2830±50 BP	112%
Séquence		80%

échantillons est utilisée pour les situer dans l'échelle relative (tab. 14). Le programme OXCAL permet de réaliser la calibration de la séquence en suivant la procédure dite "Wiggle-matching". Le principe est décrit par BAILLIE (1995). Il consiste à utiliser les différentes dates comme un échantillonnage de la courbe de

Tableau 15 : séquence de dates utilisées dans la procédure Wiggle-matching. L'agrément doit dépasser un seuil de 60% pour que l'analyse soit valide.

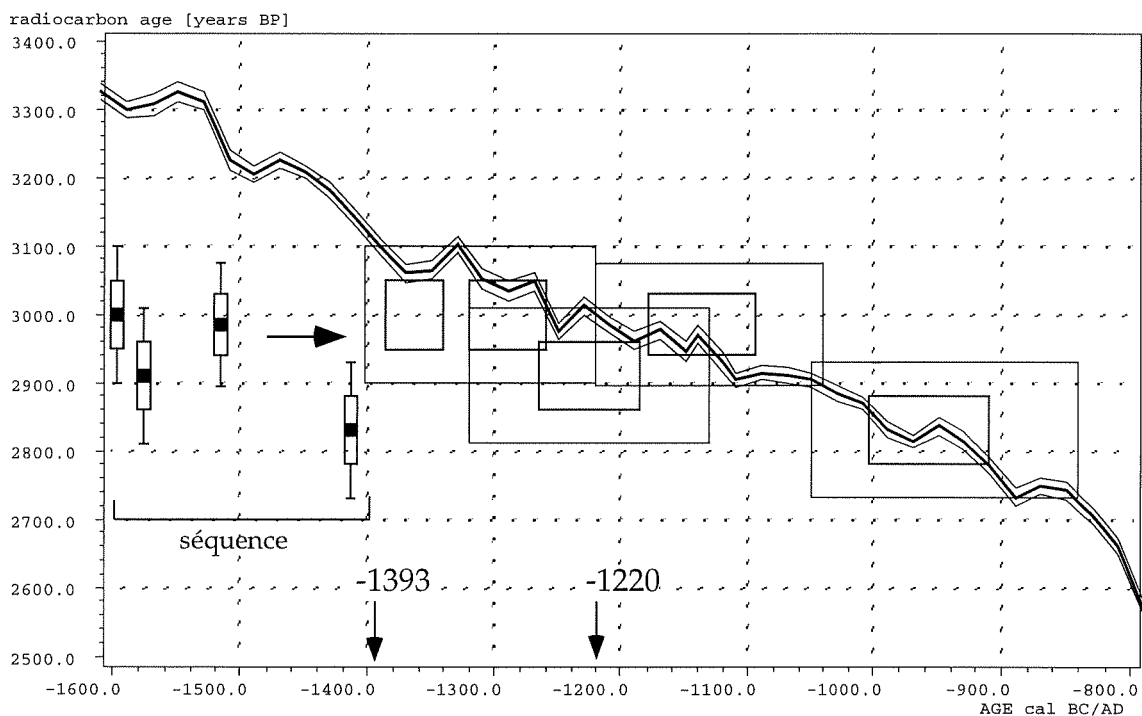


Figure 29 : représentation graphique de la calibration de la séquence de dates

calibration dendrochronologique. Les "vagues" (Wiggles) de la courbe sont plus ou moins fidèlement reconstruites. "L'ajustement" (matching) entre la reconstruction et la courbe permet d'estimer des fenêtres de calibration liées par la chronologie relative. Des estimateurs de la qualité sont calculés pour chaque date et pour la séquence. Ils sont significatifs (tab. 15), les résultats peuvent donc être interprétés.

La calibration de la séquence conduit à la datation du fragment le plus ancien entre -1393 et -1220 (fig. 29). Ce fragment représentant le centième cerne de la série dendrochronologique, la date du cerne le plus ancien mesuré peut être situé entre -1500 et -1320. La datation dendrochronologique retenue, -1358, est tout à fait concordante avec cette estimation (cf. Partie 2).



## Partie 2



# Chapitre 1

## MÉTHODES DENDROCHRONOLOGIQUES

### I Acquisition des largeurs de cernes

#### 1 Préparation des échantillons

Les rondelles tronçonnées dans les troncs subfossiles sont conservées humides dans des sacs plastiques. Elles sont reprises à la scie à ruban pour améliorer la qualité de la coupe des fibres et parfaire le plan transversal. Plusieurs chemins de lecture sont ensuite dégagés à l'aide d'une lame de rasoir souple. Le bois des rondelles trop sèches ne peut être coupé avec la lame de rasoir. Dans ce cas, elles sont poncées avec des papiers à grains de plus en plus fins.

Les chênes subfossiles sont très noirs. Leur image est donc difficile à exploiter car elle présente très peu de contraste. Classiquement, les variations d'humidité de la surface permettent d'obtenir des reflets de la lumière épiscopique et ainsi de bien distinguer les caractères anatomiques. Quand ces conditions ne peuvent être remplies, le chemin de mesure est enduit de craie, puis essuyé. La craie entre dans la lumière des plus grosses cellules et peut être enlevée des parties assez dures. Les vaisseaux et les plus grosses fibres apparaissent donc en blanc. Les parenchymes, dont les cellules sont de section beaucoup plus réduite, restent noirs. C'est notamment le cas du parenchyme terminal, élaboré à la fin de la saison de croissance et qui matérialise la limite entre deux cernes. Le contraste entre le parenchyme terminal et les vaisseaux de la zone initiale de l'année suivante est donc très nettement mis en évidence après un passage de craie. Cette technique nous a permis de mesurer, dans plusieurs cas difficiles, des cernes très étroits dont la zone initiale se désorganise.

---

## 2 Mesure des largeurs

### 2.1 Caractères anatomiques

Les difficultés de mesures dendrochronologiques habituellement rencontrées sont dues à l'absence de cerne pour une année ou à l'élaboration de bois de type initial inclus dans du bois final.

Ces difficultés sont typiques des résineux, comme le Sapin blanc dans les Vosges (BERT 1992), ou le Pin d'Alep dans l'Atlas (SAFAR 1994). Elles peuvent se rencontrer chez les feuillus, dont la distribution des vaisseaux dans le cerne est diffuse, comme le Hêtre (BOURQUIN 1993, BADEAU 1995). Un cerne atteint une notoriété certaine liée aux difficultés de datation lorsqu'il est absent pour une bonne part d'une population analysée. Ainsi, en 1517, une majorité des sapins et des hêtres dont les restes ont été découverts dans plusieurs sites miniers des Vosges n'ont pas élaboré de cerne (PERRAULT et LAVIER inédit).

En revanche, le Chêne est connu comme ne présentant pas de cerne absent. La croissance en 1517, de ceux retrouvés dans les sites miniers des Vosges, est très réduite mais toujours observable. Des conditions de développement plus favorables que les hêtres et les sapins, notamment liées à l'altitude, peuvent être associées au comportement spécifique. Dans des conditions extrêmes, comme après un émondage complet des branches, le Chêne présente une activité cambiale annuelle (RENAUDIN 1996). De même, l'étude dendroécologique d'un corpus de 1034 chênes pédonculés et sessiles vivants, provenant de deux forêts collinéennes en Lorraine n'a révélé la présence d'aucun cerne absent (BECKER *et al.* 1994). L'analyse de plusieurs milliers d'échantillons historiques au laboratoire de Chrono-écologie n'a jamais permis de démontrer l'existence de cerne absent chez le Chêne.

Les rares reprises de croissance observées chez cette essence sont en général constituées de vaisseaux dont le diamètre est nettement inférieur à ceux de la zone initiale. Elles sont souvent liées à une blessure du *cambium* et ne posent pas de problème d'identification.

Cependant, les mesures de la largeur des cernes de Chêne peut présenter des difficultés. La principale est la désorganisation des caractères anatomiques des cernes très étroits. Les cernes de taille supérieure à environ 50 centièmes de millimètre présentent une zone poreuse constituée de vaisseaux de très gros diamètre, pouvant atteindre 150 microns. Elle est suivie d'une zone finale dense bien contrastée, principalement constituée de fibres, de parenchyme et de vaisseaux de petit diamètre. Lorsque la taille du cerne diminue, c'est principalement la zone finale qui se réduit. Elle peut ne plus être visible lorsque la taille des cernes atteint environ 20 centièmes de millimètre. Lors d'une période de croissance réduite s'étalant sur quelques années, les zones initiales de plusieurs cernes sont alors jointives. Si les vaisseaux qui les constituent restent bien alignés, la mesure ne présente pas trop de risque. Cependant la variabilité des largeurs durant ces périodes est souvent faible. Par contre le risque d'erreur est important si les vaisseaux ne sont plus alignés, disposés en quinconce ou très dispersés. Sur une même ligne se mêlent alors des zones poreuses d'années consécutives. Les mesures varient ainsi entre 7 et 15 centièmes de millimètre. Leur signification est forte par rapport à la croissance optimale mais, lorsque la période de croissance réduite dure plusieurs années, les écarts entre ces années ne sont pas significatifs. Les vaisseaux de ces cernes présentent plus de variabilité le long d'un cerne qu'entre quelques cernes consécutifs. Pour ces périodes, la largeur peut varier du simple au double en fonction des chemins de mesure.

Les chênes subfossiles de la Brière, ont parfois élaboré des cernes désorganisés



---

pendant environ 30 ans avant de mourir. Dans ce cas précis, la mesure des cernes n'apporte pas plus d'information que de les estimer à environ 10 centièmes de millimètre. Les programmes du laboratoire permettent d'attribuer à une année une valeur dite "absente" (représentée par ", " dans les fichiers de données) qui ne participera pas aux traitements statistiques. Les cernes des périodes de croissance désorganisée ont été enregistrés par cette valeur en fin de vie des arbres.

Cependant, si cette période survient au cours de la vie de l'arbre, elle représente une information chronologique très importante pour la synchronisation. L'utilisation des valeurs "absentes" permet de conserver l'aspect chronologique mais pas le caractère extrême de la valeur. Pour ne pas perdre cette information, la largeur des cernes a été estimée jusqu'à la limite possible de l'observation. L'utilisation de craie, frottée sur le chemin de lecture, permet d'augmenter le contraste entre les cellules de grande et de faible section. Des cellules, pouvant correspondre à du parenchyme terminal, où la craie ne pénètre pas restent noires et "relient" les vaisseaux blanchis de la même zone poreuse. Ce traitement permet souvent de mieux différencier les cernes des périodes de croissance réduite. Les mesures sont réalisées en suivant plusieurs directions et la validité de ces séquences de cernes minces est testée ensuite. Certaines ont été supprimées après synchronisation des croissances individuelles.

## 2.2 Procédure de mesure

Le système employé est composé d'une partie optique et d'une partie informatique. L'échantillon est placé sur un chariot permettant son déplacement micrométrique sous une loupe binoculaire dont les facteurs de grossissement sont discrets. Nous utilisons les grossissements \*6, \*12, \*25. Une caméra envoie l'image de la binoculaire vers un écran de contrôle haute définition et vers l'ordinateur *via* une carte vidéo. Le système d'exploitation de l'ordinateur permet de superposer avec des fonds transparents deux applications : le gestionnaire de la carte vidéo et le logiciel de mesure. Les fonctions du logiciel sont donc superposées à l'image. Celui-ci est développé par G.N. LAMBERT.

Lorsque l'anatomie ne présente pas de caractères particuliers, les mesures sont réalisées une ou deux fois par chemin de décapage. Deux mesures sont conseillées pour éviter les erreurs de comptage et d'estimation de la limite de cerne. Cependant, il est plus important de réaliser plusieurs chemins de mesure sur un individu que de répéter les mesures par chemin. La variabilité des mesures sur le même chemin est due aux erreurs du système et à l'erreur d'appréciation de la limite de cerne par l'opérateur. Elle est très inférieure à la variabilité interne de l'arbre. La largeur d'un cerne est en effet rarement une constante en fonction de la position même dans un plan transversal.

La section complète du tronc, dans l'état de conservation, est analysée. Deux chemins de mesure au minimum sont situés dans la section. Celle-ci ne représente jamais un diamètre complet. Le premier critère de localisation des chemins est donc d'obtenir une mesure de tous les cernes conservés. Les zones de croissance qui semblent particulières pour la section sont évitées. Ces déformations sont classiquement liées aux départs de branches ou aux blessures du *cambium*.

Les séries de largeurs sont représentées sous forme de graphique. Les observations des différentes mesures réalisées pour un individu sont comparées sur une table lumineuse et éventuellement confrontées à des comptages ou des observations réalisées sur la rondelle sous la loupe. Lorsque les séries issues du même arbre ne présentent plus de différences qui puissent être justifiées par une observation sur l'échantillon, une moyenne des différentes

mesures est réalisée. Celle-ci constitue la série individuelle qui est la seule utilisée par la suite dans les divers traitements.

## II Recherche de synchronismes

### 1 Caractéristiques des séries de largeurs de cernes

#### 1.1 Les observations

Dans un sens mathématique, une collection ou une suite de largeurs de cernes en fonction du temps est une série chronologique (ou simplement une chronologie). Les observations sont bien sûr enregistrées avec un pas de temps annuel. Elles peuvent être de deux natures. Il s'agit de simples mesures uniquement dans le cas d'un chemin de lecture et le plus souvent, les observations sont des moyennes arithmétiques de mesures réalisées pour un individu, pour le lot provenant d'un site ou pour les sites d'une région. Cette différence de nature des observations est la source d'un vocabulaire tentant de qualifier la série (tab. 16).

Les mesures simples sont dites séries élémentaires. La série individuelle est constituée de la moyenne de toutes les séries élémentaires réalisées pour un individu. Les séries constituées de plusieurs individus sont produites à partir de la moyenne arithmétique des séries individuelles. Pour les décrire, le terme de chronologies moyennes est plus usité que celui de séries moyennes et, par abus de langage, dans des contextes claires, les termes "moyennes" ou "chronologies" sont aussi utilisés. Les chronologies (ou moyennes) sont qualifiées en fonction de leurs constituants. Enfin lorsque la datation de la série est acquise, elle prend le nom de référence.

	populations vivantes (TESSIER 1984)	populations anciennes	description
série élémentaire	1 rayon	chemin ou rayon	
série individuelle	1 arbre	1 prélèvement	plusieurs artefacts dans un arbre
moyenne stationnelle	5-10 arbres	approché par la moyenne d'une phase de coupe	site forestier : milieu homogène
moyenne de site	-	5-30 prélèvements	site construit : approvisionnements différents
chronologie maîtresse	2-10 stations	-	échelle géographique locale
chronologie locale	-	2 - 5 sites construits	
chronologie régionale	-	5 sites et plus	échelle géographique régionale
étalon	-	nombreux sites répartis sur une surface régionale et une longue période	échelle géographique supra-régionale

Tableau 16 : vocabulaire descriptif des chronologies moyennes

Cependant, lors de l'analyse de matériel archéologique l'individu présente une ambiguïté. En effet, il n'existe pas de méthode totalement fiable pour assurer que deux restes ligneux de pièces façonnées proviennent ou pas du même arbre.

La moyenne de site comporte alors en général les séries individuelles d'arbres provenant de phases de coupe qui sont proches dans le temps et dont les caractéristiques de croissance font penser que le bassin d'exploitation est similaire. Ces appréciations sont nécessairement beaucoup plus ambiguës que dans le cas d'étude de matériel vivant situé.

Les séries dendrochronologiques ont en fait deux dimensions : une "longueur" en années (souvent notée  $n$ ) et une "couverture" qui correspond au nombre d'individus intégrés dans chaque observation (souvent noté  $N$ ). Elles sont un échantillonnage (au sens statistique) d'une population qui est déterminée par le sujet de l'analyse. Une référence est un échantillon représentant la croissance de la population régionale et une moyenne de site, celle de la population locale.

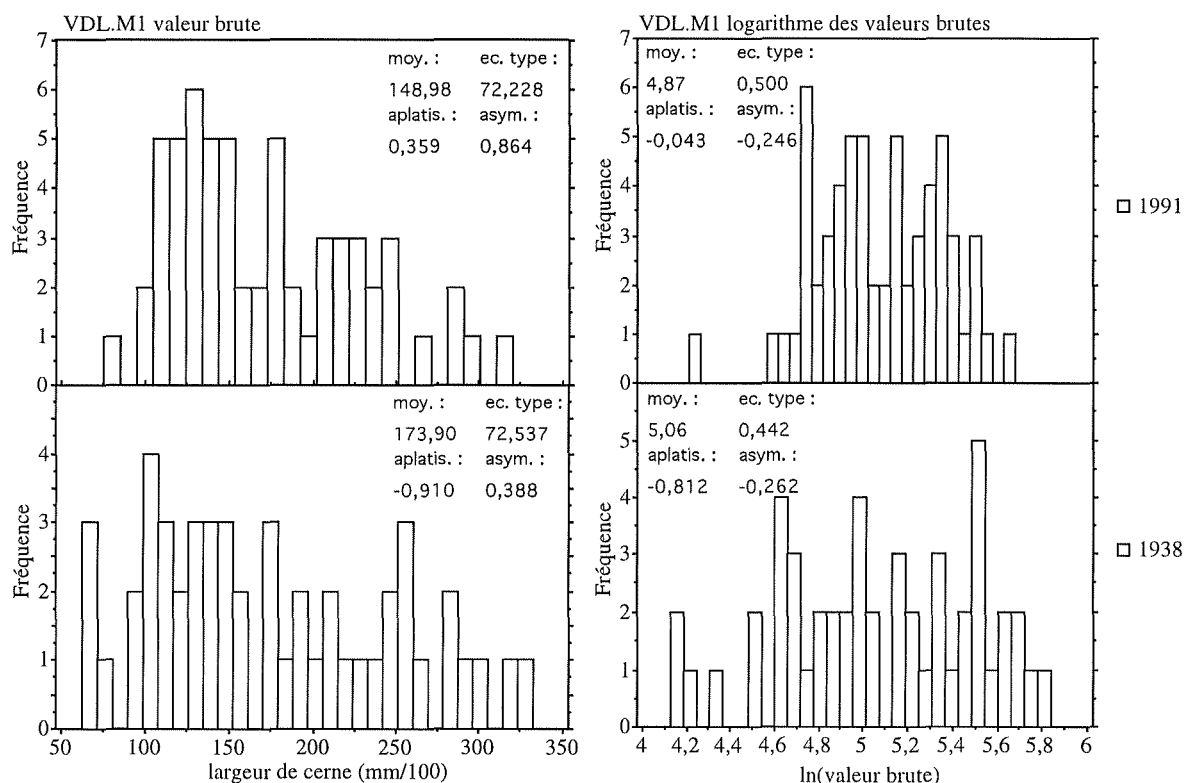


Figure 30 : distributions des largeurs brutes et de leur logarithme disponibles en 1991 et 1938

Les moyennes sont qualifiées globalement en fonction des séries individuelles qu'elles comportent, mais il est important de montrer les caractéristiques des observations en fonction du temps. Le graphe le plus usité est la couverture de la chronologie moyenne qui présente le nombre de séries individuelles incluses dans chaque observation. Mais les observations des chronologies moyennes sont en général hétérogènes pour d'autres paramètres comme l'écart-type et le type même de distribution. MAZEPA (1982) montre que la majorité des indices des séries étudiées ont une distribution normale mais que d'autres types de distributions existent. Selon les années, il observe des distributions bimodales et surtout polymodales. Dans ce cas, les indices sont de dimensions très variables toutes de fréquence rare. La standardisation (cf. 4) aboutissant à une normalisation des distributions, on peut penser que celles des largeurs brutes sont encore plus variées. Pour l'exemple de VDL.M1, on observe en fait une grande majorité de distributions asymétriques assez dispersées comme celle de 1991 sur la figure 30 et quelques cas de distributions polymodales très "aplaties" comme 1938. En utilisant le logarithme des largeurs de cernes, les distributions annuelles asymétriques sont rééquilibrées mais elles restent fréquemment très diversifiées ou "aplaties" (tab. 17). La moyenne arithmétique est la seule classiquement utilisée mais elle est réellement le meilleur estimateur du signal commun uniquement pour les années dont les largeurs peuvent être jugées comme un échantillon d'une distribution Normale ou Log-Normale.

année	valeurs brutes		Logarithme des valeurs brutes	
	Skewness	Kurtosis	Skewness	Kurtosis
	aplatissement	asymétrie	aplatissement	asymétrie
1994	1,79	1,13	-0,57	-0,45
1993	0,98	1,04	-0,53	-0,26
1992	0,01	0,74	-0,48	-0,20
1991	0,36	0,86	-0,04	-0,25
1990	-0,32	0,64	0,09	-0,55
1989	0,25	0,73	0,73	-0,75
1988	2,15	1,23	0,16	-0,52
1987	0,98	1,14	-0,36	-0,20
1986	0,07	0,64	-0,33	-0,53
1985	0,53	0,76	-0,60	-0,42
1984	1,43	1,05	0,20	-0,44
1983	1,32	1,13	0,94	-0,72
1982	0,22	0,92	0,63	-0,60
1981	1,14	1,18	-0,13	-0,17
1980	1,05	1,23	-0,49	-0,09
1979	0,71	0,94	-0,15	-0,30
1978	4,00	1,75	-0,23	0,14
1977	3,02	1,61	0,14	0,23
1976	0,26	0,85	-0,29	-0,29
1975	-0,24	0,51	0,63	-0,75
1974	-0,28	0,64	-0,29	-0,37

Tableau 17 : paramètres descriptifs des distributions annuelles des valeurs brutes et de leur logarithme (série VDL.M1, forêts contemporaines de la vallée de la Loire) (loi Normale : Skewness et Kurtosis = 0)

## 1.2 Tendances

Les variations des largeurs de cernes observées sur le graphique en fonction du temps, figure 31, peuvent être décomposées en plusieurs termes. La tendance est la variation sur des périodes assez longues, par rapport à la durée de l'enregistrement, d'un niveau moyen des observations défini localement (TOMASSONE *et al.* 1993). Le niveau moyen est estimé avec quelques observations consécutives, par exemple, par la moyenne mobile de 7 cernes sur la figure 31. Ce niveau diminue sur la fin du XIXe siècle en subissant des variations de l'ordre de la décade. Dans ce cas, l'estimation de la tendance est stochastique. Cependant, une part de la tendance peut être considérée comme une fonction non aléatoire. Une fonction est alors ajustée aux données généralement par la méthode des moindres carrés (cf. 4). Sur la figure 31, un polynôme de degré 9 montre les variations d'un niveau moyen. Les séries dendrochronologiques, quelle que soit leur composition, les séries élémentaires comme les référentiels régionaux (HOLLSTEIN 1980), sont caractérisées par des tendances complexes.

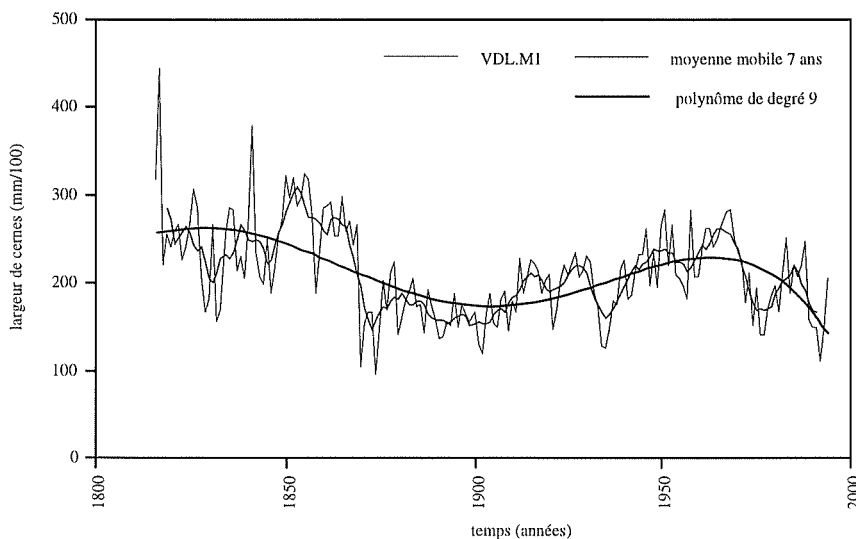


Figure 31 : chronologie moyenne de 59 arbres contemporains de la vallée de la Loire (VDL.M1)

### 1.3 Dépendance sérielle

La présence d'une tendance marquée implique que la largeur de cerne d'une année  $n$  est partiellement dépendante des largeurs qui la précède. Le coefficient de corrélation (ou la covariance) calculé entre une série et cette même série décalée dans le temps montre cette dépendance. La série de la figure 31 présente une autocorrélation significativement différente de 0 pour environ les 20 premiers ordres (fig. 32). En général, les fonctions d'autocorrélation des séries dendrochronologiques montrent une forte persistance du signal. Le cerne de l'année en cours est en partie prédéterminé par ceux qui le précèdent.

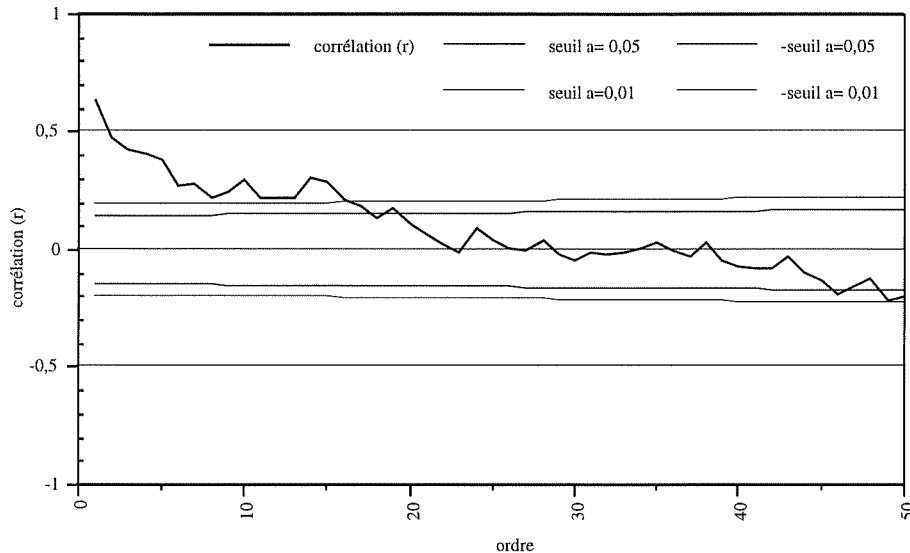


Figure 32 : fonction d'autocorrélation de VDL.M1

### 1.4 Stationnarité

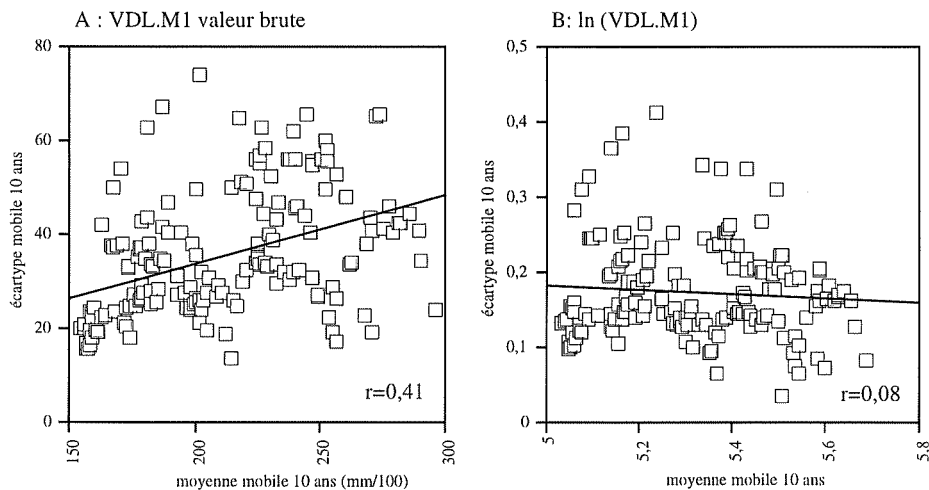


Figure 33 : corrélation entre moyenne et écart-type locaux en valeur brute (A) et en utilisant le logarithme des largeurs (B)

Une série chronologique est stationnaire si sa structure probabiliste reste constante dans le temps. En fait, on se limite généralement à vérifier que le processus est stationnaire du point de vue de la moyenne et de la variance (TOMASSONE *et al.* 1993). La tendance montre que les séries de largeurs de cernes n'ont pas une moyenne stationnaire. De plus, dans le temps, l'écart-type est souvent fonction de ce niveau moyen. Pour la série VDL.M1 (fig. 31), le coefficient de corrélation entre écart-type et moyenne locaux s'élève à 0,41 (fig. 33A). Il atteint 0,87 pour la série de l'Age du Bronze Bre.M20 provenant du site de Bredan (10) (fig. 34C). Cette série comporte des cernes larges suivis de cernes très minces, parfois inférieurs à 50 centièmes de millimètre (fig. 34A). La variance n'est donc pas stationnaire dans les séries de largeurs.

Lorsque la moyenne et l'écart-type sont reliés par une fonction linéaire, l'utilisation du logarithme des valeurs brutes permet de rendre plus stationnaire la variance. La corrélation disparaît dans le cas de VDL.M1 (fig. 33B). Les écarts entre les années sont plus homogènes le long de la série Bre.M20 (fig. 34B). Cependant, la corrélation entre l'écart-type et la moyenne reste élevée (fig. 34D).

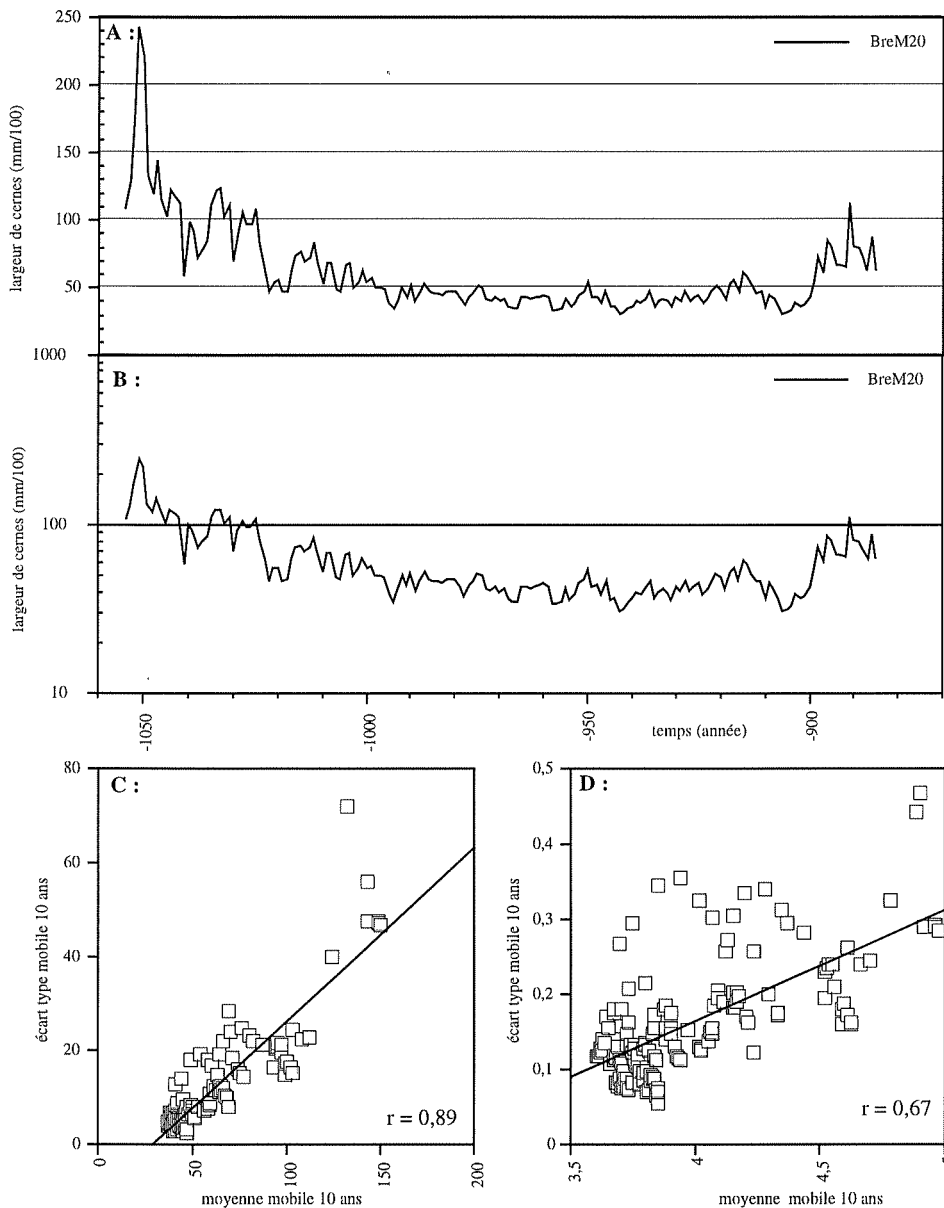


Figure 34 : non stationnarité de la chronologie moyenne Bréban-M20

### 1.5 Variation interannuelle

La différence de largeur entre deux cernes consécutifs est l'information qui autorise la synchronisation à l'année près. On montre, par la datation, qu'une série de variations interannuelles suffisamment longue et documentée se reproduit dans le temps avec une probabilité qui est très faible. Cette probabilité correspond au risque d'erreur de la datation. Cependant, les séries dendrochronologiques ont une structure probabiliste très complexe. Elles peuvent être considérées comme une somme de signaux résultant des interactions de nombreux facteurs (cf. 3). En conséquence, les largeurs ne peuvent pas être utilisées directement pour la recherche de synchronisme. Deux possibilités d'extraction de la variation interannuelle sont exploitées en dendrochronologie :

---

\* une est non - paramétrique, elle considère le sens des pentes interannuelles et leur coïncidence comme estimateur du synchronisme.

\*\* L'autre consiste à standardiser les données. Un modèle est ajusté à la croissance de façon à ce que les résidus soient le plus proche possible d'une série stationnaire. Dans ce cas, la structure de la série de résidus ne doit pas inférer sur l'utilisation du coefficient de corrélation pour estimer le synchronisme.

## 2 Synchronisation non - paramétrique

### 2.1 Transformation de la série brute

La pente entre deux cernes consécutifs présente une meilleure reproductibilité dans une population que la largeur. Pour une année donnée, des arbres d'âges différents, se développant dans des conditions locales différentes peuvent réaliser des cernes de dimensions très variables. Cependant, si les conditions, principalement climatiques, de cette année sont moins bonnes que la précédente, ils réaliseront de façon plus homogène un cerne plus mince que le précédent. Pour comparer la croissance de plusieurs arbres d'une population, il est donc possible de n'utiliser que la pente entre les cernes consécutifs.

Dans ce but, les séries de largeurs sont transformées en suite de 3 classes : soit le cerne de l'année  $n$  est jugé plus large que celui de l'année  $n-1$  (+1), soit il est plus étroit (-1), soit la différence est considérée non significative (0) (fig. 35).

Dans le principe, la transformation en suite de pentes d'une série est réalisée à partir de données brutes, cependant l'opération peut être menée après standardisation (cf. 4), sur une série d'indices.

### 2.2 Gleichläufigkeit

Pour synchroniser deux séries, la concordance des pentes est mesurée. le coefficient de coïncidence (G) (*Gleichläufigkeit* en allemand et *parallel variation* en anglais KAENNEL et SCHWEINGRUBER 1995, JANSMA 1995) est défini sans tenir compte des écarts jugés non significatifs. Pour les écarts restant, la concordance de deux séries dans une position donnée est estimée par le pourcentage de pentes qui ont le même sens de variation (fig. 35).

Si les deux séries comparées sont indépendantes, le coefficient de coïncidence tend vers 50%. La probabilité que deux pentes soient concordantes est égale à celle qu'elles soient opposées. Par contre, le coefficient tend vers 100% lorsque le lien entre les séries augmente.

### 2.3 Test de ECKSTEIN

La signification du coefficient de coïncidence peut être mesurée en fonction du nombre de pentes considérées ( $n$ ). Une variable, appelée coefficient de ECKSTEIN ou  $W$  est calculée (fig. 35). La distribution de cette variable est supposée normale, ce qui permet de lui attribuer une probabilité et un risque d'erreur. Ce calcul est employé intensivement par ECKSTEIN (1969), et tous les auteurs allemands, pour construire les références à partir de nombreux bois. Le terme de test de ECKSTEIN est donc parfois employé comme un abus de langage décrivant la procédure. Cependant, le principe du test peut être rapproché d'une

transformation de variable dite de Fisher (JANSMA 1995) qui est appliquée de façon classique en statistique (ZAR 1996). La variable G (coefficient de coïncidence) est divisée par sa variance (S), obtenue dans le cas d'indépendance des séries, en fonction du nombre de cernes de recouvrement (n) (1). La valeur z est produite (2) et la loi Normale réduite est utilisée pour déterminer la probabilité et le risque associés à cette valeur.

$$S = 1 / (2\sqrt{n}) \quad (1)$$

$$z = (G - 0,5) / S \quad (2)$$

L'originalité principale de la procédure en dendrochronologie tient dans le fait que l'opération est répétée pour chaque chevauchement possible des deux séries, c'est-à-dire parfois plusieurs milliers de fois. Il en résulte une suite de coefficients W pour lesquels le risque est estimé. Le résultat n'est pas unique : il s'agit d'une nouvelle fonction du temps (cf. fig. 48).

Dans ces conditions, le risque est sous-évalué, il est indispensable qu'il soit très faible (cf. 5.3). Si bien que des risques supérieurs à 0,001 (1‰) sont rarement pris en compte pour une datation. Le coefficient de ECKSTEIN qui correspond, s'élève à la valeur  $W=3,09$ , sert de seuil empirique (LAMBERT *et al.* 1988). Toutefois une valeur unique ne peut être définie car la représentativité des séries varie fortement en fonction du nombre et de la qualité des individus qui les composent.

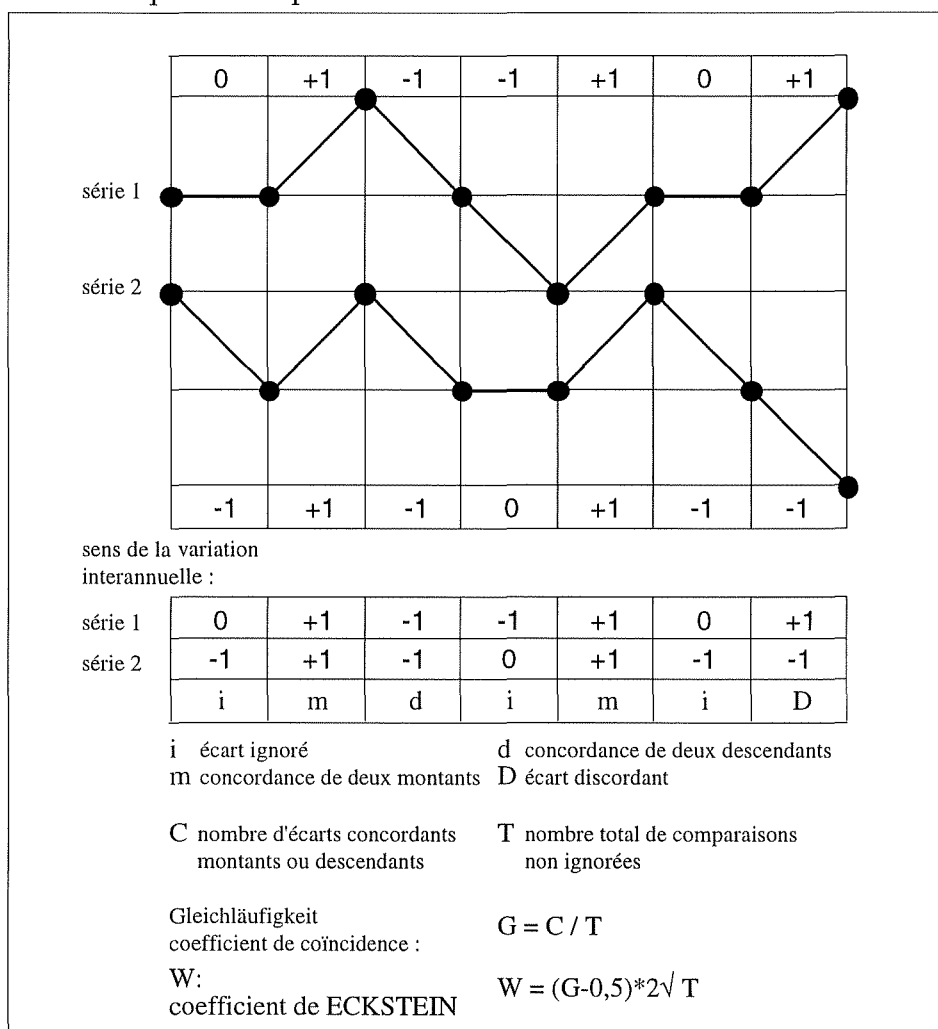


Figure 35 schématisation du test de ECKSTEIN



---

Le test exploitant les écarts interannuels peut être appliqué à des données brutes, non standardisées (cf. 4), donc non stationnaires. En effet, la distribution dans le temps des pentes ne montre pas de dépendance sérielle comme c'est le cas pour les largeurs. Par analogie avec l'autocorrélation, le coefficient de coïncidence peut être calculé entre une série et elle-même décalée d'un rang. La fonction qui regroupe les 20 premiers ordres montre nettement que le coefficient est distribué autour de 50. Il n'existe donc pas de lien dans le temps entre les pentes. En utilisant la pente entre les largeurs successives, le test de ECKSTEIN s'affranchit donc d'une grande part de la complexité de structure des données brutes. C'est dans ce sens qu'il est robuste.

### 3 Modèle linéaire de la croissance

#### 3.1 Modèle de GRAYBILL

Les caractéristiques particulières des séries dendrochronologiques sont prises en compte dans un modèle de la croissance. Les termes de celui-ci sont additifs. Même si les effets d'antagonismes ou de synergies sont très présents dans les systèmes biologiques, ils ne peuvent être considérés avec des outils mathématiques simples. Le modèle de GRAYBILL (1982) considère la croissance comme une somme de signaux non perceptibles individuellement. Ces signaux trouvent leur source dans les systèmes de facteurs internes (physiologie) et externes (écologie). Parmi ces grands ensembles de facteurs, le modèle permet de décrire les conséquences dans la série temporelle de l'action de ceux qui sont étudiés par rapport à ceux qui seront considérés comme du bruit. Ce modèle est donc utilisé essentiellement de façon conceptuelle (TESSIER 1984, COOK et BRIFFA 1990, BADEAU 1995). Cette somme de signaux peut s'écrire (COOK et BRIFFA 1990) :

$$R_t = A_t + C_t + \partial D1_t + \partial D2_t + E_t$$

où :  $R_t$  est la largeur de cerne observée à l'année  $t$ ,

$A_t$  est le signal représentatif de la croissance en fonction de l'âge,

$C_t$  représente l'influence du climat,

$\partial D1_t$  confond des signaux liés à des facteurs internes et externes qui n'intéressent qu'une part de la série, et une part de la population étudiée,

$\partial D2_t$  confond des signaux liés à des facteurs internes et externes qui n'intéressent qu'une part de la série, et toute la population étudiée,

$E_t$  représente les variations de  $R_t$  qui ne sont pas expliquées par les autres termes.

Les termes du modèle sont construits en fonction de leurs propriétés dans la série temporelle.  $A_t$  est typiquement un signal évoluant sur une longue période. La baisse du niveau moyen liée à l'âge affecte la série sur toute sa longueur. Dans le domaine des fréquences,  $A_t$  correspond donc à un signal de basse fréquence.  $C_t$ , *a contrario*, a des variations essentiellement interannuelles, de période courte, ou encore de haute fréquence.  $A_t$  et  $C_t$  intéressent nécessairement la totalité de la série.  $\partial D1_t$  et  $\partial D2_t$  sont, par contre, représentatifs de facteurs affectant la croissance uniquement à certains moments. L'opérateur  $\partial$  prend la valeur 1 quand le signal est observé et 0 dans le cas contraire.  $\partial D1_t$  représente des signaux séparés dans des sous-ensembles de la population étudiée alors que  $\partial D2_t$  est observé pour

---

tous les arbres. Ainsi, l'attaque d'un ravageur, le gel, une ouverture de la canopée, un incendie, ou encore les variations d'un facteur du milieu peuvent affecter un nombre variable d'individus. De plus, les actions de ces facteurs sont de durées différentes et interviennent une ou plusieurs fois, éventuellement de façon cyclique, pendant la vie de l'arbre. Ces signaux, dont la période est incluse dans la durée de la série, sont dits de moyenne fréquence.

### 3.2 Signal étudié et bruit

Les termes du modèle tiennent compte des caractères les plus typiques des signaux. Dans les faits, les facteurs ont souvent des actions sur la croissance qui sont représentées par plusieurs termes du modèle.

Les variations les plus étudiées du climat sont interannuelles (FRITTS 1976). La dendroclimatologie analyse le signal de haute fréquence alors que toutes les variations de basse et moyenne fréquence sont considérées comme du bruit à extraire de la série (COOK et BRIFFA 1990). Des variations dont la source est climatique, de moyenne fréquence voire de basse fréquence sont confondues avec  $\partial D2$  ou même  $A_t$ . Elles sont, de ce fait, restées peu étudiées. Une nouvelle approche des termes du modèle très axée sur une définition du bruit ne comportant que le signal lié à l'âge,  $A_t$ , a permis de mettre en évidence une dérive positive à long terme de la croissance de plusieurs espèces au cours du XXe siècle (BECKER *et al.* 1994). Cette méthode a également été évaluée pour des reconstructions des températures estivales à la limite altitudinale de la forêt (BRIFFA *et al.* 1996).

Le signal utilisé pour réaliser une datation pose également des questions. La recherche du synchronisme entre deux séries par glissement de l'une sur l'autre livre comme résultat une fonction du temps d'un indicateur de ce synchronisme (cf. fig. 48). Une datation est jugée significative si, à un pas de temps annuel, le test du synchronisme atteint une valeur qui se dégage des autres sans ambiguïtés (cf. 5). Ceci se traduit par une valeur singulière dans la fonction de corrélation.

Le signal utilisé pour obtenir cette valeur singulière est, par construction, de haute fréquence. FRITTS (1976) montre que le signal de haute fréquence de populations éloignées présente un synchronisme alors que le signal de basse fréquence ne peut être corrélé sur de longues distances. Les variations de basse fréquence et moyenne fréquence sont considérées comme du bruit pour la datation et sont extraites de la série par la standardisation ou la transformation en pentes des valeurs brutes.

Cependant, le terme  $C_t$  du modèle de GRAYBILL ne représente probablement pas toute l'information disponible pour la datation. Des variations de périodes inférieures à environ 10-15 ans peuvent être communes à toute la population étudiée. Elles peuvent être introduites dans le terme  $\partial D2_t$  du modèle. Cette information, commune à toute la population (ou à une grande part) représente un potentiel pour rechercher le synchronisme entre les séries.

---

## 4 Standardisations

### *Introduction*

L'objectif de la standardisation des valeurs brutes en indices peut être divisé en deux parties qu'il faut concilier.

(1) L'interprétation du modèle de GRAYBILL donne un objectif conceptuel. La standardisation doit permettre d'extraire, au mieux, le signal qui est potentiellement exploitable pour l'étude et de maîtriser le bruit.

(2) Le second objectif est lié aux conditions d'utilisation du coefficient de corrélation. Il est défini par deux nécessités qui reviennent à rendre les séries de largeurs brutes le plus stationnaire possible (COOK *et al.* 1990).

\* A une date donnée, le niveau moyen de production des arbres peut être très différent, selon leur âge et les variations de moyenne fréquence. Les indices stationnaires, disponibles à la même date, présentent une distribution plus normale et sont mieux représentés par leur moyenne que les valeurs brutes.

\*\* Le signal doit être stationnaire, car les tendances induisent une ambiguïté dans le choix de la valeur particulière du coefficient de corrélation dans la liste obtenue par le glissement d'une série sur l'autre.

Dans la majorité des cas, le principe de la standardisation comporte deux temps :

\* Les observations sont utilisées pour ajuster un modèle qui produit une estimation ( $rt$ ) de la largeur observée  $Rt = rt + et$ . La part modélisée du signal représente la partie prédéterminée de la croissance et les résidus ( $et$ ) la partie aléatoire qui peut être exploitée pour la datation.

\*\* Dans un second temps, les résidus sont extraits. Cependant, les observations dendrochronologiques sont hétéroscédatiques, c'est-à-dire que le niveau moyen et l'écart-type locaux sont corrélés (cf. 1 fig. 33 et 34). Il est alors impossible de faire simplement la soustraction :  $et = Rt - rt$ . Par contre, la variance peut être stabilisée en utilisant le rapport (souvent exprimé en pourcentage) entre la valeur brute et l'estimation pour produire l'indice ( $it = Rt / rt$ ) (COOK *et al.* 1990).

Le logarithme de la largeur brute présente moins de lien entre l'écart-type et la moyenne (cf. 1 fig. 33 et 34). Il est alors possible de soustraire la valeur estimée de la valeur brute ( $it = \ln Rt - \ln rt$ ) (COOK *et al.* 1990). Selon la nature des observations, une des méthodes peut être plus appropriée. BRÄKER (1981) montre que pour les variables observées en densitométrie (maximum de densité ou pourcentage de bois final) la soustraction est indiquée. Cependant, si le lien entre la moyenne et l'écart-type est élevé, comme c'est le cas pour les largeurs, il est préférable d'utiliser un rapport.

De nombreuses formes de modèles peuvent être utilisées pour la standardisation. Les choix sont réalisés en fonction des termes du modèle de GRAYBILL pour définir le signal, conservé, et le bruit, maîtrisé, en conciliant la nécessité d'obtenir une série stationnaire.

#### 4.1 Modélisation par une fonction

Une fonction mathématique est choisie, généralement parmi les droites, les exponentielles ou les polynômes, pour représenter la partie prédéterminée de la croissance. La fonction, d'une forme définie *a priori*, la plus ajustée aux données est déterminée (généralement par la méthode des moindres carrés). Dans le cas du polynôme, le degré de celui-ci permet d'augmenter sa "flexibilité" (fig. 36). Ces fonctions sont opérationnelles lorsque la tendance est simple, comme c'est le cas pour les arbres ne subissant pas de compétition (COOK *et al.* 1990).

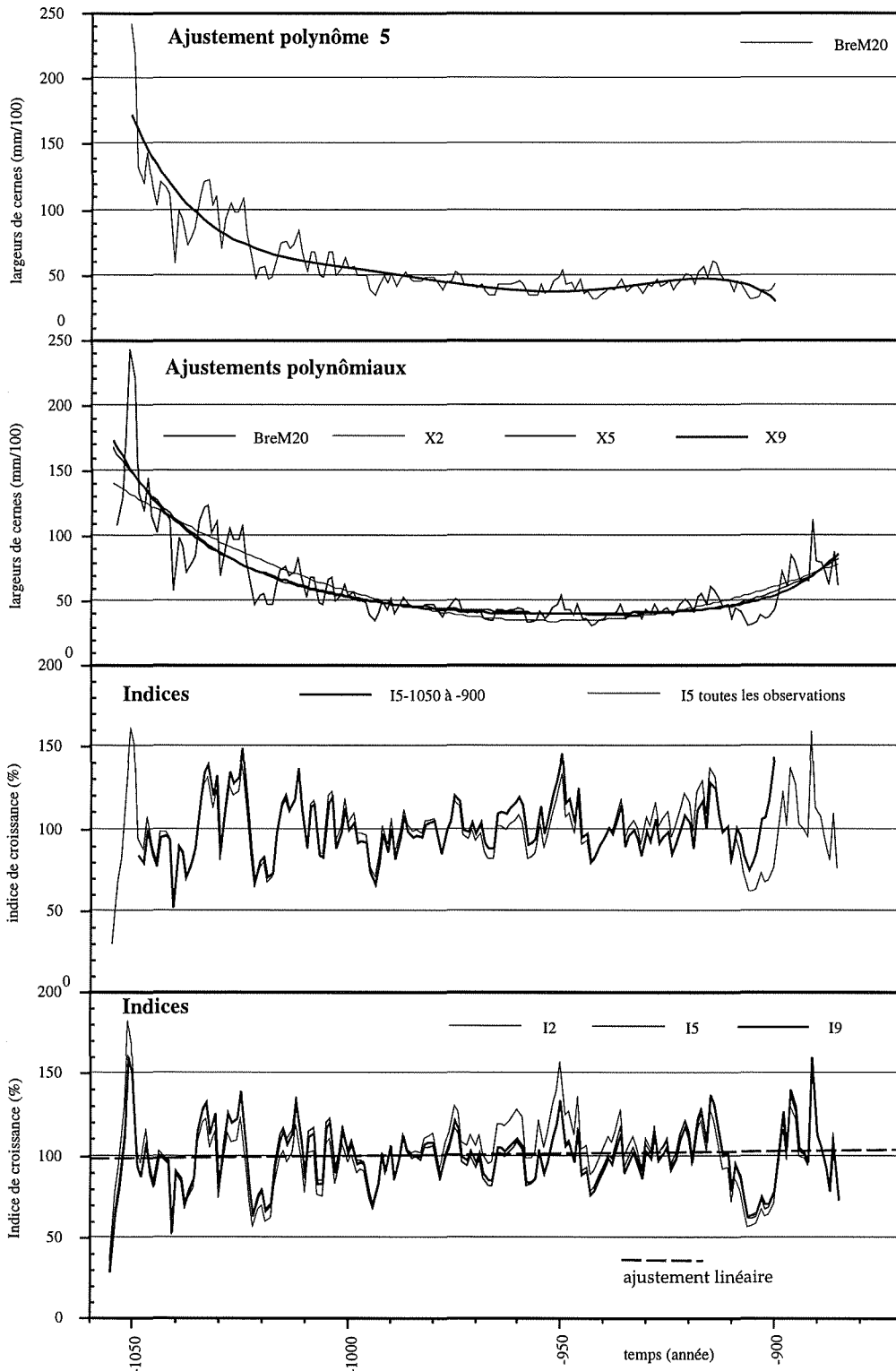


Figure 36 : ajustement polynomial sur les données brutes (BreM20) et séries d'indices correspondantes. X2 : polynôme du 2e degré I2 indices correspondant, X5 et I5 ajustement du 5e degré, X9 et I9 du 9e degré.

La série d'indices produite comporte une tendance résiduelle qui dépend de la "flexibilité" de la fonction et de la complexité des tendances dans la série de largeurs brutes. Dans la plupart des cas, la tendance à long terme (de basse fréquence) est effectivement éliminée. Par exemple, l'ajustement linéaire des séries d'indices obtenues avec les polynômes présente une pente très faible (fig. 36). Il n'y a donc plus de dérive.

L'ajustement d'une fonction est applicable dans de meilleures conditions lorsque les tendances sont simples. Si la complexité du signal de moyenne fréquence est augmentée, l'ajustement du même type de fonction (dans la figure 36 le polynôme de degré 5) conduit à deux séries d'indices qui présentent des différences localement importantes. Dans l'exemple, l'augmentation de largeur entre -900 et -885 induit une prise en compte différente de la séquence de cernes plus minces juste antérieure à -900.

Le degré du polynôme permet de le rendre plus "flexible". La figure 36 montre que la série d'indices issue de l'ajustement du deuxième degré comporte plus de signal de moyenne fréquence que celle obtenue après ajustement du polynôme de degré 9. Cependant, même dans ce cas, une grande part de ce signal est conservée. Ceci se traduit par une autocorrélation qui est significative, pour quelques ordres avec l'exemple (fig. 37). Toutefois, la persistance dans la série d'indices peut atteindre environ 20 ordres lorsque le signal de moyenne fréquence est complexe et la fonction peu "flexible", comme une exponentielle (YAMAGUCHI 1986). Les séries d'indices produites ne sont donc pas stationnaires. Dans ce cas, il est évident, au même titre que pour les valeurs brutes, que le coefficient de corrélation ne peut être utilisé pour synchroniser les croissances (YAMAGUCHI 1986).

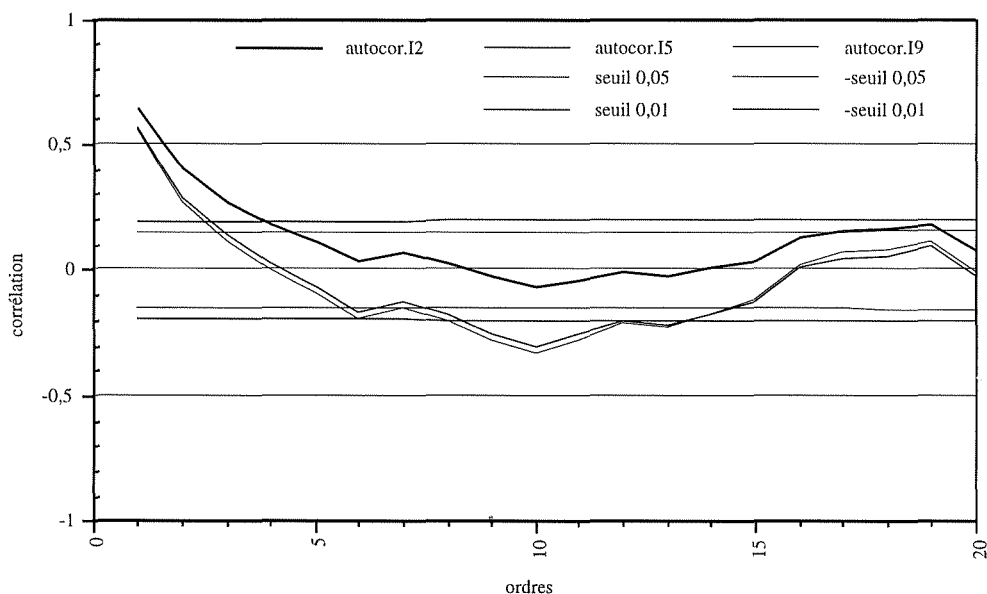


Figure 37 : fonction d'autocorrélation des séries d'indices obtenues par ajustement polynomial

Les modèles déterministes ne présentent en fait pas assez de "flexibilité" pour standardiser, dans un but de datation, les séries dont le signal de moyenne fréquence est complexe. Les arbres généralement datés subissent une compétition dans un peuplement où l'intervention humaine est importante et présentent souvent un signal de moyenne fréquence complexe. Les modèles de type stochastique sont plus adaptés aux données et permettent d'extraire ce signal.

---

## 4.2 Standardisations produisant un signal de haute fréquence

La tendance observée dans les séries montre que la largeur de cerne de l'année  $n$  n'est pas élaborée de façon indépendante vis-à-vis de ses précédentes. L'arbre dispose d'un acquis au moment de la reprise de croissance. Les mécanismes biologiques sous-entendus sont en rapport avec la capacité de constituer des réserves des arbres (TESSIER 1984). Le cerne en formation acquiert une largeur qui est fonction d'un potentiel qui a été constitué jusqu'à cette date. La modélisation ARMA (*Auto Regressive Moving Average*) est le développement statistique de la prise en compte d'un opérateur retard dans la croissance (GUIOT 1986 TESSIER 1984, MONSERUD 1986). Le modèle détermine, à l'aide des caractéristiques de l'autocorrélation, la partie du cerne en cours de formation qui est dépendante des précédents. De plus, cette procédure permet de produire une série de résidus parfaitement stationnaire, qui présente donc des caractéristiques statistiques très favorables, largement exploitées dans les reconstructions dendroclimatiques (GUIOT et ROUX 1993). Il faut également remarquer que des observations éco-physiologiques tendent à montrer que certaines espèces, notamment parmi les chênes, ont une croissance qui fait tout particulièrement intervenir des capacités acquises quelques années auparavant (cf. partie 3 chap. 4). NOLA (1996) montre que la largeur du bois initial de l'année en cours est fonction de la largeur du bois final de 1 à 3 années antérieures (selon les espèces de Chêne). Les mesures conjointes d'un indice de débourrement et de l'accroissement permettent d'estimer que 43% (en moyenne) de la largeur du cerne (du Chêne sessile et pédonculé en Lorraine) est élaborée avant que la fonction de photosynthèse ne soit initiée (BREDA 1994).

La modélisation ARMA produit une série de résidus stationnaire. Elle peut donc être considérée comme très robuste sur le plan théorique pour l'utilisation du coefficient de corrélation dans le but de synchroniser les séries (MUNRO 1984, MONSERUD 1986, YAMAGUCHI 1986). Cependant, deux restrictions peuvent être faites :

(1) les procédures de choix du modèle et de détermination des coefficients nécessitent une analyse particulière pour chaque série qui peut être lourde (MUNRO 1984). Ceci est particulièrement le cas pour le matériel archéologique qui présentent des caractéristiques très variables.

(2) la série de résidus ne présentant plus d'autocorrélation, seul le terme  $C_t$  du modèle de GRAYBILL est conservé. Le signal représenté par  $\partial D2t$  est donc rejeté dans le bruit. Une part de l'information potentielle pour synchroniser les séries provenant d'une région ne serait pas prise en compte (MUNRO 1984).

De ce fait des méthodes de standardisation moins justifiables sur le plan théorique sont utilisées en routine en dendrochronologie (MUNRO 1984).

### 4.2.1 Filtres passe-bas

La modélisation a très généralement lieu après la transformation des valeurs brutes en leur logarithme car ceux-ci présentent une distribution plus homoscedatique.

La tendance à supprimer de la série de largeurs brutes est estimée à partir d'un nombre d'observations ( $n$ ) pris en compte avant et après la valeur à standardiser. Le niveau local est déterminé, en général, par la moyenne des  $(2n+1)$  valeurs pondérées par  $n$  poids définis symétriquement (fig. 38). Il peut cependant être déterminé par une régression linéaire locale (modélisation LOWESS cf. 4.2.3). Le poids accordé à chaque cerne est décroissant lorsque l'on s'éloigne de la valeur à standardiser (fig. 38-41).

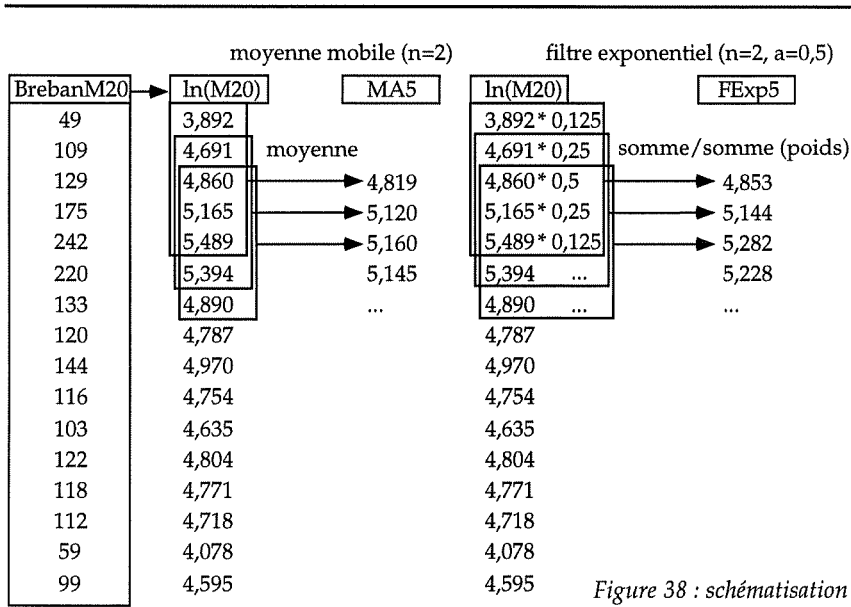


Figure 38 : schématisation du filtrage

n détermine jusqu'à quelle fréquence la tendance est éliminée et les poids en fonction du temps influent sur les propriétés de la série de résidus.

Le filtrage des données a surtout été employé pour la construction des références des îles britanniques (BAILLIE et PILCHER 1973). Dans la version initiale du programme CROS (BAILLIE et PILCHER 1973), n est égal à 2 (2n+1=5 observations sont utilisées) et les valeurs ne sont pas pondérées. Le filtre est donc simplement une moyenne mobile sur 5 points (fig. 38). Cette méthode introduit une distorsion dans la série de résidus, elle favorise l'apparition de cycles dont la période est comprise entre 5 et 2,5 années (MUNRO 1984). MUNRO (1984) propose de limiter cet effet en utilisant des poids. Il fait également varier le nombre d'années considérées jusqu'à 10.

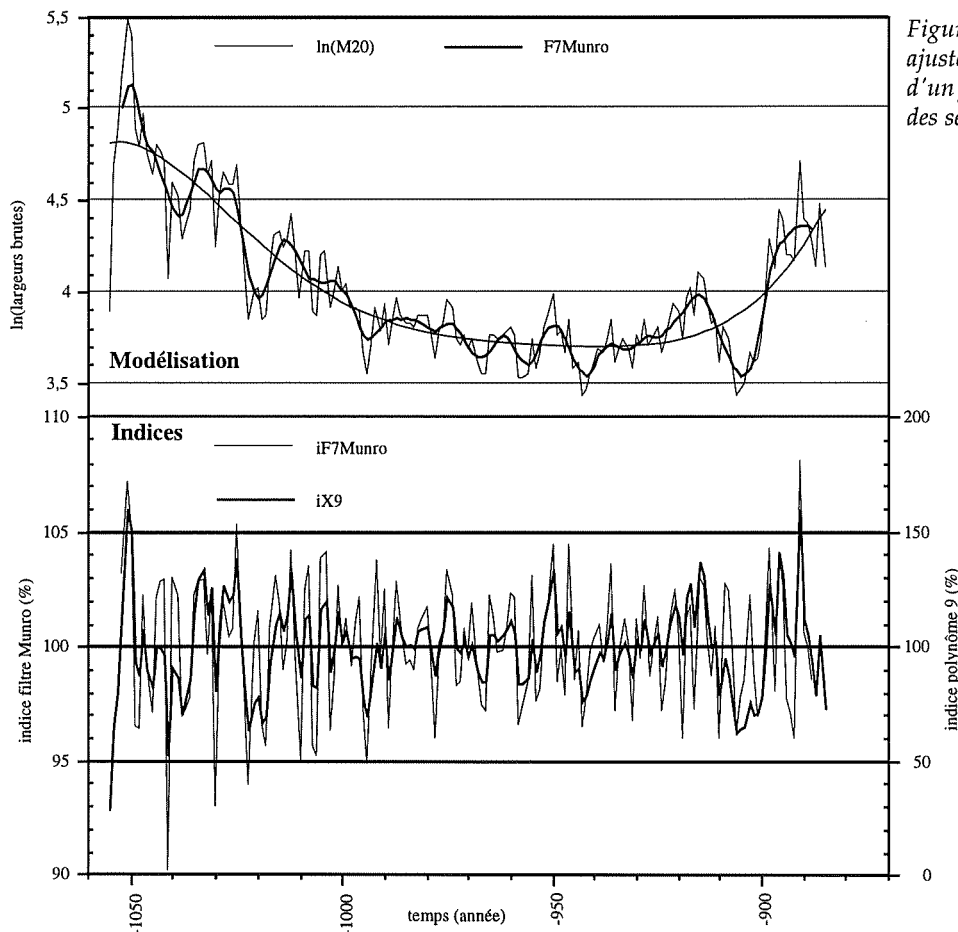


Figure 39 : comparaison d'un ajustement polynomial (degré 9) et d'un filtre exponentiel (n=3) ainsi que des séries d'indices correspondantes

Pour une valeur de  $n$  de quelques observations, le filtre est nettement plus flexible que les modèles déterministes (fig. 39). La variation de basse fréquence ainsi que la tendance de moyenne fréquence, sont prises en compte et peuvent être extraites. La comparaison des indices montre que l'indice polynomial conserve de la tendance qui implique que la série n'est pas stationnaire. Le filtre permet de conserver uniquement les variations incluses dans la fenêtre des  $(2n+1)$  observations utilisées, dans l'exemple des variations de périodes inférieures à 7 ans. La série d'indices ne montre pas de tendance à long et moyen terme (fig. 39).

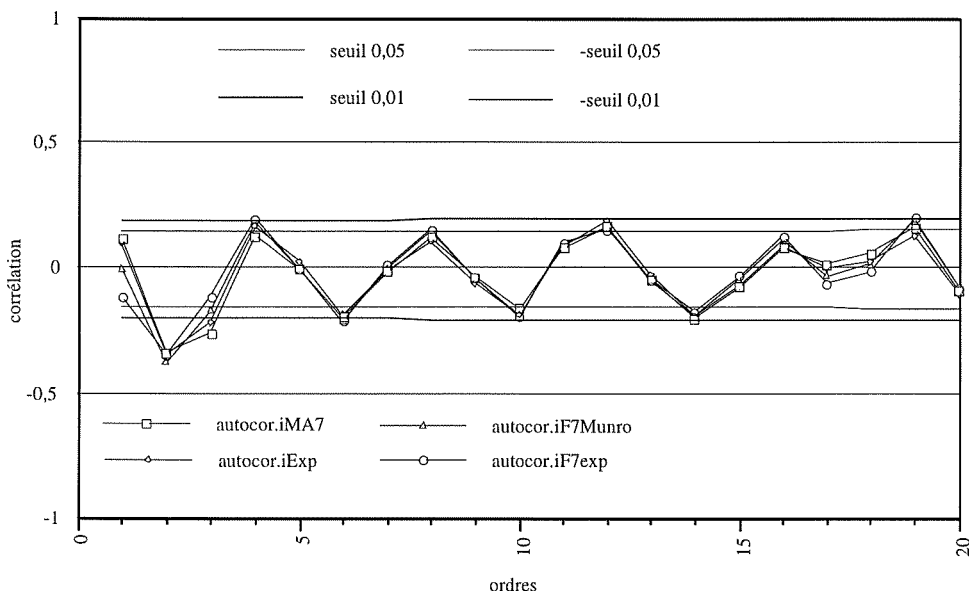


Figure 40 : fonctions d'autocorrélation de séries filtrées par plusieurs méthodes,  $n = 3$  pour toutes les séries, MA moyenne mobile (poids constants), Exp indice Except suppression du maximum et du minimum (cf. 4.2.2), Fexp filtre exponentiel (fonction des poids géométrique), FMunro fonction de poids publiée par MUNRO 1984.

Les valeurs des coefficients de la fonction d'autocorrélation de la série filtrée sont distribuées autour de 0 (fig. 40). Ceci est une caractéristique des séries stationnaires, cependant, cette distribution n'est pas aléatoire, des pseudocycles sont observés. De plus, certaines valeurs s'écartent suffisamment de 0 pour être considérées significatives. C'est particulièrement le cas de l'ordre 2 pour l'exemple (fig. 40). Il n'existe donc pas une indépendance totale de l'indice en fonction du temps. Il n'est pas parfaitement stationnaire. Le filtre supprime effectivement l'autocorrélation liée à la tendance mais induit une nouvelle structure d'autocorrélation. De façon générale, l'indice est inversement dépendant de celui qui le précède de 2 rangs. Des pseudocycles (de période inférieure à  $2n+1$ ) ont également été introduits dans la série (MUNRO 1984).

méthode	n	variance		autocorrélation			
		résidus	r1	r2	r3	r4	
0 MA5	2	7,63	-0,07	-0,51	-0,01	0,24	
0,5 F exp	2	3,9	-0,20	-0,39	0,01	0,20	
0,4 F exp	2	4,78	-0,17	-0,42	0,00	0,21	
0,3 F exp	2	5,59	-0,14	-0,45	0,00	0,22	
0,2 F exp	2	6,34	-0,11	-0,47	-0,01	0,23	
0,1 F exp	2	7,01	-0,09	-0,49	-0,01	0,23	
FMunro	2	6,64	-0,12	-0,46	0,00	0,22	
MA7	3	9,45	0,12	-0,33	-0,26	0,13	
Except	3	14,15	0,10	-0,33	-0,21	0,17	
0,5 F exp	3	4,46	-0,11	-0,34	-0,11	0,20	
FMunro	3	7,58	0,00	-0,37	-0,16	0,19	

L'utilisation d'une pondération des valeurs a été proposée pour limiter ces effets (fig. 38) (FRITTS 1976, MUNRO 1984). Il apparaît, d'une façon générale, que plus la décroissance des poids à partir de la valeur centrale est importante, plus la variance de l'indice est faible (tab. 18).

Tableau 18 : effet de la pondération sur la variance et l'autocorrélation des séries d'indices



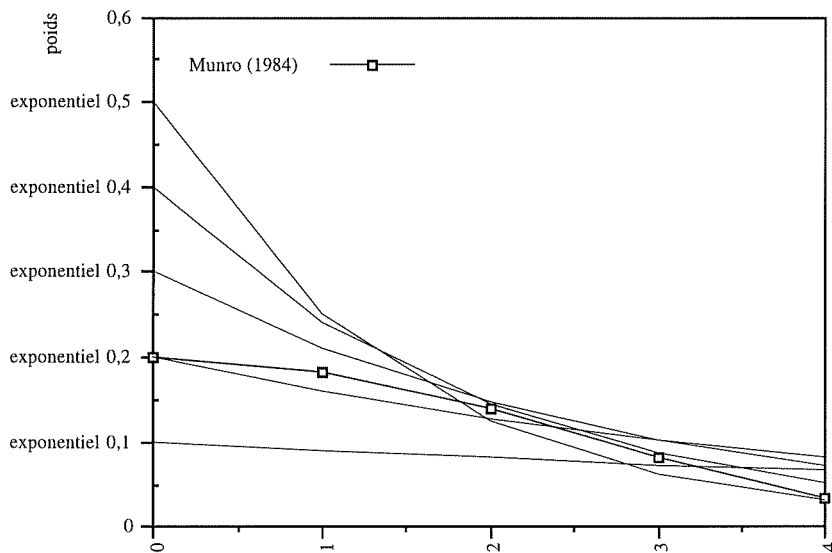


Figure 41 : poids en fonction du temps. filtre exponentiel :  $a(1-a)^i$  ( $a$  : constante,  $i$  rang) et publiés par MUNRO (1984)

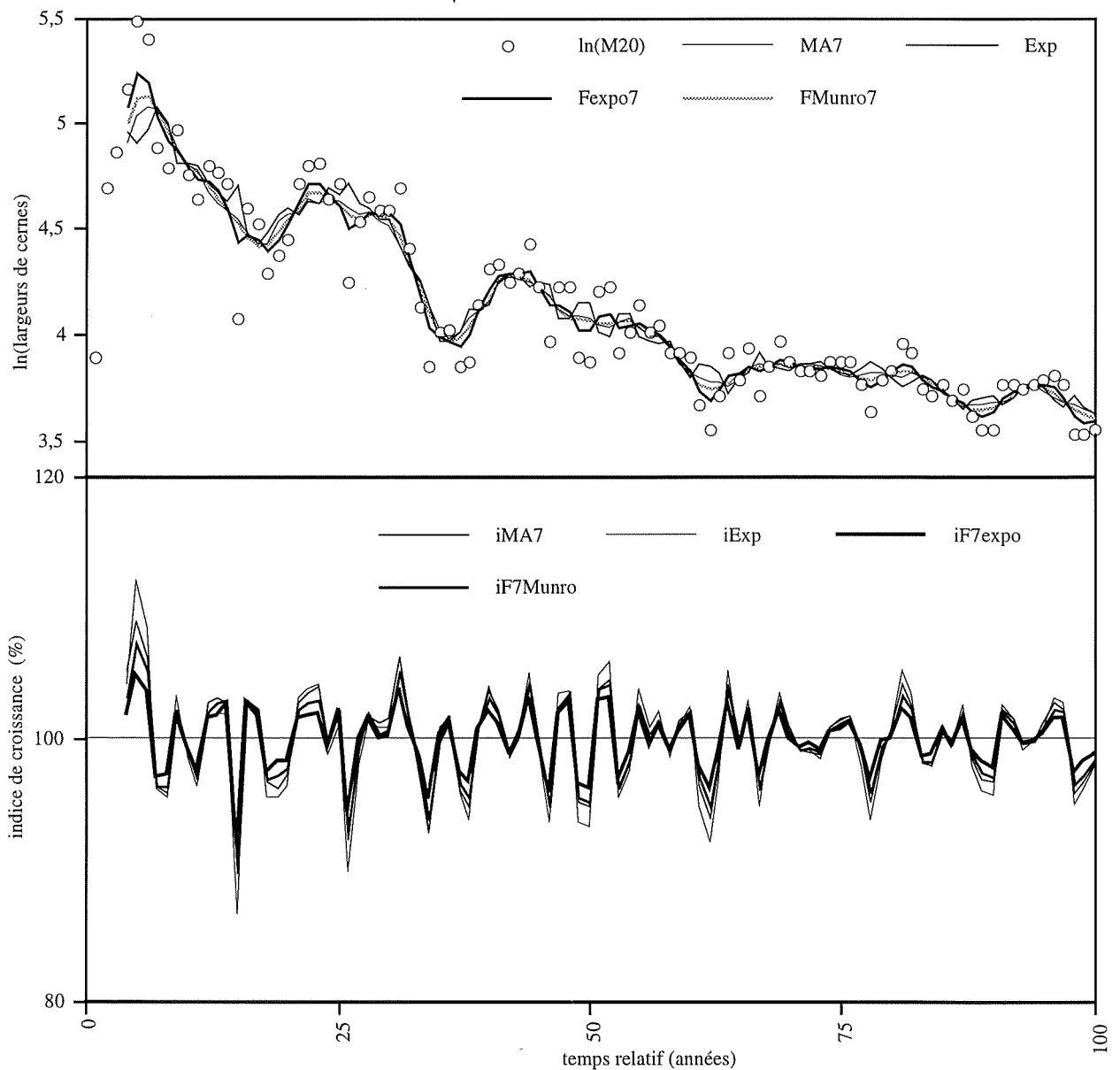


Figure 42 : ajustement de différents filtres ( $n=3$ ) au logarithme des valeurs brutes ( $\ln M20$ ) : MA7 : moyenne mobile, Exp : indice Except suppression du maximum et du minimum (cf. 4.2.2), Fexpo filtre exponentiel ( $a=0,5$ ), FMunro fonction de poids publiée par MUNRO (1984) et séries d'indices après filtrage

Une fonction exponentielle, classiquement utilisée en filtrage (TOMASSONE *et al.* 1993), permet de générer des poids dont la décroissance est modulable. Sur la figure 41, une liste de poids proposée par MUNRO (1984) est également comparée. La valeur centrale prenant plus d'importance lorsque les poids sont décroissants, la modélisation des données est d'autant plus ajustée. La figure 42 montre que le filtre exponentiel ( $a=0,5$ ) est le plus proche des données brutes, la moyenne mobile apparaît moins flexible et le filtre publié par MUNRO est intermédiaire. Les séries de résidus restent très comparables, toutefois l'amplitude des variations est inférieure pour le filtre le plus ajusté. La perte de variance se traduit par un amortissement de l'autocorrélation induite. La baisse est la plus sensible à l'ordre 2 mais l'autocorrélation d'ordre 1 est augmentée et les pseudocycles sont toujours présents (tab. 18). La figure 40 montre que la structure décrite précédemment reste typique même pour un filtre exponentiel dont la décroissance des poids est importante ( $a=0,5$ ).

#### 4.2.2 *Indice Except*

Le filtrage permet de comparer la largeur de cerne d'une année à un niveau moyen défini pour une courte période autour de cette année. On cherche à savoir si la largeur  $n$  est exceptionnellement petite ou grande par rapport à la production typique de la période. Dans les filtres décrits jusqu'ici, la moyenne de toutes les observations à l'intérieur de la fenêtre permet de définir la production typique. Toutefois, on peut se demander si le cerne le plus grand et le plus petit dans cette fenêtre sont bien représentatifs de cette production moyenne. En effet, ceux-ci peuvent être des valeurs extrêmes qui nuisent à la définition du niveau de base. Pour limiter cette influence, l'indice Except propose de ne pas tenir compte de ces deux cernes (LAMBERT et LAVIER 1992a, GASSMANN *et al.* 1996). De même, la valeur standardisée ne participe pas à l'évaluation de la production moyenne. Ainsi, d'une part l'indice produit et la valeur standardisée sont plus indépendants et d'autre part, lorsque la valeur standardisée est extrême, elle n'influence pas le niveau moyen. Le modèle est donc construit à l'aide des cernes d'une fenêtre sans tenir compte de la valeur la plus forte, de la plus petite et de la valeur standardisée. Le filtre est utilisé en routine au laboratoire de Chrono-écologie pour une fenêtre de 7 observations, dont 4 servent à l'estimation du niveau moyen local (3). Dans le même esprit qui consiste à comparer la valeur  $n$  à une production caractérisant la période, le rapport est réalisé entre l'écart à la moyenne et cette moyenne (2).

La standardisation porte sur le logarithme des valeurs brutes ( $R_t$ ) (1).

$$R'_t = \ln (R_t) \quad (1)$$

$$iE = \frac{R'_t - r_t}{r_t} \quad (2)$$

où l'estimation  $r_t$  est calculée selon (3) :

$$r_t = \frac{1}{4} * \sum_{R'_{t-3}}^{R'_{t+3}} R'_t - \max_{R'_{t-3}}^{R'_{t+3}} - \min_{R'_{t-3}}^{R'_{t+3}} - R'_t$$

La figure 42 montre que la modélisation produite par (2) est moins flexible que la moyenne mobile correspondante. Les deux modèles sont d'autant plus séparés que le minimum, le maximum ou la valeur standardisée sont écartés de la moyenne locale. Dans la série d'indices, ceci se traduit par une évaluation des écarts interannuels supérieure à celle de la moyenne mobile. Sur la figure 42, pour comparer la série d'indices Except aux autres filtres, la translation par la moyenne n'est pas prise en compte. La figure montre effectivement que les variations sont les plus amples avec le filtre Except. Les largeurs exceptionnellement petites ou grandes (localement) sont donc mieux mises en évidence par la méthode que par une moyenne mobile, ce qui est l'objectif principal de cette technique. En conséquence, la

variance de la série d'indices Except est plus élevée que celle des autres filtres. Dans le cas de l'exemple, le gain est important (tab. 18). En contrepartie de cette augmentation, l'autocorrélation est assez élevée. Elle reste significative pour l'ordre 2 (fig. 40 et tab. 18) et généralement supérieure à celle d'un filtre exponentiel ( $a=0,5$ ). Les coefficients restent très proches de ceux de la moyenne mobile (tab. 18). Ces valeurs sont propres à l'exemple utilisé mais il semble, de façon générale, que la structure d'autocorrélation induite par le filtre Except soit voisine de celle d'une moyenne mobile pour une variance de la série de résidus augmentée.

Le filtre Except permet d'obtenir une série d'indices dégagée des tendances de basse fréquence et de moyenne fréquence. Elle est proche d'une série stationnaire mais présente une autocorrélation induite. Son utilisation en routine au laboratoire de Chrono-écologie montre que cet indice est performant pour la datation (GUIBAL *et al.* 1991). Toutefois on peut se demander quelle est l'influence de l'autocorrélation sur la fonction de résultats obtenue avec le coefficient de corrélation (cf. 5).

#### 4.2.3 Choix de l'information conservée

La procédure proposée par BAILLIE et PILCHER (1973) pour standardiser les séries prend en compte 5 observations. L'indice Except (LAMBERT et LAVIER 1992a) porte ce nombre à 7. MUNRO (1984) montre pour un lot de croissances d'arbres vivants que le nombre de séries datées et le niveau de confiance les plus élevés sont atteints après suppression des signaux de périodes supérieures à 10 ans. Il apparaît également important d'essayer de conserver de l'information commune à toute la population qui peut être considérée dans le terme  $\partial D2t$  du modèle de GRAYBILL (cf. 3). Le nombre d'observations sur lequel porte la modélisation permet de moduler la flexibilité du filtre.

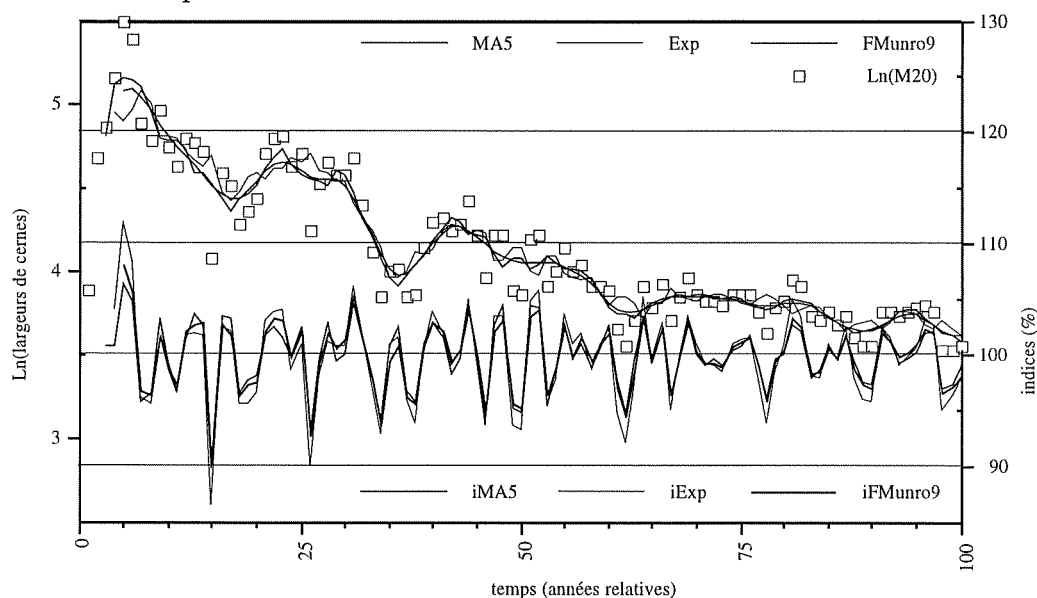


Figure 43 : standardisation par 3 procédures classiquement employées en dendrochronologie. MA5 : moyenne mobile (5 observations) (BAILLIE et PILCHER 1973), Exp : indice Except (LAMBERT et LAVIER 1992a), FMunro9 : filtre 9 observations (poids publiés par MUNRO 1984)

La comparaison graphique des séries d'indices produites par les trois méthodes précédentes indique que la prise en compte de tendances supplémentaires reste faible (fig. 43). Une méthode de modélisation, qui n'est pas utilisée classiquement en dendrochronologie, est employée dans l'objectif de rechercher si la conservation dans la série d'indices d'une partie du terme  $\partial D2t$  permet d'améliorer la qualité de la datation. L'objectif est davantage de tester l'intérêt et les influences sur la fonction de résultat, d'une prise en compte d'une part de

tendance que d'imposer un mode de calcul dans la fenêtre sélectionnée. La programmation ADE du Laboratoire de biométrie - génétique et biologie des populations (UMR 5558 CNRS) de l'Université Claude Bernard Lyon-1 (disponible librement à l'adresse internet : <http://pbil.univ-lyon1.fr/ADE-4>) permet de modéliser une série de données par une procédure faisant appel à une régression linéaire localisée à une fenêtre. La procédure est nommée LOWESS pour "robust locally weighted regression and smoothing scatterplots" à la suite de CLEVELAND (1985).

La régression locale utilise, pour chaque point à estimer, ses plus proches voisins. Leur participation à l'ajustement est pondérée par un poids fonction de la distance (fonction tricube) (CLEVELAND 1985). Pour la procédure utilisée, ADE LOWESS, l'ajustement d'une droite est réalisée en un point quelconque de la fenêtre à l'aide de  $n$  voisins. L'ajustement est décalé point par point. Le nombre de voisins est variable et permet d'obtenir un ajustement flexible. Le logiciel fournit des possibilités graphiques et une aide à la sélection du nombre de voisins. On peut remarquer sur la figure 44 la prise en compte progressive de la tendance dans la série d'indices.

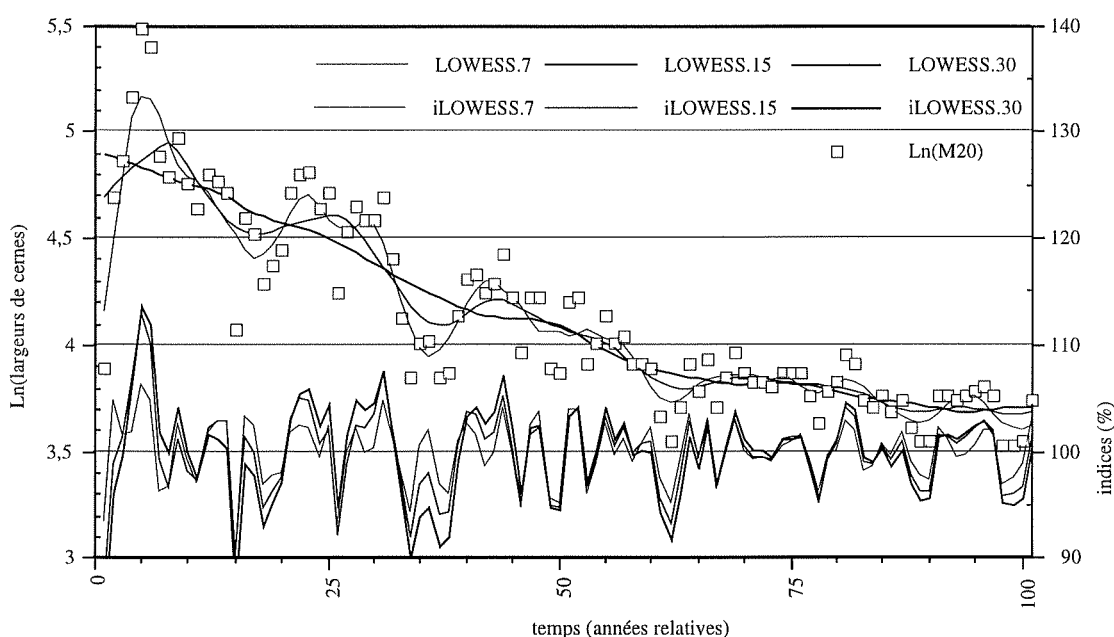


Figure 44 : modélisations LOWESS et séries d'indices correspondantes. LOWESS.7 : 7 observations voisines, LOWESS.15 : 15 voisins, LOWESS.30 : 30 voisins

La structure d'autocorrélation décrite précédemment pour les autres filtres (fig. 40) est également observée avec la modélisation LOWESS réalisée avec une fenêtre de 7 observations (fig. 45). La conservation de tendance dans la série d'indices induit une modification de la fonction. Lorsque 30 observations sont utilisées, celle-ci acquiert les caractéristiques observées dans le cas des ajustements de fonctions et des valeurs brutes (fig. 37 et 32). L'autocorrélation d'ordre 1 est très significative, puis la signification baisse sur plusieurs ordres (fig. 45). Cette série ne peut être jugée stationnaire et indique une période limite pour le signal à conserver. La modélisation à partir de 15 observations présente une autocorrélation d'ordre 1 significative mais très diminuée par rapport à celle observée avec 30 voisins. Le coefficient d'ordre 2 est proche de 0 et les pseudocycles sont plus amortis et de période plus longue que dans le cas de la fenêtre de 7 observations. Comme dans le cas des filtres de plus haute fréquence, la série n'est pas stationnaire au sens strict. Des coefficients sont significatifs. Il est important de juger de l'influence de cette autocorrélation sur la fonction de résultats entre deux séries à synchroniser (cf. 5.4).

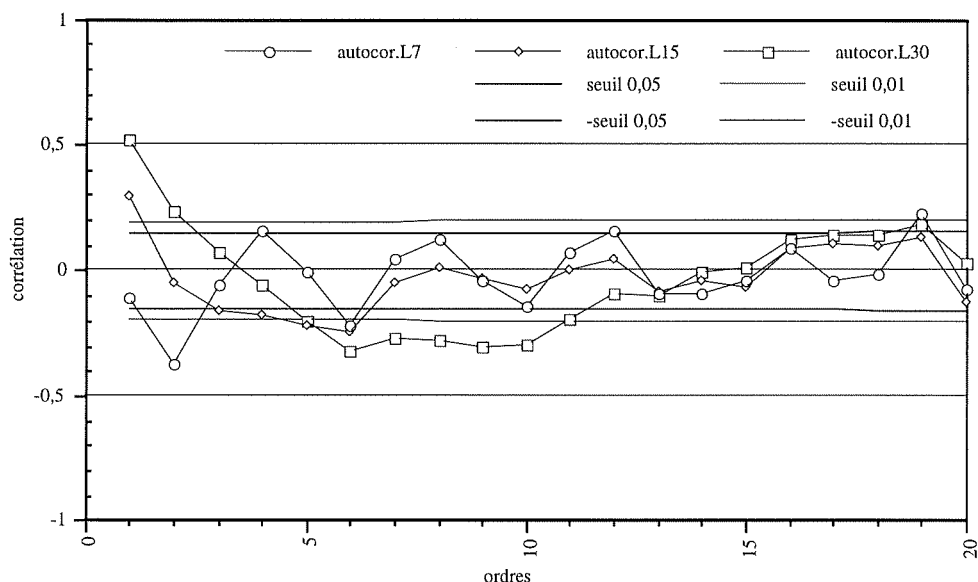


Figure 45 : fonction d'autocorrélation des séries d'indices obtenues par modélisation LOWESS. L7 : 7 voisins, L15 : 15 voisins, L30 : 30 voisins

Le signal est conservé sur la base de sa période dans la série de valeurs brutes. Le modèle conceptuel de GRAYBILL indique qu'une part des variations de moyenne fréquence est commune à toute (ou presque) la population. L'observation des profils de croissances lors des datations nous fait également supposer que des séquences de quelques cernes, qui présentent des variations communes pour différents arbres sont mal considérées par des standardisations produisant un signal de haute fréquence. Par exemple, la période de recouvrement suivant un stress peut être de même type pour toute la population alors que le modèle s'ajuste parfaitement à la tendance et l'élimine de la série d'indice. Toutefois, le filtre retient les signaux inférieurs à une fréquence donnée quelle que soit sa source. Les tendances propres à l'individu (terme  $\partial D1t$  de GRAYBILL) sont conservées sans distinction. Il faut donc justifier le choix d'augmenter la période des signaux conservés.

Si la qualité de la datation, c'est-à-dire du synchronisme entre la croissance testée et la croissance régionale, est améliorée par la prise en compte de signaux de fréquences moins élevées, on peut alors supposer que leur source est d'échelle régionale. La corrélation entre les séries du site doit également augmenter. Le signal commun aux individus peut être testé à l'aide du rapport signal / bruit (COOK *et al.* 1990).

#### 4.2.4 Indice de HOLLSTEIN

Au même titre que le filtrage, la différentiation est un procédé d'élimination de la tendance d'une série chronologique qui est utilisée couramment (TOMASSONE *et al.* 1993). Lorsque la série présente des caractéristiques d'homogénéité de variance, la différence entre les observations consécutives est utilisée.

Les largeurs brutes n'ayant pas cette caractéristique, la formule de HOLLSTEIN (1980), revue par RINN (1989) est plus adaptée.

$$iH = \log \frac{R_t}{R_{t+1}}$$

$R_t$  : largeur brute de l'année t,  $R_{t+1}$  : largeur brute de l'année t+1

Elle reste une façon d'exploiter la différence entre deux cernes consécutifs. De ce fait, la valeur d'une année est en elle-même un écart : un indice fort signifie une forte augmentation de la largeur par rapport à l'année antérieure et un indice faible une chute de production. Ainsi, il est courant d'observer des effets de "contrepoint" dans les séries d'indices de Hollstein. Un indice faible est immédiatement suivi d'un indice très fort, car dans la série en largeur brute, les deux variations (perte de largeur puis reprise) sont très significatives. Il est possible de montrer que la valeur de l'indice d'une chronologie moyenne pour une année donnée a une valeur absolue d'autant plus grande que les variations interannuelles des séries individuelles qui composent la moyenne sont concordantes (GIRARD CLOS 1992). L'indice permet donc de faire ressortir les intervalles particuliers et produit un signal de très haute fréquence exempt de toute tendance (fig. 46). Cette standardisation est utilisée en routine suivie d'une estimation du synchronisme par le coefficient de corrélation (RINN 1989).

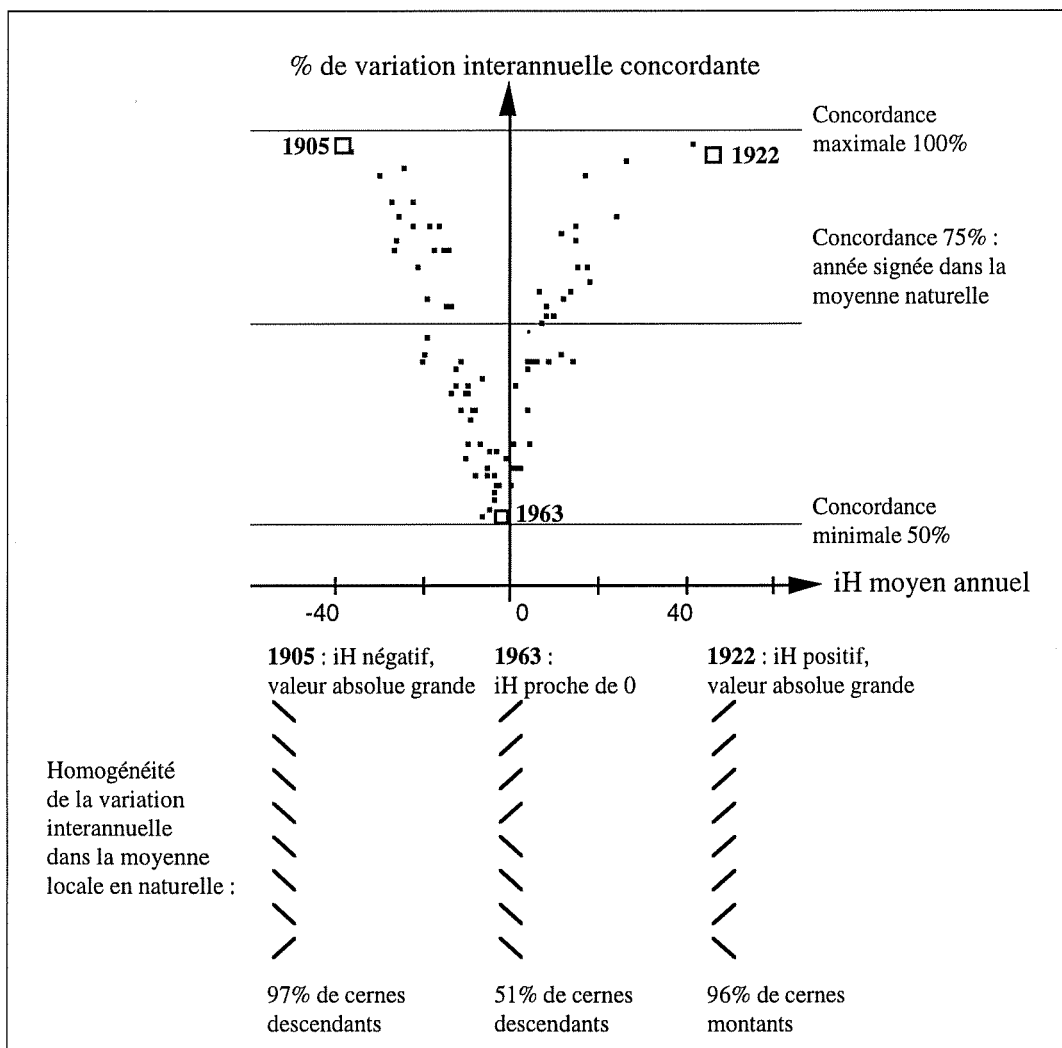


Figure 46 : relation entre l'indice de HOLLSTEIN et la concordance des pentes entre les séries

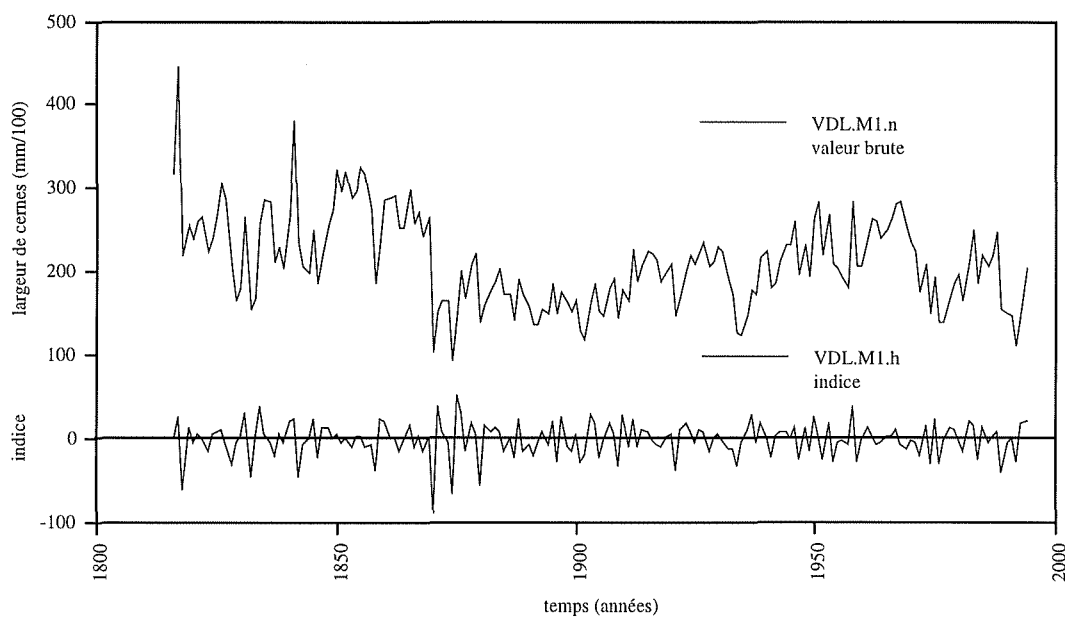


Figure 47 : standardisation en indice de HOLLSTEIN

## 5 Test de synchronisme avec données standardisées

### 5.1 Coefficient de corrélation

A la condition que les deux séries d'indices (X et Y) à synchroniser puissent être jugées quasi stationnaires, s'il existe une relation linéaire entre les deux séries, celle-ci est liée au signal de haute fréquence uniquement. La mise en évidence de cette relation permet de supposer que les cernes contemporains sont synchronisés à un risque d'erreur près.

Le coefficient de corrélation (r) mesure la qualité de la relation linéaire entre deux séries sans qu'aucune dépendance entre celles-ci ne soit supposée. Les séries dendrochronologiques sont en fait corrélées car elles sont dépendantes d'une partie d'un même système de facteurs. La force de la corrélation entre deux séries est alors une mesure de la similarité des sous-systèmes de facteurs qui influencent les croissances.

Le coefficient (r) est défini par :

$$r_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - x_m)}{S_x} * \frac{(y_i - y_m)}{S_y}$$

où  $x_i$  et  $y_i$  sont les  $i$ -èmes observations des séries,  $x_m$  et  $y_m$  leurs moyennes,  $S_x$  et  $S_y$  leurs écart-types et  $n$  le nombre d'observations communes aux deux séries ou chevauchement.

Le coefficient peut être vu comme une moyenne de  $n$  produits qui sert d'estimation de la relation linéaire entre les populations dont X et Y sont des échantillonnages. Cette estimation (r) sera d'autant représentative du coefficient liant les populations (r) que  $n$  sera grand et que X et Y représenteront bien leur population. En dendrochronologie, en pratique, les corrélations ne sont pas calculées, sauf exceptions, avec moins de 30 observations. La décision de synchronisme entre les deux séries nécessite, en fait, une meilleure estimation de (r). Il n'existe pas un seuil de  $n$  unique puisque la représentativité de X et Y intervient. On juge généralement que la représentativité est fonction du nombre de séries individuelles analysées. Plus le nombre de séries est élevé, meilleure est la représentation de la chronologie

moyenne. Il peut toutefois être montré que la qualité des séries individuelles intervient, ce qui justifie l'homogénéisation des chronologies moyennes (cf. 6). 50 cernes semblent toutefois un minimum pour dater une séquence moyenne d'au moins 10 bois, et 120 cernes peuvent permettre de dater un individu isolé comme une pirogue (GUIBAL 1991).

Pour synchroniser les deux séries, le coefficient de corrélation est calculé dans chaque position de chevauchement possible pour n supérieur à un seuil de signification (par exemple 30) (fig. 48). La liste des coefficients peut être produite dans l'ordre décroissant par le programme "calculer" (LAMBERT) ou comme une fonction du temps, dans l'ordre des positions de chevauchement. Le résultat de la recherche n'est donc pas une valeur unique mais une nouvelle fonction du temps.

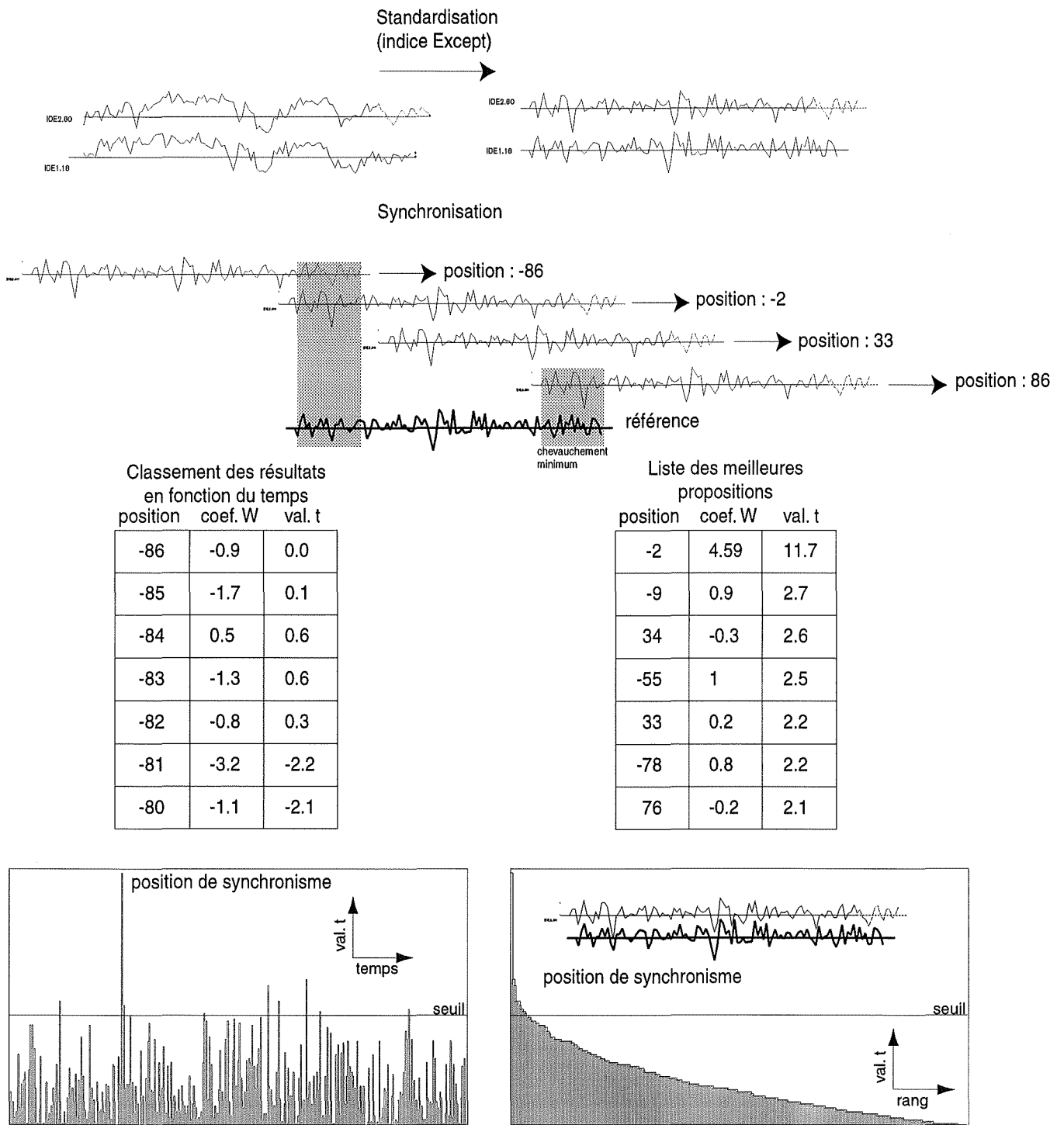


Figure 48 : schématisation de la recherche du synchronisme par glissement des séries



---

## 5.2 Le test de Student et la sélection des dates

La valeur absolue du coefficient de corrélation ( $r$ ) varie de 0 à 1. Plus cette valeur s'éloigne de 0 plus la force de la corrélation est grande. Une valeur proche de 0 signifie qu'il n'y a pas de relation linéaire entre les séries. Le signe indique le sens de la corrélation. Lorsqu'il est positif la relation est directe. Ce qui signifie qu'une forte valeur de X est associée à une forte valeur de Y. Lorsque le signe est négatif, la relation est opposée. Une faible valeur de X correspond à une forte de Y.

La synchronisation entre les deux séries est acquise lorsque le coefficient de corrélation, positif, peut être jugé différent de 0. Pour prendre cette décision, l'hypothèse  $r=0$  est testée.

La valeur  $t$  est produite en divisant le coefficient ( $r$ ) par sa variance ce qui peut être rapproché d'une transformation de Fisher, et peut s'écrire :

$$t = \frac{r_{xy} \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}}$$

Si les deux séries X et Y peuvent être jugées stationnaires alors la probabilité associée à la valeur  $t$  peut être lue dans la table de Student à  $(n-2)$  degrés de liberté (ZAR 1996). Si l'hypothèse est rejetée, le coefficient est jugé différent de 0 à un risque d'erreur près ( $\alpha$ ).

La valeur  $t$  est calculée pour chaque chevauchement par glissement. Le résultat est donc une série de valeurs en fonction du temps (fig. 48). En utilisation courante, la liste des valeurs est souvent ordonnée dans l'ordre décroissant puisque l'objectif est de sélectionner la position de synchronisme parmi les valeurs  $t$  les plus élevées. Une valeur  $t$  seuil, ou un nombre de calculs maximum, est déterminé pour ne conserver que les meilleures positions de chevauchement. Ces positions sont appelées des propositions de date.

L'opérateur vérifie ensuite graphiquement (souvent sur une table lumineuse) les variations des séries dans les positions concernées. Il s'assure que le résultat n'est pas biaisé par des valeurs extrêmes ou par un nombre de cernes trop faible... Mais surtout, il tente d'intégrer des informations supplémentaires, dont le calcul ne tient pas directement compte, comme le nombre de séries qui composent une chronologie moyenne, un passage de la croissance obtenu dans des conditions plus ou moins favorables ou encore des variations qui sont plus ou moins bien prises en compte par la standardisation ... Cette dernière peut être réalisée de plusieurs manières et les deux estimateurs du synchronisme (coefficient de corrélation et coefficient de coïncidence) sont souvent comparés.

Les informations qui sont considérées lors de la vérification peuvent être divisées en deux ordres. D'une part, les résultats de différents calculs sont confrontés et leurs conditions statistiques d'application sont vérifiées. D'autre part, des informations étrangères aux calculs sont prises en compte. Lorsque les séries proviennent d'une structure archéologique homogène et que les prélèvements comportent de l'aubier, la position de leur *terminus* est prise en considération. Lorsqu'une datation  $14C$  est associée à l'analyse de la croissance, la période de recherche sur les références est réduite. Dans de rares cas, les graphiques présentent des caractéristiques qui permettent de synchroniser les croissances alors que ces caractéristiques ne sont pas traduites par des résultats de corrélation satisfaisants. C'est principalement le cas de séries comportant peu de cernes mais qui présentent une marque temporelle bien identifiable ou de longues séries dont les variations sont peu amples ... Cette exploitation d'informations extérieures au calcul de probabilité est nécessaire et très peu de dendrochronologues l'éliminent complètement.

---

Toutefois, il est primordial de conserver une indépendance vis-à-vis des informations extérieures aux calculs et d'estimer l'influence sur les chronologies produites de leur considération. Une voie semble être la définition globale d'une qualité de datation. Au laboratoire de Chrono-écologie, deux types de dates sont communiquées : une date est dite "acquise" lorsqu'elle peut être considérée quasi certaine (le risque d'erreur est très faible) et "proposée" lorsque des informations externes au calcul ont du être employées. Un système de trois classes peut être élaboré (d'après une communication orale d'André Billamboz) :

A : dates avec valeur de risque associé infime

B : dates dont le risque associé est proche des valeurs seuils

C : dates nécessitant des informations extérieures.

### 5.3 Estimations du risque

La valeur  $t$  suit une distribution de Student (THOMAS 1976) ce qui permet de déterminer la probabilité qui lui est associée. Le risque ( $\alpha$ ) est calculé en retirant cette probabilité à 1. Ce calcul est classique et permet notamment le test d'hypothèse de différence de moyennes (ZAR 1996). Cependant, les conditions d'utilisation en dendrochronologie sont particulières pour au moins deux raisons :

\*  $n$ , le nombre de cernes chevauchant, est souvent très nettement supérieur à 30, il est couramment entre 50 et 120 et peut atteindre 380 comme dans le cas de la chronologie de la Brière voire bien davantage pour les longues références. Ceci induit un degré de liberté pour la valeur  $t$  qui est très largement supérieur à ce qui est utilisé dans un test de Student "classique", celui-ci étant prévu pour des échantillons restreints. Dans ces conditions, la loi de Student s'approche en fait très fortement d'une loi Normale.

\*\* Dans un test "classique", une seule valeur  $t$  est produite et permet la décision. Ici, la décision est en fait réalisée en choisissant parmi de nombreuses valeurs  $t$ . Ce nombre est fonction de la période de recherche. Lorsqu'une chronologie moyenne est datée sur une référence, il dépasse 1000 et lorsque les séries individuelles d'un site sont synchronisées, il atteint quelques dizaines pour chaque paire.

Ces conditions d'utilisations font que le risque ( $\alpha$ ) ne peut être utilisé directement. En effet, rechercher la valeur  $t$  la plus élevée en réalisant beaucoup de comparaisons entre deux séries et la tester ensuite comme si elle était unique, aboutit à une exagération de la signification de cette valeur (ORTON 1983).

De plus, les valeurs produites dans ces conditions sont très faibles (généralement inférieures à 1‰) et produisent une incompréhension lors de leur communication. Le risque doit en effet être inférieur à l'inverse de la période de recherche. Un risque de 1‰ apparaît alors souvent comme un maximum (cf. chap. 2 1.4.4).

De ce fait, le risque n'est en général pas explicitement calculé en dendrochronologie. Des seuils empiriques ont été définis directement à partir de la valeur  $t$  et également du coefficient  $W$  pour le test de ECKSTEIN. BAILLIE (1995) propose une valeur  $t$  de Student seuil de 3,5. LAMBERT *et al.* (1988), en supposant la distribution du coefficient  $W$  de

---

ECKSTEIN normale, propose la valeur de 3,09 correspondant au risque ( $\alpha$ ) de 1%. Il est très généralement admis que des valeurs t inférieures à 2 n'ont pas de sens dendrochronologique (JANSMA 1995).

Toutefois, selon le contexte, ces valeurs sont relativisées. On peut attendre une valeur supérieure à 3,5 lorsque la moyenne de site et la référence sont convenablement représentatives et issues d'une même région biogéographique. Par contre, deux arbres actuels se développant dans des conditions locales différentes, même soumis à un climat identique, peuvent fournir deux séries qui corréleront avec une valeur t inférieure à 2. C'est sur ces valeurs qu'est basée la relation entre le calcul et les informations supplémentaires que le dendrochronologue utilise. Elles ont de plus une définition qui tend à être très généralisée (SANDER et LEVANIC 1996).

Le risque de retenir une corrélation erronée peut être calculé non pas à partir de la valeur même du coefficient mais sur la base de son choix parmi la liste de propositions. La démarche revient à estimer avec quelle force la valeur sélectionnée ( $t\alpha$ ) se dégage des autres propositions. La probabilité ( $\alpha'$ ) qu'une ou plusieurs valeurs t soient supérieures à  $t\alpha$  est fournie par (1) ORTON (1983) :

$$\alpha' = 1 - (1 - \alpha)^N \quad (1)$$

$\alpha'$  peut être jugé significatif, de façon classique, pour un seuil de 5%. N est le nombre de valeurs t obtenues entre les deux séries. Dans le cas général, pour deux séries de  $n_1$  et  $n_2$  cernes chevauchant d'au moins  $\mu$  cernes, N est fourni par :

$$N = n_1 + n_2 - 2\mu$$

Cependant, dans le cas d'une datation sur une grande référence,  $n_1$  est très supérieur à  $n_2$  et  $\mu$ . N est alors proche de la longueur de la période de recherche. Si  $\alpha$  est faible alors l'expression (1) est peu différente du produit entre le risque d'erreur issu de la table ( $\alpha$ ) et (N) la longueur de la période de recherche :

$$\alpha' \approx N\alpha$$

Ce produit montre que le calcul de  $\alpha'$  revient en fait à comparer la valeur obtenue pour une synchronisation particulière par rapport au nombre de calculs réalisés et ainsi de vérifier que ce risque est inférieur à l'inverse de la période de recherche. Ceci garantit que la synchronisation n'est pas reproductible avec la même confiance sur la période de recherche (cf. chap. 2 1.4.4).

Inversement dans une situation de datation donnée, il est possible d'obtenir une valeur de t critique pour laquelle le risque associé selon (1) est  $\leq 5\%$  (ORTON 1983). Une seule valeur t seuil ne peut être définie car pour un risque donné, elle est fonction du nombre de cernes considérés et de la longueur de la période de recherche. La figure 49 présente les valeurs de t nécessaires pour que ( $\alpha'$ )  $\leq 0,5$  en fonction de N variant de 50 à 1200 pour quelques degrés de liberté (le ddl est égal au nombre de cernes chevauchant moins 2). On remarque que la valeur t nécessaire est d'autant plus grande que le nombre de cernes est faible et que N est élevé. Pour une situation critique qui serait de comparer une série d'environ 50 cernes à une référence de 1000 ans, une valeur t supérieure à 4,22 est nécessaire pour assurer un risque de 5%. Dans le cas plus typique où la série à dater comporte 100 cernes, une valeur de 4,04 est requise. Si la période de recherche est diminuée, comme dans le cas d'un contexte archéologique assez vaste (500 ans) ou d'une datation 14C en parallèle (300 à 500 ans) la

valeur pour 100 cernes de chevauchement est comprise entre 3,60 et 3,85. Ces valeurs sont un peu supérieures aux seuils empiriques qui estiment une limite inférieure à ne pas dépasser mais sont très proches de la réalité de la définition des dates acquises. Ce calcul du risque permet donc de relativiser la valeur d'un coefficient par rapport aux conditions de calcul et aiderait à déterminer un risque global de la datation plus facilement communicable aux utilisateurs du résultat.

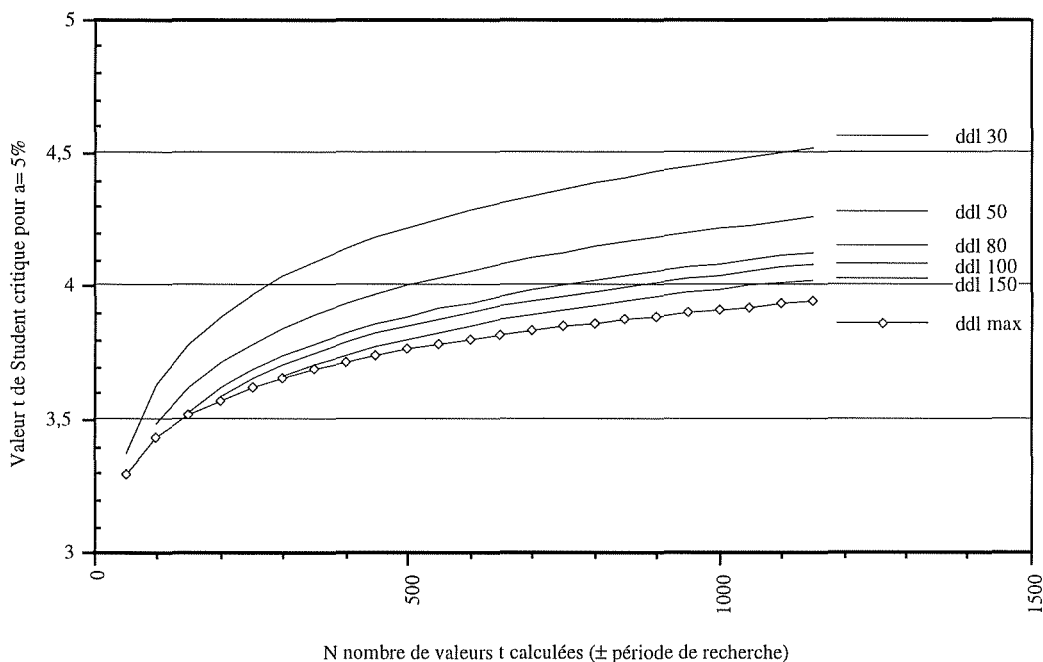


Figure 49 : valeur t nécessaire pour que le risque d'erreur soit inférieur à 5% en fonction du nombre de cernes de chevauchement (ddl) et de N la période de recherche

#### 5.4 Influence de l'autocorrélation des séries sur la fonction de résultat de corrélation

La standardisation par les méthodes de filtrage se traduit par une autocorrélation induite. De façon générale, il existe un lien inverse entre le cerne de l'année n et celui qui suit de deux années. Des pseudocycles induisent un lien alternativement direct et indirect à intervalles de temps plus ou moins réguliers. Les séries présentent une structure d'autocorrélation qui est de même type puisqu'elle est induite par les méthodes de calcul. En conséquence, lorsque que deux séries sont comparées par glissement, dans les positions où les pseudocycles sont en coïncidence, le coefficient de corrélation s'écarte de 0 par artefact. Si les pseudocycles sont en opposition le coefficient prend une valeur négative. Si les séries corrélaient effectivement dans une position donnée (p), l'autocorrélation négative d'ordre 2 induit une corrélation opposée entre les deux séries à des positions qui encadrent (p) de quelques années (fig. 50).

Les séries, comportant 89 et 92 cernes, issues de deux arbres vivants échantillonnés la même année servent d'exemples pour observer les artefacts de la standardisation sur leur corrélation en fonction du temps (fig. 50). 110 valeurs t sont calculées en faisant glisser une série sur la seconde de telle sorte qu'au moins 30 cernes soient en regard. Les distributions en fonction du temps des valeurs t montre des pseudocycles pour toutes les standardisations (fig. 50). Les filtres Except et exponentiel portent sur la même fenêtre (7 observations). La pondération exponentielle forte (a=0,5) induit une série d'indices de variance nettement inférieure à celle des indices Except (cf. 4). La perte de variance est accompagnée d'un amortissement de l'autocorrélation qui ne se traduit cependant pas par une modification

importante des pseudocycles. Lorsque la fenêtre de calcul est élargie, ceux-ci deviennent plus évidents. La conservation de signal de plus basse fréquence favorise l'introduction des pseudocycles dans la série d'indices.

L'autocorrélation d'ordre 1 croît également avec l'élargissement de la fenêtre (tab. 19). Cette augmentation a pour conséquence l'élévation des valeurs  $t$  une année avant et après la position de synchronisme. Ce rapprochement des valeurs peut induire une ambiguïté dans le choix de la position de synchronisme dans le cas d'une datation.

positions	iExp	iFexp7	iL15	iL30
-3	1,65	0,91	2,78	3,42
-2	4,42	4,15	5,5	4,87
-1	-0,27	-1,41	1,08	1,32
r1 série1	0,14	-0,05	0,24	0,49
r1 série2	0,07	-0,17	0,27	0,5

Tableau 19 : valeur  $t$  de Student entre les deux séries autour de la position de synchronisme (position -2) et autocorrélation d'ordre 1 ( $r1$ ). iExp : indice except, iFexp7 : filtre exponentiel ( $a=0,5$   $n=3$ ), iL15 : LOWESS 15 voisins, iL30 : LOWESS 30 voisins.

Pour toutes les procédures, la valeur  $t$  la plus élevée, parmi les 110, correspond à la position de synchronisme en accord avec la date de prélèvement. A cette position, la valeur  $t$  la plus grande est observée après la standardisation qui utilise 15 observations. On peut supposer que le signal de plus basse fréquence que pour la fenêtre de 7 observations, prend une part dans la valeur du coefficient de corrélation. L'intégration de tendance n'est plus favorable avec 30 voisins.

Les risques ( $\alpha$ ), directement lus dans la table de Student, correspondant aux valeurs  $t$  de la position de synchronisme sont compris entre  $4 \cdot 10^{-5}$  et  $2 \cdot 10^{-7}$  (fig. 50). Le nombre de calculs (110) reste assez faible. Dans ces conditions, la valeur critique de ORTON s'élève à 3,4 pour un ddl de 81 (recouvrement maximum) et à 3,6 pour un ddl de 28 (recouvrement minimum autorisé  $\mu$ ). Les résultats observés sont tous très supérieurs au seuil critique : ils sont donc très significatifs vis-à-vis des conditions de calcul. (Les deux arbres sont en fait supposés contemporains si la recherche se limite à comparer leur croissance).

La valeur  $t$  la plus élevée est observée après la modélisation LOWESS.15. Les distributions en fréquence des 110 valeurs  $t$  montrent que c'est également avec cette standardisation que la valeur  $t$  à retenir est la plus rejetée du reste de la distribution.

MUNRO (1984) remarque que les distributions des valeurs  $t$  ne suivent pas strictement une loi Normale réduite. Ceci implique que le calcul de probabilité proposé par ORTON (1983) n'est pas exactement vérifié. Il montre qu'utiliser une valeur  $t'$  issue de (2) (centrée normée) présente l'avantage de ne plus considérer *a priori* la distribution des valeurs  $t$  Normale.

$$t' = (t\alpha - t_m) / St \quad (2)$$

où  $t\alpha$  est la valeur testée,  $t_m$  est la valeur  $t$  moyenne,  $St$  l'écart-type des valeurs  $t$ .

Le risque  $\alpha''$  est alors fourni par (MUNRO 1984) :

$$\alpha'' \leq N * pr(t_{N-2} > t')$$

où  $N$  est le nombre de valeurs  $t$  calculées.

De plus, cette méthode permet de prendre en compte, en partie, les caractéristiques des distributions. Le risque, selon le calcul de MUNRO, associé à la valeur  $t=4,14$  obtenue

avec le filtrage exponentiel s'élève à 10% (fig. 50). La valeur n'est pas jugée significative car elle ne se "dégage" pas suffisamment des "propositions concurrentes". La valeur  $t=4,42$ , correspondant à la standardisation Except, se dégage plus nettement ( $\alpha=8\%$ ) mais le seuil de 5% n'est pas atteint. Inversement, le risque est très faible (2%) dans le cas de la standardisation LOWESS.15 car la valeur  $t$  extrême est élevée et se dégage fortement des autres propositions. Le risque d'erreur associé à la synchronisation peut être considéré comme infime. Ces résultats peuvent être appréciés visuellement sur les distributions (fig. 50).

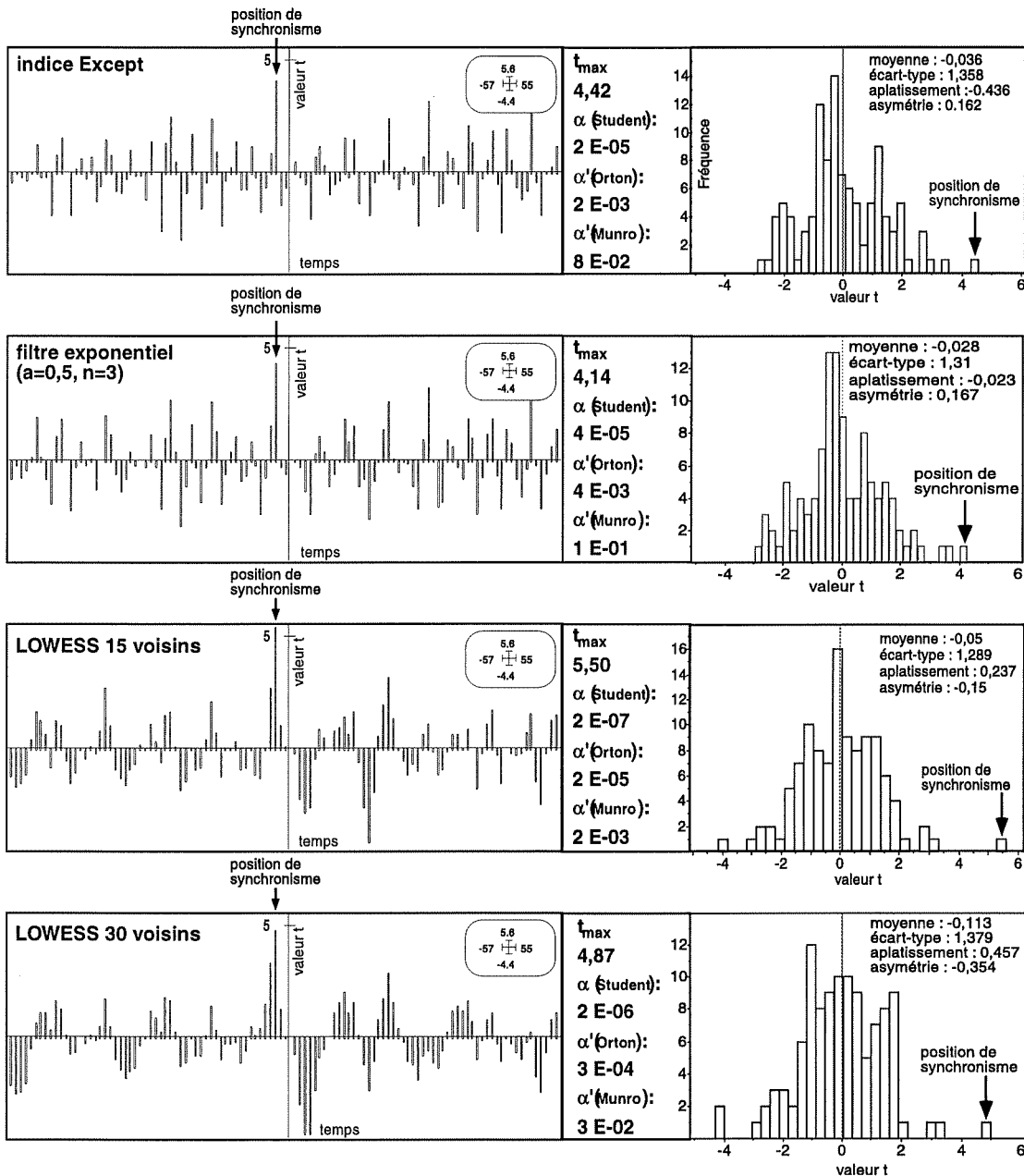


Figure 50 : influence de l'autocorrélation induite par la standardisation sur la corrélation entre deux séries. Fonctions de corrélation et distributions des valeurs  $t$  en fréquence (les paramètres descriptifs des distributions sont calculés sans la valeur extrême)

La méthode de standardisation a donc une grande importance sur la valeur de la corrélation entre les séries par deux biais :

\* elle permet de sélectionner l'information commune aux séries et d'amortir les particularismes.

\*\* mais elle induit une autocorrélation qui influence la corrélation en fonction du temps.

---

La confrontation de résultats obtenus avec des standardisations qui intègrent des signaux de période progressivement plus longue permet de concilier les deux influences. Le choix de la date parmi la liste de propositions doit présenter le moins d'ambiguïté possible pour que le risque soit minimum. Les seuils empiriques permettent de définir des limites que le dendrochronologue peut compléter par des informations supplémentaires mais il semble important de justifier en dernière évaluation les choix réalisés par une estimation du risque d'erreur encouru. Les calculs de probabilité en dendrochronologie sont largement influencés par la nature des données, plusieurs évaluations du risque aboutissent à des valeurs très différentes. Il est donc probablement préférable de généraliser les résultats sous forme de classes. Toutefois, il faut reconnaître différents niveaux de sécurité des datations et les interpréter en conséquence. Dans le cas de l'exemple, tous les indicateurs tendent à montrer que pour les 4 standardisations réalisées, la conservation de signaux de période inférieure à 15 ans est la plus bénéfique pour la datation qui est alors créditée d'un risque d'erreur infime.

## 6 Représentativité des chronologies moyennes

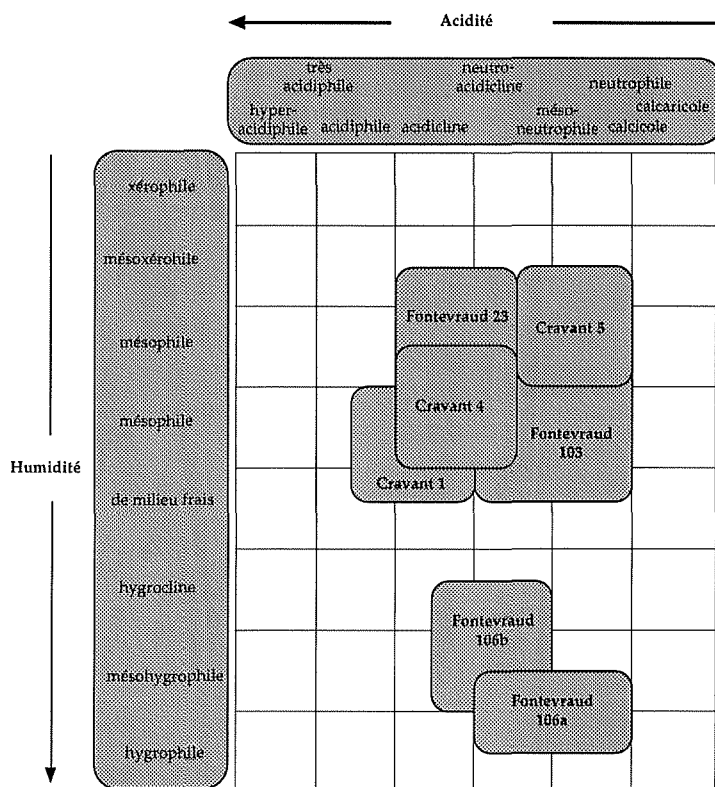
Comme il est possible de ce demander quel signal dans les séries est susceptible d'être exploité pour la datation, on peut se demander si l'intégration dans la chronologie moyenne d'un individu apporte toujours un potentiel de datation supplémentaire. La quantité des séries est très souvent limitante dans l'analyse des sites archéologiques ce qui conduit les laboratoires à considérer la totalité des séries obtenues. La qualité de la série n'est donc pas classiquement prise en compte. La datation de quelques sites dans les chapitres suivants (2 et 3) montre qu'une part faible (en nombre) des séries sélectionnées parmi celles intégrées à une moyenne de site permet de très bien la représenter et d'obtenir des résultats de datation au moins équivalents et souvent améliorés.

La datation des moyennes de site repose sur la relation entre les facteurs régionaux et la croissance. Les séries individuelles sont diversement représentatives de cette information, en fonction du niveau d'action des facteurs individuels et locaux sur la croissance. Les facteurs régionaux ont une action qui est commune au lot d'arbres analysé. On peut donc penser que l'information régionale se trouve dans la variance commune des séries analysées. Des indicateurs comme la corrélation moyenne entre les séries représentent cette variance et permettent de sélectionner celles qui participent le plus à l'homogénéité de la chronologie moyenne. Toutefois une estimation statistique de l'homogénéité, ou de la qualité du signal, ne permet pas de savoir dans quels facteurs elle trouve sa source.

### 6.1 Matrice de corrélation

La relation entre chaque paire de séries individuelles peut être présentée dans une matrice carrée. Elle permet de juger de la distribution dans le lot d'un estimateur du synchronisme comme la valeur  $t$  de Student (fig. 52).

Les séries individuelles provenant de 59 arbres localisés dans les forêts de Cravant-les-Coteaux (37) et Fontevraud (49) (distantes de 15 km environ) sont utilisées comme exemple. Les séries se répartissent sur 7 stations dont les caractéristiques floristiques et pédologiques, sont résumées par leurs niveaux trophique et hydrique (RAMEAU *et al.* 1989) (fig. 51). Les placettes prospectées correspondent à des types de stations forestières où le fonctionnement édaphique est diversifié.



La matrice de corrélation montre nettement que pour une même influence régionale, les valeurs t de Student sont fonctions des facteurs locaux (stationnels) et individuels. Nous avons pu montrer qu'une typologie des croissances pouvait être mise en correspondance avec des ensembles de types de stations forestières en forêt de Chaux (39) (GIRARDCLOS 1992). En moyenne, les valeurs t obtenues entre les séries individuelles d'une station sont supérieures à celles obtenues entre les stations, ce qui se matérialise par des amas foncés le long de la diagonale de la figure 52. Des facteurs individuels perturbent cette distribution et la station CRV4 se caractérise par une grande dispersion des croissances quel que soit le point de comparaison.

Figure 51 : projection sur les axes des niveaux trophique et hydrique des stations. Le caractère indicateur des espèces est fourni par RAMEAU et al. (1989) (en absence de catalogue de types de stations)

D'une façon générale, la corrélation est d'autant plus forte que les facteurs externes qui influencent la croissance sont communs aux arbres mais les facteurs individuels interviennent également. La qualité de représentation des facteurs régionaux par un individu est donc très variable en fonction de ces influences.

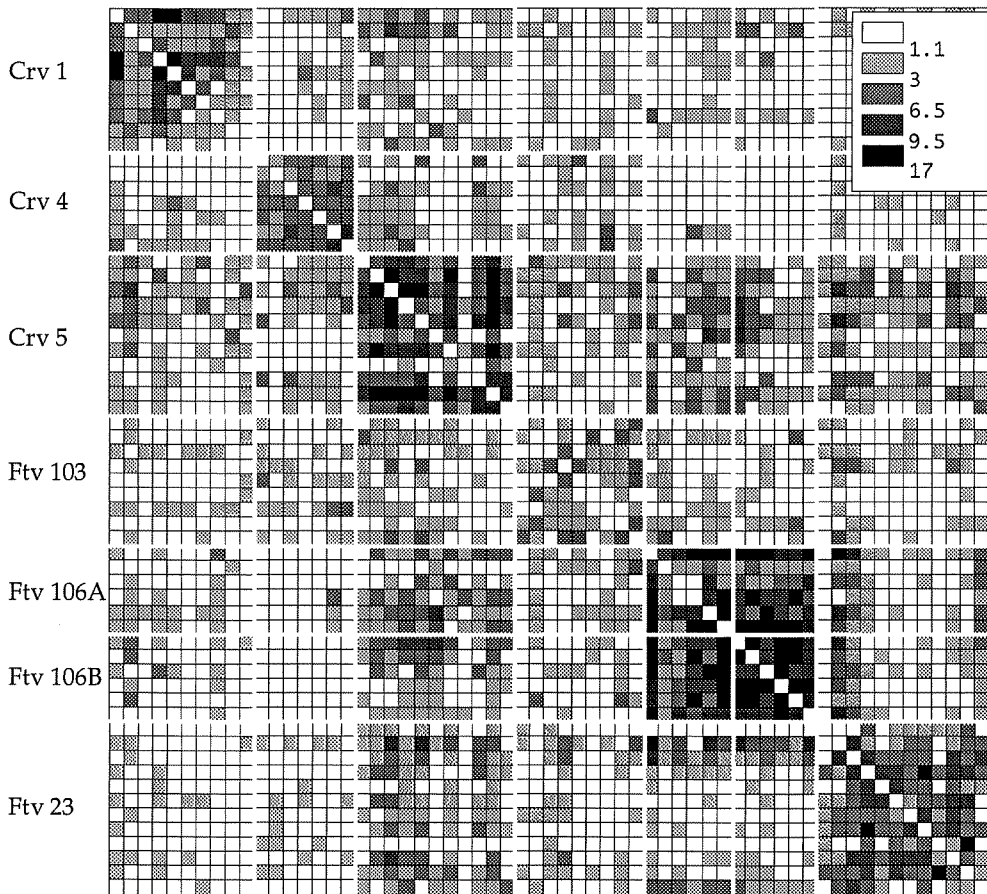


Figure 52 : matrice de valeur t entre les séries individuelles (standardisation Except) provenant de 7 stations des forêts de Cravant (37) et Fontevraud(49)



---

## 6.2 Qualité de la chronologie : “ Mean Correlation Technique ” ou technique de corrélation moyenne

La qualité d'une chronologie moyenne utilisée en datation est principalement fournie par le taux (en fonction du temps) d'années caractéristiques. Une année est dite caractéristique à la suite de Huber et Giertz-Siebinlist (1969 in SCHWEINGRUBER *et al.* 1990) lorsque 75% des individus intégrés à la chronologie moyenne présentent un intervalle concordant entre l'année considérée et la précédente (cf. partie 3 chap. III). On observe classiquement environ une année caractéristique sur deux pour une chronologie stationnelle et un taux de 20 % pour un étalon (LAMBERT *et al.* 1988). Le taux d'années caractéristiques est un descripteur rapide de la cohésion de la variation entre les largeurs.

L'analyse de variance a contrario se propose d'identifier les différentes sources de variance observées en divisant le lot analysé en groupes. L'importance relative de chaque source est estimée (FRITTS 1976, BRIFFA et JONES 1990). La variance liée à la chronologie moyenne globale peut être attribuée au climat. Elle est souvent relativisée par rapport aux sources interindividuelle et interne à l'individu (GUIBAL 1984).

L'analyse de variance ne peut être facilement utilisée en dendrochronologie (historique) car la période analysée doit être entièrement couverte par la totalité des séries. De plus, la formation des groupes, qui doivent contenir le même nombre de séries, ne peut être reliée à des descripteurs du milieu.

La technique de corrélation moyenne peut être vue comme une alternative qui permet d'estimer les quantités produites par l'analyse de variance lorsque le chevauchement entre les séries n'est pas exhaustif (BRIFFA et JONES 1990). Elle est basée sur la matrice de corrélation entre les séries (fig. 52). La corrélation entre les séries élémentaires, ou chemins de mesure, communs aux arbres estime la variance interne à l'individu. La corrélation entre les séries d'individus différents estime la variance interindividuelle. Le nombre de séries élémentaires total et par individu (qui peut être variable) sont également pris en compte pour définir une corrélation moyenne “ effective ” entre les séries (BRIFFA et JONES 1990 et JANSMA 1995). Cette corrélation représente la variance commune aux séries.

Toutefois les chemins de mesure en dendrochronologie ne sont pas exactement des rayons équivalents des carottes obtenues sur les arbres vivants. Leur orientation ne peut être définie, et surtout, la conservation de l'artefact ne permet pas de façon courante d'obtenir la totalité des cernes sur plusieurs directions. Les chemins de mesure ont comme premier objectif de permettre de saisir la totalité des cernes disponibles sur l'échantillon par des recouvrements les plus larges possibles. JANSMA (1995) suggère dans un contexte dendrochronologique, c'est-à-dire pour des coefficients de corrélation en majorité différents de 0, de remplacer le calcul de la corrélation entre les séries élémentaires par l'utilisation de la série individuelle. Cette série est une moyenne des chemins de mesure et permet d'amortir la variance interne à l'individu. La corrélation moyenne entre les séries individuelles sert alors d'estimateur de la variance commune.

## 6.3 Express Population Signal (EPS) ou représentativité statistique de la chronologie

La variance totale d'un ensemble de séries individuelles peut être divisée en deux parts. Une part est commune aux séries, elle représente l'information pertinente, le signal. La

seconde est dispersée entre les séries et peut être assimilée à du bruit. Elle est amortie par la constitution de la chronologie moyenne.

Dans le cas d'un échantillon (au sens statistique) de N arbres, représentés par une série individuelle, le coefficient de corrélation moyen entre les séries ( $r_m$ ) est un estimateur de la variance commune (JANSMA 1995). On peut donc représenter le bruit par individu intégré à la moyenne par :

$$(1 - r_m)/N$$

La variance totale du lot de séries est alors fournie par :

$$r_m + (1 - r_m)/N$$

"L'Express Population Signal" (EPS) est défini comme la part de variance commune par rapport à la variance totale (WIGLEY *et al.* 1984) :

$$EPS = \frac{r_m}{r_m + \frac{1 - r_m}{N}} = \frac{Nr_m}{Nr_m + (1 - r_m)}$$

L'EPS quantifie donc la part de signal lorsque la chronologie moyenne est construite. EPS tend vers 1 lorsque  $r_m$  tend vers 1 et lorsque le nombre d'échantillons augmente (BRIFFA et JONES 1990). Dans ce sens, l'EPS relativise la corrélation moyenne par rapport au nombre d'échantillons.

Le tirage de N arbres (le lot analysé) représente d'autant mieux le signal de la population dont il est issu que N et  $r_m$  sont élevés. La valeur d'EPS peut donc être vue comme un estimateur statistique de la représentation de la croissance de la population par la chronologie moyenne. WIGLEY *et al.* (1984) propose de considérer la représentation "statistiquement acceptable" lorsque  $EPS > 0,85$ . En fait, il n'existe pas de valeur spécifique d'EPS qui indiquerait une représentation suffisante de l'influence régionale sur la croissance (BRIFFA et JONES 1990). La variance commune aux séries individuelles peut prendre sa source dans plusieurs types de facteurs y compris des facteurs locaux. On peut seulement supposer que les facteurs les plus généraux sont le plus souvent responsables de cette variance. Il est donc possible de faire l'hypothèse que homogénéiser, dans une certaine mesure, les chronologies moyennes, c'est-à-dire optimiser  $r_m$  ou EPS, peut être bénéfique pour la représentation des facteurs régionaux.

En intégrant le nombre de séries et leur corrélation moyenne, l'EPS permet de considérer la chronologie sous deux angles : quantité et qualité d'information. Ces paramètres varient fortement en fonction du temps dans les chronologies de référence et particulièrement dans les étalons régionaux. La couverture, classiquement utilisée en dendrochronologie, n'exprime que la quantité d'information. L'EPS ou la corrélation moyenne en fonction du temps donnent une idée de la qualité de la chronologie. Mais seule la corrélation avec d'autres références permet effectivement de savoir si le signal régional est bien représenté dans ces chronologies. La confrontation des 3 types de paramètres permet d'indiquer les séquences pour lesquelles l'étalon peut être jugé satisfaisant et inversement présenter les périodes de lacune, soit liées à la quantité d'information, soit liées à la qualité des séries (JANSMA 1995) (cf. chap.2.4 et chap.3.5).

# Chapitre 2

## RÉFÉRENCES DENDROCHRONOLOGIQUES DE L'ÂGE DU BRONZE

### Introduction

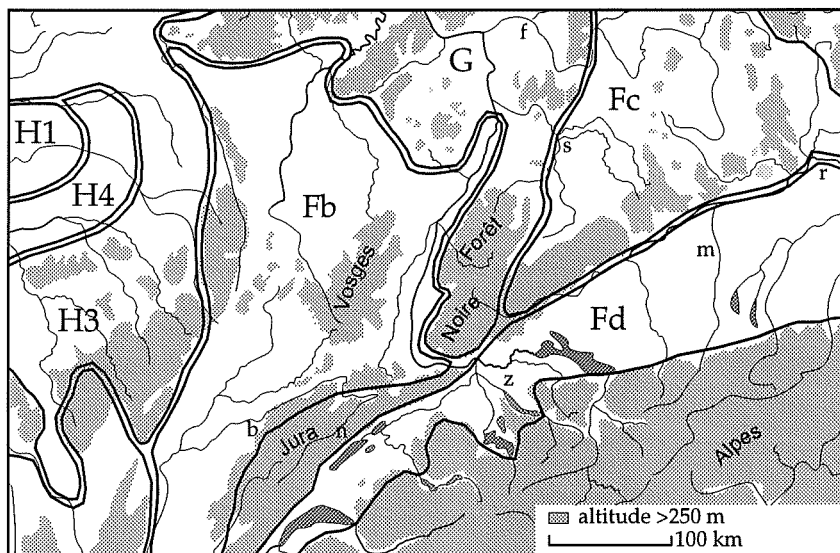
Les références disponibles en 1997 pour dater les bois de l'Age du Bronze ne sont pas nombreuses. Les longs référentiels du laboratoire de Stuttgart-Hohenheim et ceux construits par le laboratoire de Neuchâtel demeurent indispensables pour dater les sites français. Deux essais de construction de chronologies pour l'est de la France ont abouti à des références hétérogènes. Les sites qui les constituent sont inégalement répartis entre Nancy et Chalon-sur-Saône dans une zone biogéographique présentant de forts gradients. Le laboratoire de Besançon et celui de Bohlingen ont récemment mis en commun leurs données obtenues pour la Lorraine. 4 sites présentent des caractéristiques qui permettent de les utiliser dans une même référence. La synthèse réalisée à partir de 35 échantillons sélectionnés a une représentativité probablement plus locale et très déséquilibrée dans le temps que les étalons cités plus haut, construits à l'aide de milliers de bois. Elle est cependant utilisable pour la période allant de 1519 à 885 av. J.-C. Ses caractéristiques d'homogénéité et de datation sont bien supérieures aux anciennes chronologies proposées. On peut donc penser qu'elle représente mieux les influences des facteurs régionaux sur la croissance.

Dans l'état actuel d'avancement des travaux, les sites du Bronze localisés plus à l'ouest de la France doivent être datés sur ces références bien qu'ils proviennent de zones biogéographiques différentes.

# I Référentiels régionaux

## 1 Laboratoire dendrochronologique de Stuttgart-Hohenheim

Le référentiel "Gesamtstandard-Südmitteleuropa" du laboratoire de Stuttgart-Hohenheim s'étend, en 1985, de -7683 à nos jours avec de faibles lacunes (BECKER *et al.* 1985). Il a été réalisé en collaboration avec des laboratoires suisses (Zürich, Neuchâtel, Moudon), et intègre également des sites traités à Trèves par E. HOLLSTEIN et à Munich par B. HUBER. Cependant, alliant la vallée du Danube à celle du Main, il intègre des bois provenant de régions dont les climats sont assez différents (BECKER *et al.* 1985). En 1990, BECKER et SCHMIDT présentent une référence géographiquement plus homogène débutant en -7237. Enfin, ils annoncent au colloque de Lund (1990) pouvoir atteindre les limites d'extension probable des chronologies de cernes de Chêne, vers -9000 (LEUSCHNER 1992). Cette date ne pourra que difficilement être dépassée avec du matériel du sud de l'Allemagne. L'étude des pollens montre en effet que les chênes caduques ont disparu, ou étaient représentés par de très faibles effectifs, pendant la glaciation du Würm dans cette région. Les chênes colonisent à nouveau l'Europe némorale depuis les zones refuges méditerranéennes à partir de -10000 à



b-Besançon. f-Frankfurt. m-München. n-Neuchâtel. r-Regensburg. s-Stuttgart. z-Zürich

### Domaine atlantique

#### H : secteur ligéro-séquanien

H1 : chênaies acidiphiles médio-atlantiques

H3 : chênaies à charme

H4 : chênaies mixtes champenoises

### Domaine centre-européen

#### F : chênaies-hêtraies subatlantiques

Fb : sous-secteur lorrain

Fc : sous-secteur sud-allemand

Fd : sous-secteur de l'avant pays alpin

#### G : massifs hercyniens

Figure 53 : Sous-secteurs floristiques du sud de l'Allemagne, nord de la Suisse et de l'est de la France

-9000 (HUNTLEY et BIRKS 1983, HUNTLEY 1990). Il est très probable qu'antérieurement à -9000, les chênes étaient très rares dans la zone némorale. La mise en commun des travaux des laboratoires de Stuttgart et Göttingen montre en réalité une erreur de 41 cernes avant -5200 dans les chronologies rhénanes qui est corrigée en 1997 (conférence de Savonlinna en Finlande). A cette date, les cernes de Chêne les plus anciens rattachés au présent sont datés de 8400 av. J.-C. (LEUSCHNER *et al.* à paraître).

Deux versions du référentiel de Stuttgart, A200 et D200, sont communiquées aux laboratoires de datations archéologiques en 1982 lors d'un colloque à H e m m e n h o f e n (Constance). Notre

---

laboratoire utilise ces références depuis cette date (LAMBERT *et al.* 1988). La publication faite en 1985 par BECKER *et al.* ne décrit pas exactement les versions utilisées par les laboratoires, cependant les différences peuvent être jugées mineures.

Les versions communiquées sont des séries moyennes de largeurs brutes réalisées à partir d'un très grand nombre d'arbres. Le matériel utilisé provient de sites de contextes très diversifiés. Des sites archéologiques dont ceux des rives, du Bodensee, des lacs de Zurich ou de Neuchâtel sont intégrés. Ces sites peuvent pour des périodes particulières livrer des quantités importantes de bois pour l'étalon. Cependant, la possibilité de réaliser une très longue référence repose plus directement sur l'étude d'arbres en dépôts naturels, dans les sédiments alluviaux des rivières du sud de l'Allemagne, principalement le Main, le Danube, le Rhin et leurs affluents (fig. 53).

L'étude de populations de chênes vivant dans les régions de construction des références a conduit B. BECKER à délimiter de grandes aires pour lesquelles la synchronisation des croissances peut être dégagée (BECKER 1978). Il distingue deux grands types de conditions climatiques auxquelles les chênaies d'Europe centrale sont soumises.

Les croissances de chênes provenant de l'étage collinéen, réparti depuis les lacs suisses jusqu'à la limite de la plaine du nord de l'Allemagne peuvent être synchronisées. La croissance serait pénalisée, dans ces conditions, par des températures fortes ou des sécheresses estivales. L'économie en eau du sol jouerait un rôle important. Le climat est qualifié de modérément continental, avec des étés assez chauds et secs (BECKER 1978).

Les croissances d'arbres provenant d'altitudes inférieures à 200 m, en direction de la mer du Nord, sont très différentes. Elles ne peuvent être synchronisées avec celles des chênes collinéens. Les chênes de Basse-Saxe ou des Pays-Bas, soumis à un climat plus maritime dont les précipitations et températures sont mieux réparties sur l'année, peuvent être synchronisés entre eux (BECKER 1978).

Cette définition correspond aux deux domaines phytogéographiques ouest (atlantique et médio-continentale) de la zone némorale, ou zone latitudinale des forêts caduques (OZENDA 1994). Le "*Gesamtstandard-Südmittleuropa*" est littéralement l'étalon du sud du domaine médio-continentale. Les bois qui le constituent proviennent essentiellement de l'étage collinéen, d'un triangle qui relie Francfort sur le Main, Neuchâtel et Regensburg sur le Danube (fig. 53). Cette très grande aire présente une forte hétérogénéité biogéographique. Elle traverse deux secteurs phytogéographiques qui présentent une opposition de types de substrats. Les roches cristallines caractérisent les massifs hercyniens et les dépôts sédimentaires plus ou moins grossiers les secteurs avant alpin et sud allemand rapportés par OZENDA (1994) (fig. 53). Ces sous-secteurs eux-mêmes très hétérogènes présentent des gradients altitudinaux importants et des différences d'influences climatiques liées notamment à l'effet de föhn dans les vallées, à la plus ou moins grande protection des flux d'ouest par des reliefs. Cependant, les arbres subfossiles proviennent presque exclusivement de dépôts alluviaux et sont donc caractérisés par une certaine unité azonale.

D'une part, l'analyse de matériel provenant de zones aussi diversifiées a permis d'unifier les chronologies médio-continentales pour de très longues périodes. D'autre part, grâce à cette diversité, le "*Gesamtstandard-Südmittleuropa*" permet de dater des bois provenant d'une aire très vaste allant du sud de la Pologne (KRAPIEC 1996) à l'ouest de la France (cf. *infra*). En 1984, la réunion des plus grands référentiels d'Europe, dont celui de B. BECKER, permet les datations dendrochronologiques pour 7272 ans (PILCHER *et al.* 1984). Le synchronisme entre les grandes références de l'Allemagne et celles des îles britanniques peut

---

être dégagé à une échelle de représentativité régionale et pour une période de recouvrement assez longue. Une période de 400 ans est utilisée par BECKER *et al.* (1985). Ce synchronisme démontre que la largeur de cerne dépend bien, en partie, de facteurs très généraux parmi lesquels au premier rang apparaît le climat. L'Europe de l'ouest présente un climat suffisamment cohérent pour que la croissance d'arbres aussi divers que les chênes des tourbières irlandaises et ceux des alluvions du sud de l'Allemagne aient des croissances qui peuvent être synchronisées. La réalisation puis la datation de toute référence régionale en Europe de l'ouest nécessite donc de démontrer qu'elle présente bien un lien avec un étalon de ce schéma global. Cependant, il est évident que les facteurs plus locaux ont une action prépondérante sur la croissance et que les références produites après un stade d'unification doivent refléter ces particularités.

Malgré un nombre de bois vaste, et face à cette diversité, l'information est irrégulièrement répartie dans le "*Gesamtstandard-Südmittleuropa*". En 1982, le référentiel est interrompu notamment vers -4000, au début des chronologies du Néolithique des lacs et vers -540, au premier âge du Fer. Cette dernière lacune ne sera comblée qu'avec l'aide des références britanniques (PILCHER *et al.* 1984). Les versions A200 et D200 sont des segments du Néolithique à l'âge du Fer du référentiel. Stutt-A200 qui s'étend de -4089 à -540, regroupe tous les sites, utilisables en 1982, provenant des lacs suisses à la vallée du Main et du Danube. La répartition des sites intégrés à Stutt-D200 est plus strictement danubienne. La version débute en -4021 et se termine en -672.

Pour la période de l'âge du Bronze le nombre de bois par année de A200 est compris entre 20 et 50 (BECKER *et al.* 1985). La participation au référentiel des sites archéologiques est importante pour le Bronze final, d'environ -1200 à -900. Une partie des bois des sites lacustres suisses, d'Auvernier (NE) (lac de Neuchâtel), de Morges (VD) (lac Léman), du lac de Zurich (ZU) et de Zug (ZG) sont intégrés (BECKER et DELORME 1978). Les bois découverts dans un contexte archéologique introduisent une plus grande diversité de substrats de développement des arbres et également des aspects de dynamiques des peuplements liés à l'exploitation. Pour cette période, A200 peut donc être considérée comme une référence supra-régionale représentative du sud du domaine médio-continental.

Pour la même période, le référentiel D200 est constitué exclusivement de bois subfossiles alluviaux. Il est donc plus homogène, représentatif d'une zone où la continentalité du climat est plus avancée, entourant la vallée du Danube jusqu'à la Bavière et s'étendant sur les plateaux avant-alpins.

## 2 Laboratoire dendrochronologique de Neuchâtel

Les références du laboratoire de Neuchâtel sont uniquement issues de l'étude de matériel archéologique. Les périodes étalonnées sont donc très dépendantes des modes de construction des sociétés anciennes. Les berges des lacs sont densément peuplées durant deux périodes, le Néolithique moyen et final et l'âge du Bronze final. Les restes ligneux laissés par ces sociétés sont très abondants. Ils permettent de réaliser des chronologies extrêmement riches en échantillons mais dont l'étendue dans le temps est plus limitée que dans le cas des références issues de bois subfossiles.

Le laboratoire de Neuchâtel nous a communiqué une version de son référentiel de l'âge du Bronze réalisée en 1986 (communication P. GASSMANN). Il est appelé ici Neuch-

Brz86. Une partie seulement des bois étudiés provenant des sites présentés dans la publication de EGGER *et al.* en 1985 sont intégrés au référentiel. Ceux-ci sont répartis essentiellement sur les berges du lac de Neuchâtel. Cortaillod-est (NE) où 1600 échantillons ont été analysés avant 1985 (EGGER *et al.* 1985) et aujourd'hui environ 2300 (communication P. GASSMANN), Hauterive-Champréveyres (NE) (1470 échantillons) et Auvernier-nord (NE) (706 échantillons) représentent la très grande majorité du matériel daté.

La référence Neuch-Brz86 a été réalisée à partir de moyennes de sites elles-mêmes constituées d'un nombre de séries individuelles très variable. P. GASSMANN nous a communiqué les caractéristiques de ces moyennes intégrées à une version de la référence réalisée en 1994. L'étude de pieux supplémentaires provenant du site de Hauterive-Champréveyres constitue la principale différence avec la version précédente.

Le bloc diagramme situe les différentes moyennes de site dans le temps (fig. 54). La partie ancienne de la chronologie est obtenue à Hauterive-Champréveyres. A partir de -1250, l'origine des échantillons est plus diversifiée. La hauteur des rectangles est proportionnelle au nombre d'échantillons qui constituent les moyennes de sites. Le corpus de 1994 est dominé par les bois provenant d'Hauterive-Champréveyres mais ce n'est pas le cas en 1986 car le lot 2 a été étudié à partir de 1993. Les échantillons représentant un site dans la référence sont parfois peu nombreux par rapport à la totalité du matériel daté comme à Cortaillod-est. La réalisation de la référence à partir des individus se heurte en fait à des difficultés de supports informatiques et aux grandes différences de nombres de séries par site. Le parti a donc été pris de manipuler des moyennes de sites. Cependant leur utilisation comme composantes de la référence a pour effet de donner autant de poids dans le calcul des largeurs moyennes à tous les sites, qu'ils soient représentés par 2 ou 300 bois. Un déséquilibre apparaît marqué uniquement après l'intégration des 300 individus dans la moyenne de Hauterive-Champréveyres.

Des manipulations prochaines dans des bases de données plus dynamiques vont permettre au laboratoire de Neuchâtel de créer des groupes de séries individuelles basés sur les phases d'abattages et les types de croissances qui permettront de réaliser une référence plus équilibrée (communication P. GASSMANN).

Ces sites peuvent tous être considérés dans le sud-ouest du sous-secteur floristique du pays avant alpin (OZENDA 1994), dans la plaine lémanique (fig. 53). Ils sont répartis dans une zone beaucoup plus homogène que ceux intégrés à Stutt-A200.

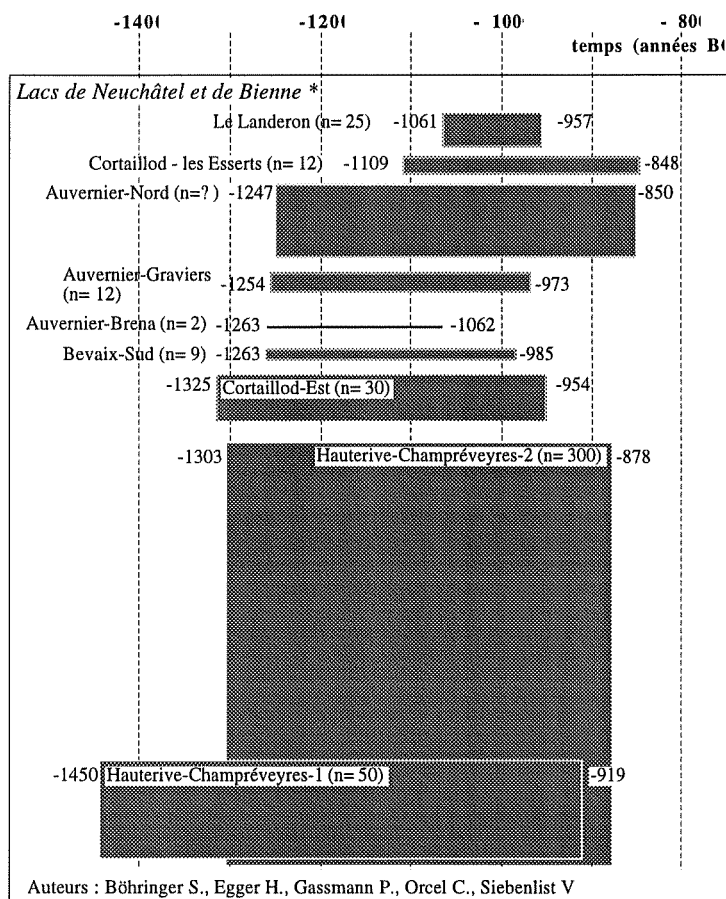


Figure 54 : Bloc diagramme des moyennes de sites intégrées à la référence de l'âge du Bronze du laboratoire de Neuchâtel en 1994 (Communication P. GASSMANN). La hauteur des rectangles est proportionnelle au nombre de séries individuelles (n)

---

La plaine lémanique est "abritée" des flux atlantiques par le Jura. Pour des températures comparables, ceci se traduit par des précipitations inférieures à celles du versant ouest du Jura. Le déficit de précipitation est le plus important pendant l'hiver et le printemps. La saisonnalité des précipitations est assez marquée pour les stations de Neuchâtel et surtout Bâle et Genève. L'été est la période la plus arrosée.

Pour la période de l'âge du Bronze final, des sites datés au laboratoire de Neuchâtel, mentionnés dans la publication EGGER *et al.* en 1985, intégrés au référentiel Neuch-Brz86 sont également cités dans la description de l'étalon de Stuttgart (BECKER *et al.* 1985). C'est essentiellement le cas d'Auvernier. Une partie des échantillons du site est intégrée aux deux références mais il ne peut être certifié que c'est le cas pour d'autres sites lémaniques. Les deux références ne sont donc pas totalement indépendantes. Elles comportent une information commune car des échantillons sont communs et car des sites de la même petite région naturelle sont communs. En conséquence, la probabilité associée à la synchronisation d'une chronologie moyenne de site concordante sur les deux références n'est donc pas proche du produit des probabilités individuelles. Les dates se répètent sur les deux références par effet de redondance. Il reste cependant évident que le grand nombre de bois intégrés à Neuch-Brz86 la rend très représentative de l'action sur la croissance des facteurs régionaux de la plaine lémanique. Alors que l'information portée par l'étalon Stutt-A200 est beaucoup plus globale. En revanche, Stutt-D200 ne comportant pas de bois archéologiques peut être considérée indépendante de Neuch-Brz86.

L'étalon Neuch-Brz86 s'étend de -1450 à -869. 314 échantillons du site de Hauterive-Champréveyres permettent de constituer une référence utilisable pour une période très similaire entre -1450 et -879. Le nombre d'arbres considéré est plus faible que pour Neuch-Brz86 mais on peut penser qu'ils sont représentatifs de la croissance de la plaine lémanique. Le site n'est pas intégré au référentiel Stutt-A200. La série moyenne des 314 bois est donc plus indépendante de l'étalon de Stuttgart que Neuch-Brz86. La comparaison des résultats de datation des chronologies moyennes devra donc être privilégiée entre ces deux références. Les 314 bois sont inclus dans Neuch-Brz86. La référence partielle de Hauterive (Haut-RP) est donc une composante de l'étalon.

Les versions des référentiels, Neuch-Brz86, Stutt-A200 et Stutt-D200 ont été communiquées sous forme d'une série moyenne de valeurs brutes. La datation sur ces références dans leur aire de réalisation est très souvent menée sans standardisation des données. Les écoles de datation suisses et allemandes privilégient le calcul du coefficient de Eckstein applicable aux séries de données brutes (cf. chap. 1).

Lorsque la référence est réalisée en données brutes, on suppose que le grand nombre de bois intégrés à la chronologie moyenne suffit pour amortir l'action sur la croissance des facteurs internes et locaux. Ceux-ci sont dispersés dans le lot alors que le signal commun, représenté par la moyenne, peut être rapporté aux facteurs régionaux. La distribution dans le temps des échantillons (couverture) est en réalité très irrégulière dans une référence même élaborée à partir de centaines de bois. Les zones de provenance dans l'aire d'étude sont souvent déséquilibrées. De même, le couple "date de formation" - "âge de formation" du cerne est très imparfaitement distribué. Pour un site donné, les cernes les plus anciens sont élaborés par de jeunes arbres. La réunion des sites ne permet jamais d'équilibrer les classes d'âge à une date donnée. Le signal moyen est donc très marqué par les déséquilibres d'échantillonnage.

De ce fait, le référentiel régional n'est pas stationnaire et présente souvent une



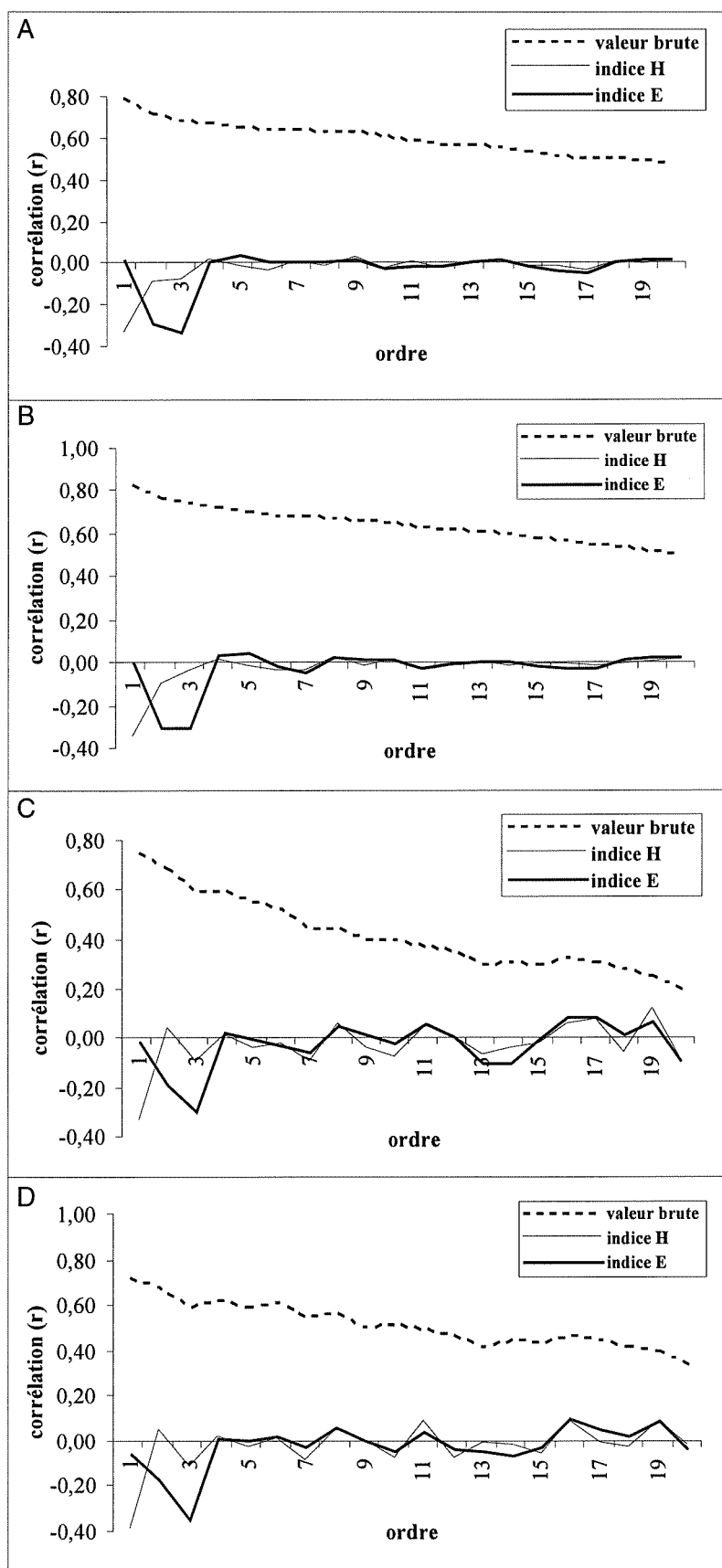


Figure 55 : fonctions d'autocorrélation des étalons A : Stutt-A200, B : Stutt-D200, C : Neuch-Brz86 et D : Haut-RP, calculées pour les ordres inférieurs à 20 avec toutes les valeurs disponibles (environ 3000 pour les étalons de Stuttgart et 800 pour ceux de Neuchâtel)

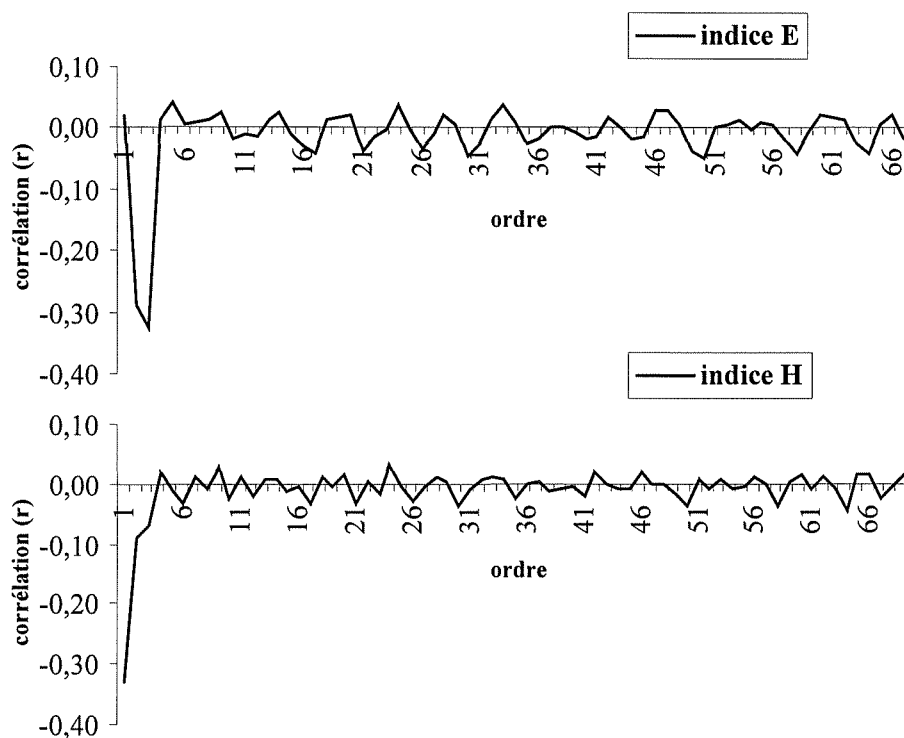


Figure 56 : fonction d'autocorrélation de Stutt-A200 calculée pour les ordres inférieurs à 60

autocorrélation élevée (MUNRO 1984), montrant que l'épaisseur moyenne du cerne, même à une échelle régionale, dépend des valeurs antérieures et qu'une tendance pluriannuelle est également présente dans les références très "couvertes" (HOLLSTEIN 1980). Les fonctions d'autocorrélation des étalons en valeurs brutes montrent toute l'importance de la dépendance vis-à-vis des années antérieures du cerne d'une année donnée (fig.55). Au vingtième ordre, l'autocorrélation est encore comprise entre 0,25 et 0,50 pour les différents étalons. L'existence de ces tendances dans le signal rend impossible l'utilisation du coefficient de corrélation entre deux séries de données brutes pour les synchroniser à l'année près. Pour une position de chevauchement donnée de deux séries pour laquelle la corrélation serait forte, par simple effet de l'autocorrélation, la corrélation serait également élevée quelques années antérieurement et postérieurement.

Pour maîtriser au mieux ces déséquilibres, soit la seule pente entre deux cernes consécutifs est utilisée (test de Eckstein), soit les séries sont préalablement standardisées.

La transformation en indices des séries individuelles de données brutes permet d'éliminer une grande part de la tendance et donc de l'autocorrélation pour mieux mettre en évidence les différences interannuelles. Les séries standardisées sont plus représentatives de l'action des facteurs régionaux sur la croissance. On note bien que la chronologie moyenne des séries individuelles standardisées est marquée par les mêmes déséquilibres d'échantillonnages (manque de bois pour une période ou sur-représentation d'un site) qu'une référence en valeurs brutes. Cependant ceux-ci ont une répercussion moins importante sur la qualité du signal. En effet, les influences internes et locales étant maîtrisées, au mieux, leur déséquilibre dans le temps est moins perturbant pour la moyenne.

Les fonctions d'autocorrélation des référentiels standardisés en indices de Hollstein et Except sont beaucoup plus centrées autour de 0 que celles obtenues avec les valeurs brutes (fig. 56). Ils peuvent être considérés stationnaires. Le coefficient de corrélation calculé pour toutes les positions de chevauchement de deux séries pourra être exploité avec un pas annuel.

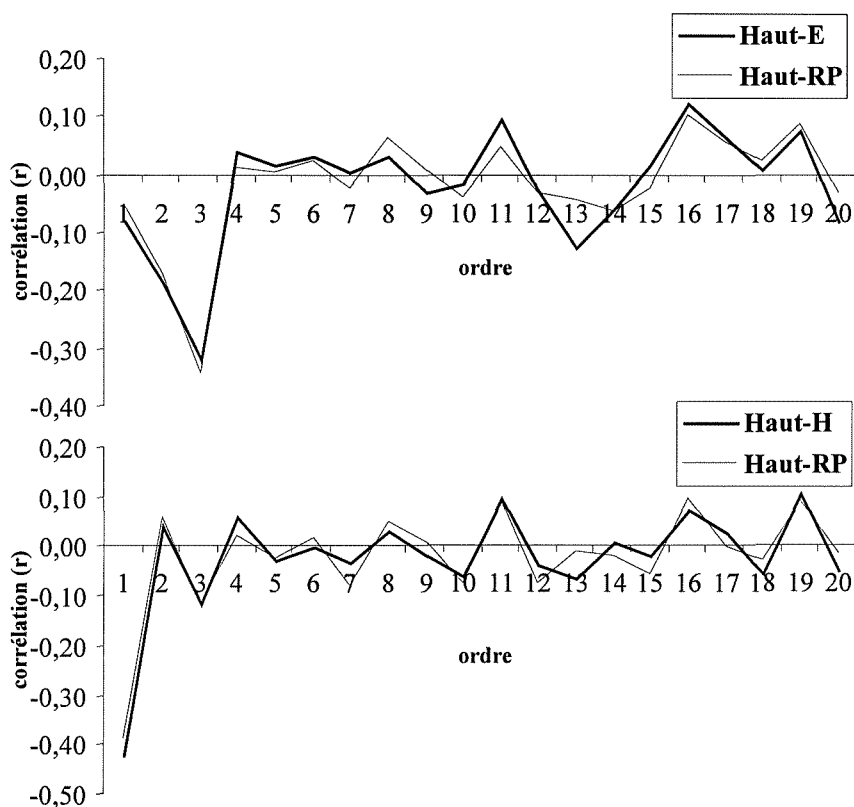


Figure 57 : fonction d'autocorrélation de Haut-RP, réalisée à partir des séries individuelles indicées, de Haut-E et de Haut-H transformées de la chronologie moyenne en valeurs brutes

Cependant ces fonctions montrent également que les séries d'indices ne sont pas strictement assimilables à un bruit blanc pour lequel aucune dépendance dans le temps ne serait observée. Pour l'indice Except un "creux" de corrélation opposée est observé pour des ordres 2 et 3 alors que pour l'indice de Hollstein, ce minimum se situe pour l'ordre 1 (fig. 57). Pour des ordres supérieurs, des pseudocycles sont observables dans les deux cas (fig. 56-57). Cette structure d'autocorrélation est un artefact de la standardisation lié à l'utilisation de méthodes proches des moyennes mobiles (cf. chap. 1). Cependant les corrélations observées sont, dans la plupart des cas, très inférieures à celles retenues lors d'une recherche de synchronisme et ces artefacts ne sont pas un obstacle à l'utilisation du coefficient de corrélation (MUNRO 1984).

Les références standardisées sont donc plus représentatives de la variation interannuelle régionale des largeurs de cernes que celles exprimées en largeurs brutes. Toutes les écoles de datation privilégient aujourd'hui leur utilisation. Pour les obtenir, il est nécessaire de posséder les séries individuelles qui les composent ; c'est le cas pour la référence partielle de Hauterive. Lorsque seule la série moyenne de largeurs brutes est disponible, la transformation en indices est réalisée directement sur la synthèse. Cette opération permet bien de maîtriser une part de l'autocorrélation, d'éliminer les tendances à long terme, mais probablement imparfaitement de pallier aux déséquilibres d'échantillonnage. La part de cette influence se traduisant par des variations de basse fréquence peut être considérée éliminée avec la tendance.

C'est le cas pour les références Stutt-A200, Stutt-D200 et Neuch-Brz86. Les fonctions d'autocorrélation de ces étalons présentent les mêmes caractéristiques que celles obtenues pour Haut-RP. De plus celles obtenues pour Haut-RP et des transformées (Haut-H et Haut-E) de la chronologie moyenne montrent de fortes similitudes (fig. 57).

Les différences entre les indices de Haut-RP et ceux de la transformée Haut-E sont

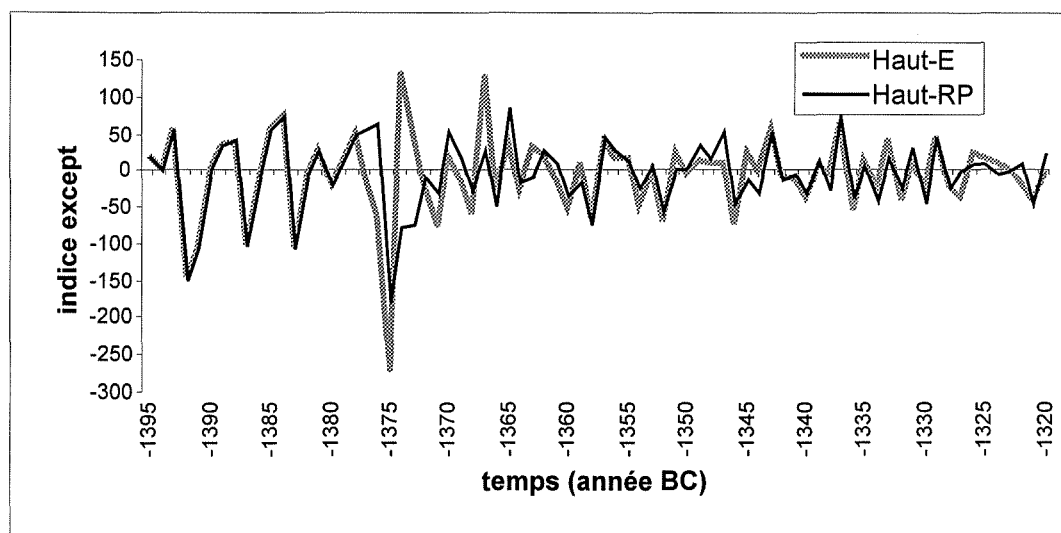


Figure 58 : comparaison de séries d'indices E, Haut-RP et Haut-E

minimes lorsque le nombre d'échantillons intégrés et les variations des indices sont faibles (fig. 58). Par contre pour une période où le nombre de bois intégrés à la chronologie moyenne est important et les variations des largeurs de cernes assez amples, des écarts sont observés entre les deux séries d'indices. À partir de -1380 les individus composant la chronologie moyenne sont beaucoup plus nombreux. La distorsion est plus importante. La standardisation de la série moyenne permet cependant d'utiliser le coefficient de corrélation pour la recherche du synchronisme mais il est évident que la méthode n'est pas utilisée dans tout son potentiel. Ce choix ne se justifie en fait que sous les contraintes techniques liées aux références anciennes, constituées d'un très grand nombre d'échantillons dont l'étude a été réalisée dans plusieurs laboratoires, dans des systèmes de données variés.

De ce fait, le référentiel partiel de Hauterive est à privilégier dans la recherche des dates pour la période correspondant à l'âge du Bronze final.

## II Séries de l'Est de la France

### 1 Situation et contexte d'étude des sites

#### 1.1 Pirogue de Chalain (39) (fig. 59)

Une pirogue complète de la proue à la poupe est découverte en 1904 en bordure du lac de Chalain. La première publication de la découverte par GRANDSAIGNES est citée dans l'inventaire des pirogues d'ARNOLD (1995). Elle est d'abord attribuée au Néolithique par le conservateur du Musée de Lons-le-Saunier de cette époque mais sans véritable argumentation (LAMBERT et LAVIER 1985). Cette pirogue est toujours en présentation au musée archéologique de Lons-le-Saunier. 4 prélèvements dendrochronologiques réalisés en 1985 ont permis de réaliser une chronologie individuelle de 162 cernes qui synchronisent avec un risque d'erreur faible à la date de -959 (LAMBERT et LAVIER 1985). La pirogue fut nommée pirogue 0 mais on retiendra le nom d'inventaire de ARNOLD (1996) : Chalain-Marigny 1904/F-10 et l'abréviation CHL1904/F10 pour la série dendrochronologique.

#### 1.2 Chalon-sur-Saône (71)

---

- "En 2500 heures de travail subaquatique, 840 m<sup>2</sup> ont été dégagés et environ 500 pieux topographiés" (BONNAMOUR *et al.* 1990) - la fouille du Gué-des-Piles à Chalon-sur-Saône (71) (fig. 59) réalisée entre 1983 et 1986 sous la direction de L. BONNAMOUR a livré un site d'habitat de l'âge du Bronze final III. Celui-ci est installé sur des plates-formes suffisamment élevées pour le situer au-dessus du niveau d'eau la majeure partie du temps. Des aménagements particuliers et des destructions montrent cependant un rôle important des crues dans l'organisation du village (BONNAMOUR *et al.* 1990). L'analyse dendrochronologique a été réalisée par G. LAMBERT et C LAVIER (BONNAMOUR *et al.* 1990) sur 119 pieux. Ceux-ci, issus de chênes jeunes, sont généralement appointés sans être refendus. La chronologie moyenne du site est nommée CHALON-M202.

### **1.3 Thonon (74)**

Dans le cadre de la réalisation d'un projet pédagogique présentant la dendrochronologie appliquée à toutes époques, 4 échantillons du site d'habitat âge du Bronze final de Rives, sur les berges du lac Léman, sont étudiés (fig. 59). La chronologie moyenne du site est nommée THONON-M2.

### **1.4 Vandières (54)**

La fouille de sauvetage programmé d'un site d'habitat sur l'emprise d'une sablière, au lieu dit les Grandes-Corvées (fig. 59), a été réalisée entre 1985 et 1987 sous la direction de F. BOURA. Le matériel céramique découvert dans deux structures destinées à l'approvisionnement en eau du site permet de définir un contexte Bronze final IIb (BOURA *et al.* 1990). Seule la structure 601 a conservé une partie de son cuvelage. 27 pièces de bois ont été étudiées par C LAVIER et G. LAMBERT (BOURA *et al.* 1990). Les éléments du cuvelage sont des planches de très belle facture obtenues par fente radiale sur des quartiers de bille dont le coeur a été purgé. Elles sont époinçonnées, disposées verticalement dans la fosse. La chronologie moyenne du site est nommée VANDIERES-M18.

### **1.5 Chamagne (88)**

Le matériel analysé par W. TEGEL du laboratoire de Bohlingen provient d'un stock conservé par une menuiserie en Lorraine. Les bois subfossiles ont été découverts dans une gravière de la Meurthe à Chamagne (88) (fig. 59). Les bois étaient en dépôt naturel dans les alluvions. 16 sections ont été prélevées dans la partie centrale des troncs qui présentaient le plus de cernes. La chronologie moyenne du site est nommée CHAMAGNE-M102

### **1.6 Saint Marcel (57)**

La section d'un arbre a été analysée par W. TEGEL du laboratoire de Bohlingen. L'arbre a été découvert isolé en contexte naturel, dans les alluvions de la Moselle (fig. 59).

### **1.7 Laines-aux-Bois (10)**

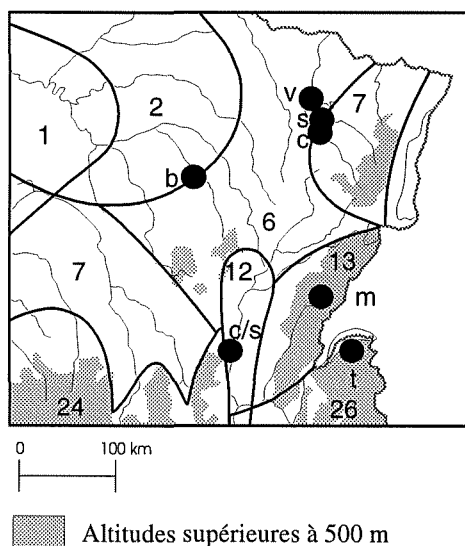
Les fouilles, au lieu-dit Bréban, ont été réalisées sur le tracé de l'autoroute A5 (fig. 59) sous la direction de S. CABBOÏ et S. DEFFRESSIGNE (1994). Les structures mises au jour sont

des fermes et deux puits. Le matériel céramique et métallique permet de situer le site dans l'âge du Bronze final.

Le matériel en bois provient des deux puits : structures F209 et F605. Ceux-ci conservent une partie de leur cuvelage qui définissent deux unités stratigraphiques de construction, respectivement US1339 et US1511. 12 pièces provenant de la première et 4 de la seconde ont été étudiées. Les éléments du cuvelage sont des rondins refendus une fois, dont la face externe est peu travaillée, disposés horizontalement dans la fosse. 3 fragments de bois découverts dans le remplissage (US1338) du puits F209 et 1 provenant du remplissage du puits F605 (US1512) ont également été analysés. La chronologie moyenne du site est nommée BREBAN-M20.

### 1.8 Situation biogéographique

Les sites du Bronze de l'est de la France analysés par notre laboratoire et celui de Bohlingen se répartissent dans 5 zones biogéographiques assez diverses. Les zones figure 59 sont individualisées à partir de critères agroclimatiques, c'est-à-dire qu'elles prennent en compte des critères climatiques (températures, précipitations, ensoleillement) et des facteurs agronomiques (production, phénologie...) (CHOISNEL et PAYEN 1989). Ces zones montrent un niveau d'homogénéité régional du point de vue du climat, du substrat, et de facteurs qui leur sont liés telle l'altitude (cf. partie 1). Leurs contours sont à interpréter en terme de gradient plutôt que de limites. Cependant il est permis de penser qu'elles représentent des ensembles de facteurs physiques régionaux assez homogènes. A l'intérieur de ces zones, on peut donc s'attendre à rencontrer des arbres qui, soumis aux mêmes conditions régionales, réagissent d'une façon assez similaire, étant entendu que ces réactions peuvent être modulées par les conditions édaphiques et de concurrence. Leur délimitation peut donc servir de base à la réalisation de références dendrochronologiques homogènes vis-à-vis des facteurs régionaux. Mais, si la définition de ces zones peut constituer un *a priori*, la décision d'intégrer une chronologie moyenne de site à une référence est réalisée définitivement *a posteriori*, sur



- v : Vandières (54)
- s : St-Marcel (57)
- c : Chamagne (88)
- b : Bréban (10)
- m : Chalain-Marigny (39)
- c/s : Chalon s/ Saône (71)
- t : Thonon (74)
- 1- : zones agroclimatiques (CHOISNEL et PAYEN 1989)

les critères de synchronisme entre les séries de la zone étudiée et avec les références voisines.

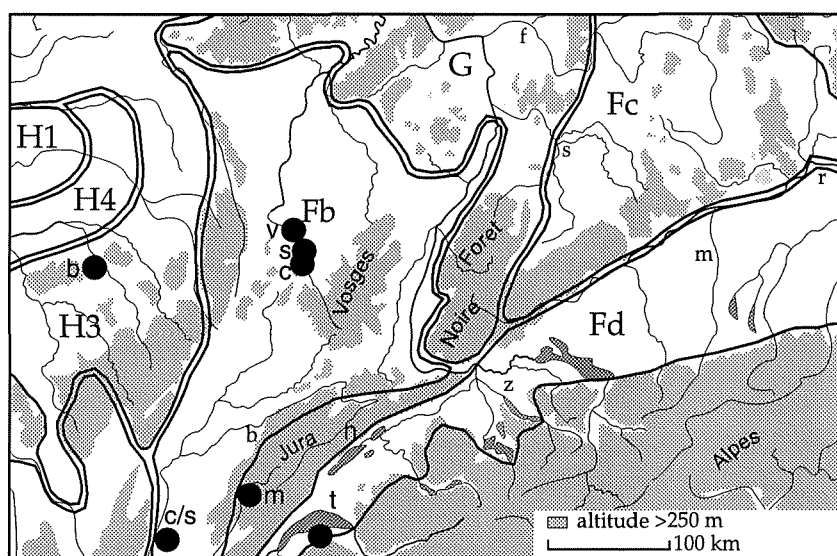
Les sites de Chalon, Chalain et Thonon sont isolés dans leur zone biogéographique (fig. 59). Ces zones, moyenne vallée de la Saône, premier plateau du Jura et plaine lémanique présentent, de plus, des caractéristiques assez différentes. Il est donc *a priori* peu avantageux de les regrouper dans une référence globale.

Figure 59 : situation biogéographique des sites datés du Bronze

Par contre, sur les plateaux calcaires de l'est de la France, 4 sites de Champagne et

Lorraine s'inscrit dans une zone géographique plus homogène du point de vue climatique. La zone agroclimatique 2 (fig. 59) est caractérisée par un ensoleillement médiocre, une pluviométrie moyenne bien répartie sur l'année et un hiver froid (médiane 3°C). L'ensoleillement de la zone 6 est également médiocre, la pluviométrie progressivement supérieure avec l'altitude et l'amplitude thermique annuelle plus prononcée que pour la zone 2. Bréban peut être considéré comme le terme ouest, pour les sites intégré à une référence représentative des plateaux calcaires de l'est de la France. *A priori*, les chronologies moyennes de ces sites peuvent être réunies en une référence régionale.

Les chronologies moyennes des sites de l'est de la France ne peuvent être datées qu'à l'aide des référentiels régionaux des laboratoires de Neuchâtel et Stuttgart. Ces références sont représentatives de régions biogéographiques centre-européennes limitrophes de celles dont proviennent les moyennes de site (fig. 60).



b-Besançon. f-Frankfurt. m-München. n-Neuchâtel r-Regensburg. s-Stuttgart. z-Zürich

- |   |                            |
|---|----------------------------|
| Domaine atlantique                          | v : Vandières (54)         |
| H : secteur ligéro-séquanien                | s : St-Marcel (57)         |
| H1 : chênaies acidiphiles médio-atlantiques | c : Chamagne (88)          |
| H3 : chênaies à charme                      | b : Bréban (10)            |
| H4 : chênaies mixtes champenoises           | m : Chalain-Marigny (39)   |
| Domaine centre-européen                     | c/s : Chalon s/ Saône (71) |
| F : chênaies-hêtraies subatlantiques        | t : Thonon (74)            |
| Fb : sous-secteur lorrain                   |                            |
| Fc : sous-secteur sud-allemand              |                            |
| Fd : sous-secteur de l'avant pays alpin     |                            |
| G : massifs hercyniens                      |                            |

Figure 60 : situation des sites datés du Bronze dans les grandes divisions de la végétation

Les bois de Thonon font exception. Ils peuvent être considérés issus du sous-secteur phytogéographique de l'avant-pays alpin d'où sont issus ceux des référentiels de Neuchâtel (fig. 60). Les sites lorrains et dans une moindre mesure Chalon et Chalain sont localisés dans le sous-secteur phytogéographique lorrain. Ce sous-secteur dont la végétation est rattachée au domaine centre-européen a des caractéristiques bioclimatiques semi-continentales qui le rapprochent de ceux d'où sont issues les références. Le site de Bréban (10), en bordure du Pays d'Othe, est à placer dans le sous-secteur des chênaies à charme intégré au domaine de végétation atlantique tel qu'il est rapporté par OZENDA (1994). Les seuls critères floristiques permettent de nuancer très nettement la définition des sous-secteurs au contact des deux domaines (ROYER *et al.* 1975). Les zones agroclimatiques (CHOISNEL et PAYEN 1989)

rendent également compte de l'hétérogénéité vers l'ouest et vers le sud du sous-secteur floristique lorrain.

Les arbres provenant de Chalon sont soumis à une influence liée à la vallée de la Saône et ceux de Chalain à une altitude plus élevée. Les références de Neuchâtel et Stuttgart restent cependant les plus proches disponibles pour dater ces sites.

## 2 Chronologies moyennes de sites

### 2.1 Statistiques descriptives

#### 2.1.1 Période d'étude

Pour l'âge du Bronze dans l'est de la France, le cerne le plus ancien est daté de 1519 av. J.-C. à Chamagne et le plus récent en 885 av. J.-C. à Bréban. La répartition des sites sur cette période est très irrégulière. Les sites archéologiques sont préférentiellement de l'âge du Bronze final (tab. 19). Entre -1120 et -980, 5 sites archéologiques et un en contexte naturel sont analysés. Antérieurement à -1200, les échantillons datés proviennent du site en contexte naturel de Chamagne et des arbres âgés de plus de 230-250 ans dans lesquels les planches du cuvelage de Vandières ont été réalisées.

Il y a donc un déséquilibre important du nombre de sites dans le temps. Pour la région Champagne-Lorraine ce déséquilibre est moins important, les sites sont mieux distribués, les chronologies moyennes se recouvrent peu dans le temps.

#### 2.1.2 Nombre d'échantillons

Les sites eux-mêmes livrent un nombre d'arbres très variable. La chronologie moyenne du Gué-des-Piles à Chalon comporte 119 échantillons. Elle fait exception pour les sites de l'âge du Bronze qui ont livré des quantités de bois assez faibles (tab. 19). Deux individus isolés sont datés : la pirogue Chalain-Marigny 1904/F-10 et un bois en contexte naturel à Saint Marcel. Ces arbres offrent 162 et 296 cernes. Ce qui est d'avantage que la chronologie moyenne de Chalon constituée d'arbres jeunes en moyenne de 43 ans. Le nombre d'individus doit, de plus, être relativisé par rapport à leur répartition dans la série moyenne. Ainsi le nombre moyen de cernes par année de CHALON-M202 est de 37,9, soit le tiers du nombre d'échantillons intégrés.

	origine	terme	Nb éch.	Nb cernes	âge moy	Nbc/an	cmoy	$\sigma$	r1	r2
CHAMAGNE-M102	-1519	-1289	9	231	168	6,5	169	29,5	0,87	0,85
VANDIERES-M18	-1328	-1093	26	236	106	11,6	109	12,99	0,73	0,54
STMARCEL	-1199	-904	1	296	-	1	42	6,41	0,69	0,57
BREBAN-M20	-1056	-885	15	172	125	9	61	9,45	0,88	0,77
BREBAN-M13	-1153	-976	18	178	118	11,8	62	9,17	0,89	0,83
(proposition 1992)										
CHALON-M202	-1089	-956	119	134	43	37,9	201	28,35	0,8	0,69
CHL1904/F10	-1120	-959	1	162	-	1	65	12,53	0,21	0,22
THONON-M2	-1204	-988	4	217	87	2	122	23,74	0,75	0,61

Tableau 19 : statistiques descriptives des chronologies moyennes de sites du Bronze. cmoy largeur de cerne moyenne,  $\sigma$  écart-type, r1 r2 autocorrélation d'ordre 1 et 2



---

Les sites montrent donc également un déséquilibre fort dans le nombre de cernes par an. Pour le secteur Champagne-Lorraine, ils livrent en moyenne peu de bois. Il n'y a pas de sur-représentation d'un site par rapport aux autres mais le site de Saint Marcel est sous représenté.

### 2.1.3 Qualité du signal dendrochronologique

La largeur du cerne moyen ( $c$ ) obtenue pour tous les individus synchronisés dans la chronologie d'un site intègre des informations très diverses telles les conditions d'ouverture du milieu, sa richesse mais aussi des facteurs internes comme l'âge moyen des arbres... Ce paramètre est donc d'interprétation difficile. Toutefois, les écarts sont importants entre les sites (tab. 19) et il est possible de rapprocher du faible âge moyen et de conditions de croissance favorables la forte valeur observée à Chalon. De même, il est probable que les arbres de Bréban proviennent de peuplements denses. Ces écarts reflètent en fait des conditions locales de croissance très diverses. Des conséquences importantes lors des synchronisations peuvent découler de ces différences. Dans ce cas, il paraît important de privilégier les synchronisations réalisées avec des données standardisées qui maîtrisent au mieux les influences internes et locales.

Pour les sites champenois et lorrains, les différences sont importantes et les synchronisations seront réalisées avec des indices.

L'écart-type ( $\sigma$ ) des largeurs de cernes montre l'amplitude moyenne du signal. Le coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 ( $r_1$ ) et 2 ( $r_2$ ) indiquent la "mémoire du système". Un écart-type fort est réellement représentatif de cernes minces et larges répartis sur toute la série quant il est associé à un coefficient d'autocorrélation assez faible (cf. chap. 1). Dans ce cas les cernes atypiques peuvent être supposés reliés à l'action de facteurs régionaux et pas à la tendance. Pour la pirogue Chalain-Marigny 1904/F-10, l'écart-type est assez élevé pour une autocorrélation faible (tab. 19). Dans les autres cas, les autocorrélations sont supérieures à 0,6 qui est une valeur observée classiquement pour des forêts actuelles (cf. partie 3). La largeur du cerne de l'année en cours est donc dépendante des largeurs antérieures. Ceci montre que l'effet de l'âge est très marqué dans le signal, y compris pour des moyennes. Le "fonctionnement biologique" du Chêne intégrant plusieurs années explique également une part de l'autocorrélation (cf. partie 3).

L'écart-type est élevé pour les sites de Chamagne et Vandières mais y est associé à une autocorrélation assez forte. Ces deux chronologies moyennes sont cependant plus représentatives d'influences générales que celle de Bréban et Saint Marcel dont l'écart-type est faible et l'autocorrélation forte. Les influences des facteurs locaux et internes prennent une part importante dans ces sites. Ce qui renforce la nécessité d'utiliser les séries indicées pour les synchronisations.

### 2.1.4 Cohérence des chronologies moyennes

Les indices : pourcentage d'années caractéristiques (à 75% et 90%), et les estimateurs du synchronisme moyen : coefficient corrélation, coefficient W et valeur de Student, calculés pour toutes les paires possibles d'individus intégrés dans la chronologie moyenne indiquent la cohérence du lot (cf. chap. 1). Si tous les arbres intégrés dans une moyenne sont dépendants de facteurs très similaires, la cohésion est forte.

	75%	90%	Wmoy	tmoy	rmoy	EPS
CHAMAGNE-M102	59	43	3,86	7,12	0,48	0,89
VANDIERES-M18	36	24	1,66	2,39	0,28	0,91
STMARCEL	-	-	-	-	-	-
BREBAN-M20	47	57	2,91	4,47	0,47	0,98
BREBAN-M13	22	30	1,35	2,54	0,25	0,85
(proposition 1992)						
CHALON-M202	31	13	0,89	1,33	0,25	0,97
CHL1904/F10	-	-	-	-	-	-
THONON-M2	-	-	-	-	0,33	0,66

Tableau 20 : indices de cohésion des chronologies moyennes de site : pourcentages d'années caractéristiques, coefficient W moyen pour les séries individuelles en valeurs brutes, valeur t de Student moyen, coefficient de corrélation moyen et Express Population Signal pour les séries individuelles en indices Except.

Le pourcentage d'année caractéristique à 75% est supérieur à 30% pour toutes les chronologies (tab. 20). Ce taux tend vers 25-30% pour les référentiels qui intègrent un grand nombre d'échantillons (LAMBERT *et al.* 1988). Ces moyennes sont plus cohérentes en partie car elles comportent moins de bois. La chronologie moyenne de Chalon, pour un nombre moyen de cernes par an de 38, présente des taux d'années caractéristiques assez bas. Il faut les mettre en relation avec la jeunesse des arbres analysés. Le coefficient de Eckstein (W) moyen souligne également le manque d'homogénéité de cette moyenne.

La cohésion des lots vis-à-vis du signal de haute fréquence est mieux représentée par la valeur de Student calculée pour les séries standardisées. Pour ces deux paramètres, le site de Vandières apparaît moins homogène que les sites de Bréban et Chamagne (tab.20).

Le coefficient de corrélation moyen entre les séries est calculé pour un chevauchement de plus de 30 cernes (cf. chap. 1). Dans le cas de Chalon, les chevauchements étant très faibles, le calcul a porté sur 15 cernes et plus. Pour cette chronologie, la corrélation moyenne s'élève à 0,25. L'EPS (Express Population Signal) traduit la valeur de cette corrélation moyenne par rapport au nombre d'individus sur lequel elle porte. Pour CHALON-M202 la valeur s'élève à 0,97. Elle est très supérieure au seuil de 0,85 proposé par WIGLEY *et al.* (1984) qui permet de considérer une chronologie moyenne utilisable pour des études dendroclimatologiques. Cependant, la valeur moyenne de Student qui lui est associée est très faible. La corrélation obtenue avec peu de cernes peut être assez élevée mais elle reste peu significative. Le calcul de l'EPS ne tient pas directement compte de la signification des corrélations. Pour un site comme Chalon, la valeur est donc largement surestimée. Le critère de 0,85 ne peut donc être utilisé seul, et doit être interprété en fonction du chevauchement entre les arbres.

Selon ce critère, les sites constitués d'un arbre unique et également celui de Thonon, qui en comporte 4 qui se chevauchent peu, sont sous-échantillonnés. Ces séries ne sont en aucune manière représentatives des conditions de croissance des arbres. Les valeurs observées pour les autres sites sont supérieures à 0,85.

Les sites de Champagne et Lorraine permettent de constituer un ensemble de 3 chronologies moyennes dont la valeur d'EPS est supérieure au seuil de 0,85. La qualité statistique de ces séries peut donc être jugée suffisante pour représenter la croissance du site. Un arbre isolé s'ajoute à cet ensemble. Ces chronologies peuvent faire l'objet de la constitution d'une référence régionale dont cependant le nombre de sites et de bois sont faibles. Le reste du matériel est très dispersé pour de nombreux paramètres.

	Stutt-D200															
	valeurs brutes				indices de Hollstein						indices Except					
	Gl	W	$\alpha$	rang	Gl	$\alpha$	rang	t	$\alpha$	rang	Gl	$\alpha$	rang	t	$\alpha$	rang
CHAMAGNE-M102	67	5,13	1E-04	1	63	1E-04	1	5,38	1E-07	1	62	4E-04	3	3,81	1E-04	1
VANDIERES-M18	-	-	-	>20	-	-	>20	2,27	1E-02	17	-	-	>20	2,61	5E-03	10
STMARCEL	57	2,37	9E-03	10	-	-	>20	3,75	1E-04	1	-	-	>20	3,46	4E-04	2
BREBAN-M20	-	-	-	>20	-	-	>20	2,6	5E-03	11	61	6E-04	8	3,51	3E-04	1
BREBAN-M13 (proposition 1992)	-	-	-	>20	-	-	>20	-	-	>20	-	-	>20	-	-	>20
CHALON-M202	-	-	-	>20	64	1E-03	2	-	-	>20	66	3E-04	1	-	-	>20
CHL1904/F10	60	2,51	7E-03	14	-	-	>20	2,47	7E-03	1	-	-	>20	-	-	>20
THONON-M2	62	3,53	6E-04	1	64	1E-04	1	5,15	3E-07	1	64	1E-04	1	5,12	4E-07	1

	Stutt-A200															
	valeurs brutes				indices de Hollstein						indices Except					
	Gl	W	$\alpha$	rang	Gl	$\alpha$	rang	t	$\alpha$	rang	Gl	$\alpha$	rang	t	$\alpha$	rang
CHAMAGNE-M102	65	4,37	1E-04	1	64	1E-04	1	6,83	4E-11	1	58	6E-03	8	6,12	2E-09	1
VANDIERES-M18	64	4,08	1E-04	1	64	1E-04	2	4,36	1E-05	2	67	1E-04	1	5,45	7E-08	1
STMARCEL	61	3,16	2E-03	1	-	-	>20	4,47	6E-06	1	56	1E-02	16	3,61	2E-03	3
BREBAN-M20	58	2,21	1E-02	15	-	-	>20	3	2E-03	1	60	3E-03	3	3,95	6E-05	1
BREBAN-M13 (proposition 1992)	65	3,17	2E-03	1	65	2E-04	3	-	-	>20	58	1E-02	20	-	-	>20
CHALON-M202	-	-	-	>20	66	3E-04	1	-	-	>20	61	6E-03	10	-	-	>20
CHL1904/F10	-	-	-	>20	62	1E-03	4	3,89	7E-05	2	59	1E-02	20	4,48	7E-06	1
THONON-M2	69	5,34	1E-04	1	70	1E-04	1	7,88	8E-14	1	70	1E-04	1	8,86	2E-16	1

	Haut-RP															
	valeurs brutes				indices de Hollstein						indices Except					
	Gl	W	$\alpha$	rang	Gl	$\alpha$	rang	t	$\alpha$	rang	Gl	$\alpha$	rang	t	$\alpha$	rang
CHAMAGNE-M102	-	-	-	>20	-	-	>20	-	-	>20	58	2E-02	15	-	-	>20
VANDIERES-M18	65	4,38	1E-04	1	61	5E-04	2	4,35	1E-05	1	66	1E-04	1	6,05	3E-09	1
STMARCEL	-	-	-	>20	-	-	>20	-	-	>20	-	-	>20	-	-	>20
BREBAN-M20	65	3,84	2E-03	1	66	1E-04	1	6,14	3E-09	1	67	1E-04	1	4,97	5E-08	1
BREBAN-M13 (proposition 1992)	61	2,24	1E-02	8	-	-	>20	-	-	>20	-	-	>20	-	-	>20
CHALON-M202	-	-	-	>20	-	-	>20	1,98	2E-02	17	-	-	>20	-	-	>20
CHL1904/F10	70	4,57	1E-04	1	65	4E-04	3	6,02	6E-09	1	61	3E-03	4	5,85	1E-08	1
THONON-M2	76	7,21	1E-04	1	73	1E-04	1	11,2	1E-23	1	77	1E-04	1	12,3	8E-27	1

Tableau 21 : résultats de datation sur les références de Stuttgart et Neuchâtel des sites d'âge du Bronze de l'est de la France. Gl coefficient de coïncidence (Gleichläufigkeit), W efficient de Eckstein, t valeur t de Student,  $\alpha$  risque d'erreur (directement lu dans la table), rang du résultat dans la liste de positions en ordre décroissant, gras résultats les plus significatif ( $\alpha > 1E-04$ )

## 2.2 Datations des chronologies moyennes de sites

Les tests de synchronisme sont réalisés dans toutes les procédures classiquement employées au laboratoire de Besançon (cf. chap. 1) pour la période de -1700 à -700.

Sur le référentiel D200, les sites de Chamagne et Thonon sont datés avec des risques d'erreur faibles (tab. 21). Ce résultat montre que les deux chronologies moyennes sont porteuses d'une information régionale de bonne qualité. Les autres sites lorrains sont synchronisés sur cet étalon avec de faibles valeurs des coefficients.

Les sites lorrains présentent des résultats très significatifs sur le référentiel Stutt-A200 (tab. 21). Le rang de la proposition de date retenue est très souvent le premier pour plusieurs modes de recherche du synchronisme. Les risques d'erreur associés sont très faibles.

---

Saint Marcel, représenté par un bois unique dont les cernes sont étroits et ont une variance faible montre les résultats de datation les plus médiocres.

Ces mêmes sites synchronisent plus imparfaitement avec le référentiel de Hauterive. Les résultats ne sont pas significatifs dans de nombreux cas. La chronologie de Vandières est la seule à présenter des résultats comparables sur les deux références. La différence de qualité de datation sur les deux étalons peut être attribuée aux caractéristiques des 3 zones biogéographiques. La région lorraine est celle qui présente le plus d'affinités médio-continentales.

Une première tentative de datation de la moyenne de site de Bréban (M13) a dû être abandonnée (cf. *infra*). Les résultats observés pour une moyenne reconstruite, plus homogène (M20) sont cohérents avec ceux obtenus pour les sites lorrains. Le référentiel de Neuchâtel livre cependant de meilleurs résultats que ceux de Stuttgart. La position plus "atlantique" du site peut être responsable de ces résultats.

La chronologie moyenne de site de Chalon est très difficile à dater. Une seule procédure de datation (test de Eckstein après standardisation en indice de Hollstein) est significative pour le référentiel Stutt-A200. La variance de la série est forte, mais montre plutôt que la moyenne de site est perturbée par l'effet de jeunesse des arbres, car elle est associée à un cerne moyen large de 2 mm, une autocorrélation assez élevée ainsi qu'une forte hétérogénéité des épaisseurs d'un arbre à l'autre. La chronologie moyenne comportant 134 cernes est obtenue avec des arbres jeunes en moyenne de 43 ans. La dynamique des peuplements exploités est probablement responsable d'une part des difficultés rencontrées. On peut également supposer que la chronologie moyenne ne présente pas un signal régional clair car les arbres proviennent de milieux où l'influence des facteurs régionaux est amortie. Les sols sur alluvions récentes, signifiant des conditions de croissances favorables, ont pourtant fourni des séries datables. Les chênes actuels d'Oussière (39) qui se développent dans ces conditions peuvent être synchronisés sur des références locales franc-comtoises. Ils ont cependant livré une chronologie moyenne de 193 cernes et leur âge moyen est de 142 ans. Ces caractéristiques sont beaucoup plus favorables que celles de la chronologie de Chalon. De plus, la zone biogéographique de la vallée de la Saône est soumise à des conditions assez éloignées de celles de la plaine lémanique ou du sud de l'Europe médio-continentale d'où sont issus les étalons.

La pirogue Chalain-Marigny 1904/F-10, a contrario, malgré une représentation locale faible, synchronise bien avec le référentiel de Hauterive. Ce résultat est plus imparfait mais reste significatif sur Stutt-A200 plus éloigné. Ces résultats peuvent être attribués à une meilleure qualité du signal enregistré dans la série de cernes de la pirogue (variance forte, autocorrélation faible). Il doit être aussi souligné que les différences entre les zones de provenances de la série à dater et de l'étalon sont plus faibles.

Les résultats de datation des bois de Thonon sont très élevés sur la référence de Neuchâtel, situé dans la même zone biogéographique. Ils sont également très forts sur Stutt-A200 et Stutt-D200 ce qui montre que la représentativité régionale de la chronologie pourtant composée de seulement 4 arbres est excellente. Il faut remarquer que le synchronisme entre les 4 arbres analysés ne permet pas de construire la chronologie moyenne de site, car les séries individuelles se chevauchent très peu dans le temps. La moyenne ne peut être réalisée qu'après une datation des individus sur la référence d'Hauterive ce qui traduit un signal de haute qualité parmi les 4 séries. Cette datation d'arbres isolés, analogue à celle d'une pirogue, n'est envisageable que pour des arbres qui comportent assez de cernes issus de zones biogéographiques proches. Les résultats de datation des individus, dont les plus âgés ont 121 et 137 ans, sont négatifs sur Stutt-A200 et positifs sur Hauterive. La chronologie moyenne qui

---

reste peu représentative localement (EPS 0,66), presque équivalente à un individu comportant 217 cernes est très bien datée sur Stutt-A200. Ce résultat peut être jugé en accord avec les observations de PILCHER et BAILLIE (1987). Dans une zone biogéographique bien étalonnée, 120 cernes semblent un minimum pour dater un individu isolé.

La comparaison des séries de cernes de quelques individus à celle d'une population est très largement soumise à la complexité des facteurs qui influencent la croissance. Les quelques individus tirés au hasard dans une population, qui nous sont parvenus, peuvent être particulièrement dépendants des facteurs régionaux qui affectent toute la population, mais cela reste rare. La datation des bois de Thonon, de la pirogue Chalain-Marigny 1904/F-10 et du bois de Saint Marcel démontre que quelques arbres peuvent être cependant représentatifs de la croissance régionale. Il est plus rare qu'un échantillon plus vaste, atteignant 20 arbres par années ou caractérisés par une EPS supérieure à 0,85, ne soit pas représentatif de ces conditions. Par leur datation, les moyennes des sites Bronze de l'est de la France, témoignent de conditions zonales qui peuvent être jugées voisines de celles d'origine des étalons. Les difficultés apparaissent lorsque l'action de facteurs azonaux (âge, dynamique du peuplement, types de sols particuliers) sur la croissance peut être supposée. Malgré sa représentativité locale forte, CHALON-M202 est mal datée.

### III Constitution d'un référentiel régional en Lorraine et Champagne

#### Introduction

Deux références régionales Est-de-la-France-Brz1 (EF-Brz1, LAVIER non publié) et Est-de-la-France-Brz2 (EF-Brz2, GIRARDCLOS *et al.* 1996) ont été réalisées pour l'âge du Bronze avec une part de ces mêmes sites. La grande diversité des séries intégrées dans ces références était imposée par la rareté des sites alors connus. La datation de 4 séries plus typiquement lorraines rend réalisable une référence plus homogène et implique l'abandon des versions antérieures.

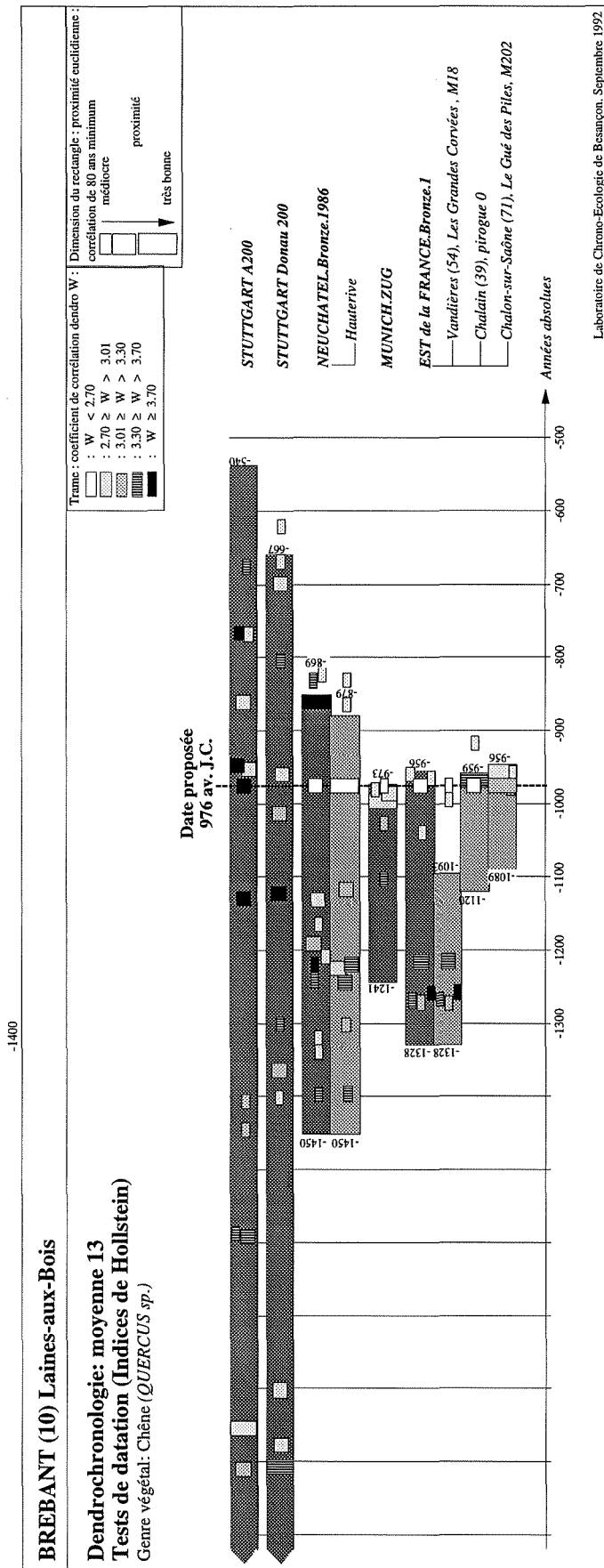
Les sites lorrains sont dans une aire soumise à des facteurs régionaux similaires et les résultats de leur datation (synchronisation forte sur Stutt-A200 et plus faible sur Haut-RP et Stutt-D200) attestent de leur cohérence. Ils peuvent être assemblés dans une référence régionale. Le site de Bréban a une position biogéographique et des résultats de datation qui restent cohérents avec les sites lorrains, son intégration dans la référence est justifiée par l'apport du site à la référence.

Pour la constitution du référentiel Lorraine-Brz, les moyennes de site subissent une procédure de vérification et d'homogénéisation. De fait, dans la plupart des constitutions de références, tous les individus datés sont intégrés. Ici, l'intégration d'un individu à la chronologie moyenne de site puis à la référence est justifiée. La représentativité de la chronologie moyenne de site, exprimée par les critères d'homogénéité et l'Express Population Signal (EPS) est optimisée. Les individus sont progressivement intégrés aux moyennes en observant si cette intégration apporte un avantage vis-à-vis de ces critères. Le signal dendrochronologique de meilleure qualité et de plus forte homogénéité est recherché. La datation sur les références sert de critère pour estimer si la chronologie moyenne partielle, homogénéisée, représente mieux l'information régionale enregistrée dans le lot que la chronologie moyenne incluant toutes les séries individuelles.

# 1 Datation du site de Laines-aux-Bois (10) Bréban

Figure 61 : résultats de datation de BREBAN-M13 (LAMBERT LAVIER 1992b)

## 1.1 Proposition de date faite en 1992



La croissance des arbres est très faible dès l'âge de 30 à 50 ans. Les cernes sont, en moyenne, inférieurs à 40 /100 mm et peuvent atteindre 15-20 /100 mm. Ils restent cependant assez bien organisés sur le plan transversal pour que leur mesure soit possible.

18 séries de cernes sont intercorrélées et intégrées dans une chronologie moyenne BREBAN-M13 qui est confrontée aux référentiels disponibles : Stutt-A200, Stutt-D200, Neuch-Brz86, Haut-RP et EF-Brz1. La référence MUNICH-ZUG réalisée par HUBERT et SIEBENLIST au laboratoire de Munich en 1962 avec du matériel provenant du site de Sumpf sur le lac de Zug (ZG) est également utilisée malgré la représentativité locale de cette chronologie assez éloignée du site à dater. Les référentiels et la chronologie sont standardisés en indice de Hollstein. L'estimateur du synchronisme utilisé est le test de Eckstein. La figure 61 présente les résultats obtenus sous forme de classes (cf. chap. 1). Elle montre un grand nombre de dates pour lesquelles le synchronisme est moyen à faible. Cependant, une réplication est observée pour tous les référentiels, sauf Stutt-D200, à la date 976 av. J.-C. Certains des résultats pour cette date étant faibles, -976 a été proposée comme hypothèse concordante avec le contexte archéologique (LAMBERT et LAVIER 1992b). Le synchronisme entre les croissances ne permet pas à lui seul de retenir la date. Dans ce sens, la datation n'est pas

considérée obtenue sur les seuls critères dendrochronologiques. Le site ne peut être utilisé dans la construction d'un référentiel.

## 1.2 Statistiques descriptives de la chronologie moyenne BREBAN-M13 et M14

	Nb éch.	Nb cernes	origine	terme	%75	%90	rmoy	EPS	Wmoy	tmoy
Bréban-M13	18	178	-1153	-976	22	30	0,25	0,85	1,35	2,54
Bréban-M14	9	166	-	-	56	39	0,52	0,9	2,87	5,87

Tableau 22 : statistiques descriptives

Le taux d'années caractéristiques à 75% est faible compte tenu du nombre d'échantillons que renferme M13. Il est fréquemment observé des taux supérieurs à 30% pour des chronologies moyennes comportant plus de 20 individus. Les autres moyennes de sites du Bronze de l'est de la France ont des taux supérieurs à 30% (tab. 22). Le coefficient de corrélation moyen obtenu entre toutes les séries est également très bas. Cependant, l'EPS se situe juste au seuil qui permet de considérer la moyenne représentative de la population si l'on admet le critère défini par WIGLEY *et al.* (1984). En fait, cette valeur tient plus au nombre d'échantillons que de la corrélation qui les unit.

La matrice carrée des valeurs de Student entre les séries individuelles standardisées en indices Except montre qu'un groupe de 9 bois est très homogène et que d'autres ont un comportement singulier (tab. 23). Une grande part des coefficients sont supérieurs à 4 pour le groupe (cf. encadré) alors que le bois 1339.1, par exemple, montre des coefficients très faibles, inférieurs à 1 voire négatifs (corrélations opposées) avec la plupart des composantes de la moyenne.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 F209.US1339.1		2,59	0,68	2,93	2,32	0,92	1,98	-0,14	1,39	-0,03	0,63	-0,63	0,68	-0,27	-0,73	0,60	-0,46	
2 F209.US1339.9	2,59		-0,48	2,22	0,97	2,48	0,47	-0,94	0,08	0,23	0,75	1,34	0,87	-0,26	-1,11	-0,76	1,07	4,19
3 F209.US1339.11(A)	0,68	-0,48		1,63	3,38	1,84	1,23	0,69	1,67	0,87	0,93	0,46	0,99	1,69	-1,22	1,50	-0,13	0,53
4 F209.US1339.10	2,93	2,22	1,63		1,48	2,78	1,36	1,80	3,39	3,55	3,74	2,98	2,28	2,09	1,32	2,12	1,17	5,22
5 F209.US1339.7	2,32	0,97	3,38	1,48		0,34	1,93	1,22	1,63	0,59	1,85	-1,42	0,12	0,92	-1,10	0,65	-1,32	
6 F209.US1338.2/3	0,92	2,48	1,84	2,78	0,34		0,98	1,82	1,79	3,65	2,75	1,49	0,77	2,73	1,31	-1,24	-0,75	1,99
7 F605.US1511.1	1,98	0,47	1,23	1,36	1,93	0,98		6,00	7,95	6,36	5,48	5,61	7,25	5,14	2,79	3,12	3,44	1,02
8 F605.US1511.A/B/C	-0,14	-0,94	0,69	1,80	1,22	1,82	6,00		6,26	7,00	6,09	6,43	5,32	5,41	6,84	1,87	3,86	1,46
9 F209.US1339.5	1,39	0,08	1,67	3,39	1,63	1,79	7,95	6,26		9,58	11,70	4,75	7,05	3,35	4,08	4,00	1,97	2,18
10 F209.US1339.5BIS	-0,03	0,23	0,87	3,55	0,59	3,65	6,36	7,00	9,58		10,30	8,33	5,26	6,82	3,63	3,97	2,76	3,44
11 F209.US1339.6	0,63	0,75	0,93	3,74	1,85	2,75	5,48	6,09	11,70	10,30		4,72	4,58	3,07	5,86	1,60	1,53	1,75
12 F209.US1339.8	-0,63	1,34	0,46	2,98	-1,42	1,49	5,61	6,43	4,75	8,33	4,72		4,98	7,91	4,11	2,42	7,42	3,07
13 F605.US1512.2	0,68	0,87	0,99	2,28	0,12	0,77	7,25	5,32	7,05	5,26	4,58	4,98		2,98	2,66	3,69	2,85	
14 X1	-0,27	-0,26	1,69	2,09	0,92	2,73	5,14	5,41	3,35	6,82	3,07	7,91	2,98		1,20	0,93	4,84	2,61
15 F605.US1511.6	-0,73	-1,11	-1,22	1,32	-1,10	1,31	2,79	6,84	4,08	3,63	5,86	4,11	2,66	1,20		0,54	2,52	
16 F209.US1339.4	0,60	-0,76	1,50	2,12	0,65	-1,24	3,12	1,87	4,00	3,97	1,60	2,42	3,69	0,93	0,54		2,17	-1,12
17 F209.US1339.12	-0,46	1,07	-0,13	1,17	-1,32	-0,75	3,44	3,86	1,97	2,76	1,53	7,42	2,85	4,84	2,52	2,17		3,44
18 F605.US1511.(B)	4,19	0,53	5,22			1,99	1,02	1,46	2,18	3,44	1,75	3,07		2,61		-1,12	3,44	

Tableau 23 : corrélations croisées des composantes de la moyenne BREBAN-M13, valeur t de Student, Indices E, encadré BREBAN-M14

La moyenne regroupant les individus qui présentent les coefficients les plus forts est BREBAN-M14. Les indices d'homogénéité de ce groupe sont très forts (tab. 23). On remarque que l'EPS est cette fois supérieure à 0,85. Cette valeur est ici plus le fait d'une cohésion forte du groupe que du nombre d'arbres qu'elle comporte. Si l'on accepte le critère d'une EPS supérieure à 0,85 pour confronter la moyenne aux références dans de bonnes conditions (JANSMA 1995), M14 peut être datée. D'autant plus qu'elle comporte 166 cernes.

Toutes les valeurs t de Student correspondantes aux corrélations positives entre la chronologie et les références pour la période de 1500 à 700 av. J.-C. sont représentées sur la figure 62.

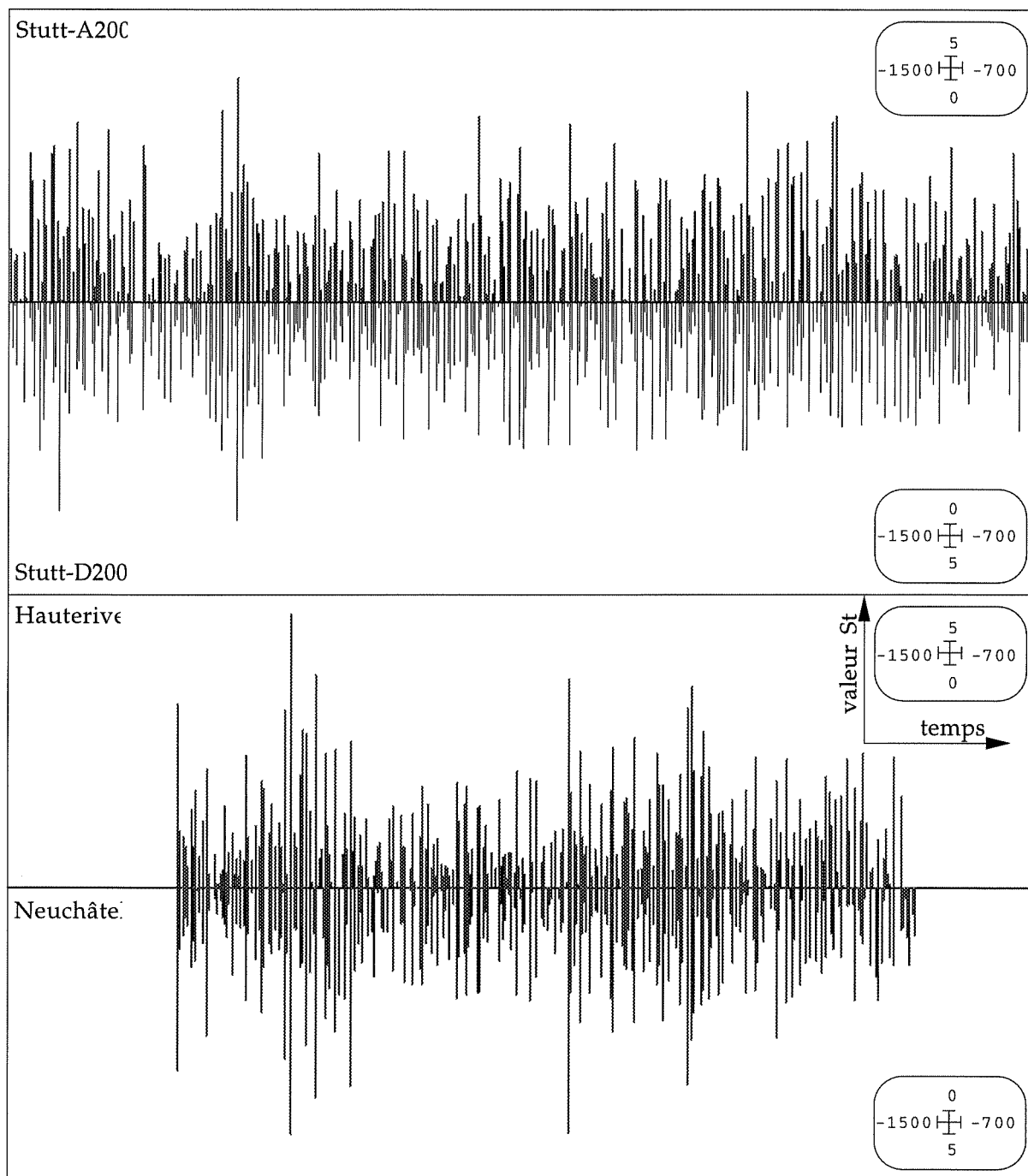


Figure 62 : résultats de datation (valeur t de Student, indices E) de BREBAN-M14 sur les références de Stuttgart et Neuchâtel.

Les références EF-Brz1, jugée trop hétérogène, et MUNICH.ZUG jugée trop éloignée, ne sont pas utilisées alors qu'elles l'étaient pour M13. La référence Haut-RP est une composante de Neuch-Brz86. Ces deux références livrent des résultats qui présentent beaucoup plus de similitudes que deux étalons plus indépendants. C'est également le cas pour Stutt-A200 et Stutt-D200. Ceci est mis en évidence sur la figure 62 en renversant l'axe des ordonnées. La réplication d'un résultat sur ces références deux à deux est donc largement suspectée de redondance. Par contre, un résultat positif concordant sur Stutt-D200 et Haut-RP est le gage d'une grande sécurité mais demande une représentation régionale forte.



Plusieurs valeurs de Student élevées sont observées entre la série BREBAN-M14 et les références suisses. Cependant aucune de ces propositions n'est répliquée sur les étalons allemands avec un risque d'erreur associé faible. Le synchronisme ne peut être jugé suffisant à une date donnée sur ces références.

Malgré une valeur d'EPS qui s'élève à 0,90 et un nombre de cernes conséquent, BREBAN-M14, n'est pas datable sur des références régionales. Dans ce cas, il apparaît que la valeur élevée d'EPS n'est pas un critère déterminant de l'influence des facteurs généraux. Le calcul relativise la partie commune de signal et la partie dispersée en fonction du nombre d'arbres. Il ne permet pas de juger des facteurs qui peuvent être responsables de la partie commune du signal (BRIFFA et JONES 1990). L'expérience de datation négative à une échelle régionale illustre que pour un nombre de bois faible, une corrélation moyenne forte peut indiquer une série de représentativité locale.

La représentativité régionale de la moyenne de site doit être augmentée pour qu'elle soit datée. Les corrélations très faibles, voire opposées, observées entre les individus ne peuvent pas s'expliquer uniquement en terme de variations dues à des milieux différents ou des cernes étroits. La chronologie BREBAN-M13 doit donc être homogénéisée.

### 1.3 Homogénéisation de la chronologie moyenne du site

Le groupe très homogène serait représentatif de la croissance locale. Les séries individuelles rejetées de M13 sont donc confrontées à M14. La recherche du synchronisme est réalisée avec les séries standardisées (indices E), à l'aide du coefficient de corrélation et sa valeur de Student associée. Une nouvelle agglomération progressive est menée. Elle aboutit à la moyenne BREBAN-M20. Par rapport à la chronologie BREBAN-M13, 1 série est rejetée, car elle ne comporte que 35 cernes, 2 autres sont rejetées car elles ne présentent pas de corrélation significative avec le nouveau groupe et 3 séries ont une autre position.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1 F605.US1511.6		2,35	0,74	0,54	1,61	3,13	2,42	1,22	2,81	6,86	4,09	3,64	5,86	4,12	2,66
2 F209(US1338.2/3	2,35		2,12	2,41	3,45	3,35	2,14	3,23	5,96	4,04	5,62	3,99	3,26	2,77	5,08
3 F209.US1339.9	0,74	2,12		2,37	2,61	2,55	2,61	2,27	2,86	2,50	3,36	3,47	2,08	1,79	3,01
4 F209.US1339.4	0,54	2,41	2,37		4,05	1,64	1,69	0,92	3,07	1,87	3,84	3,77	1,57	2,42	3,71
5 F209.US1339.11(A)	1,61	3,45	2,61	4,05		2,71	2,79	2,13	4,51	4,52	5,66	5,95	4,08	3,99	4,78
6 F209.US1339.1	3,13	3,35	2,55	1,64	2,71		1,77	4,86	3,89	3,60	3,52	4,48	4,74	4,32	4,10
7 F209.US1339.12	2,42	2,14	2,61	1,69	2,79	1,77		6,70	3,94	5,56	4,17	6,26	4,14	6,32	3,56
8 X1	1,22	3,23	2,27	0,92	2,13	4,86	6,70		5,10	5,38	3,44	6,96	3,03	7,88	2,93
9 F605.US1511.1	2,81	5,96	2,86	3,07	4,51	3,89	3,94	5,10		6,04	6,52	6,06	5,52	5,62	7,20
10 F605.US1511.A/B/C	6,86	4,04	2,50	1,87	4,52	3,60	5,56	5,38	6,04		6,26	7,01	6,16	6,49	5,34
11 F209.US1339.5	4,09	5,62	3,36	3,84	5,66	3,52	4,17	3,44	6,52	6,26		12,63	10,66	5,07	7,12
12 F209.US1339.5BIS	3,64	3,99	3,47	3,77	5,95	4,48	6,26	6,96	6,06	7,01	12,63		9,22	8,34	5,19
13 F209.US1339.6	5,86	3,26	2,08	1,57	4,08	4,74	4,14	3,03	5,52	6,16	10,66	9,22		4,74	4,61
14 F209.US1339.8	4,12	2,77	1,79	2,42	3,99	4,32	6,32	7,88	5,62	6,49	5,07	8,34	4,74		5,03
15 F605.US1512.2	2,66	5,08	3,01	3,71	4,78	4,10	3,56	2,93	7,20	5,34	7,12	5,19	4,61	5,03	

Tableau 24 : corrélations croisées des composantes de la moyenne BREBAN-M20, valeur t de Student, indices E.

Les statistiques descriptives de la nouvelle moyenne montrent une homogénéité plus importante que dans le cas de BREBAN-M13 (tab. 22). La matrice de corrélations croisées ne présente plus d'individus singuliers (tab. 24).

Malgré ce gain, pour constituer le référentiel, l'intégration de chaque bois dans la série moyenne du site est testée. La procédure décrite au chapitre 1 est employée. Une

---

composante est retirée itérativement du groupe constituant BREBAN-M20 puis la série moyenne des largeurs de cernes est calculée. Elle est nommée BréCont. suivi du numéro du bois supprimé. Les statistiques descriptives de cette moyenne partielle par rapport à celle de la moyenne complète indiquent "l'apport" du bois supprimé au groupe. Si les indicateurs d'homogénéité comme les pourcentages d'années caractéristiques et la corrélation interne moyenne sont inférieurs pour la série moyenne partielle, le bois apporte de la cohésion au groupe. Dans le cas contraire, il participe à la dispersion du groupe.

Une recherche de synchronisme est engagée entre la composante extraite de BREBAN-M20 et la moyenne partielle l'excluant. La position de la composante dans la moyenne est vérifiée. Elle doit être la première proposée par la recherche de synchronisme. Toutes les composantes de BREBAN-M20 satisfont ce critère. Un coefficient de corrélation élevé indique un arbre dont la croissance est conforme à l'ensemble du groupe. JANSMA (1995) proposent de rejeter les séries individuelles dont le coefficient de corrélation avec la moyenne partielle est inférieur à 0,5. Il s'en suit une homogénéisation qui peut être suivie dans les statistiques descriptives.

Une variation de ces paramètres doit permettre de justifier le critère de sélection. La vérification de la valeur t de Student associée à la corrélation ou mieux au risque correspondant est nécessaire. Des corrélations supérieures à 0,5 peuvent en effet être observées pour des arbres comportant peu de cernes. Un seuil de risque placé à 1‰ semble pouvoir indiquer la fiabilité minimum de ces corrélations. De plus, la perte d'un individu ne doit pas induire une baisse de représentativité de la moyenne trop importante. A contrario, si l'EPS des moyennes partielles est inférieure à celle de la moyenne complète, l'intégration peut être justifiée.

On observe cependant que dans le cas de la composante 1339.12, l'EPS de la moyenne partielle est très légèrement inférieure à la moyenne complète mais que la suppression de cet individu induit une hausse assez forte des indices d'homogénéité tel le pourcentage d'années caractéristiques à 75 % (tab 25). Une observation sur la table lumineuse des séries indique que malgré un coefficient de corrélation assez élevé et une valeur de Student égale à 6,78, ce bois présente des séquences pour lesquelles le synchronisme avec le reste de la population est assez faible. Les cernes de la fin de la chronologie de l'arbre 1339.12 sont très étroits (20 /100 mm) et présentent très peu de variations. Cet individu est très probablement contemporain des autres et synchronisé de façon acceptable pour une datation. Mais lors de la réalisation de la série moyenne il participe à la dispersion du groupe. Les indices sont plus nets pour le rejet des bois 1339.9 et 1339.4. Les autres arbres permettent d'augmenter l'EPS et des indices d'homogénéité.

La chronologie moyenne résultante BREBAN-M21 comporte 3 séries de moins que BREBAN-M20. Elle présente des indices d'homogénéité supérieurs (tab. 26) et le gain de corrélation interne compense pratiquement la perte des 3 échantillons dans le calcul de l'EPS. Pour une représentativité très similaire, M21 est plus homogène que M20. Par rapport à M14, M21 est moins homogène mais de représentativité plus forte (tab. 26). Les coefficients de M13 montrent les limites d'hétérogénéité pour lesquelles le sens de la moyenne peut être discuté.

Le taux relatif d'années caractéristiques à 90% subit de fortes variations (tab. 25) qui sont souvent difficiles à interpréter, car contradictoires avec celles des années caractéristiques à 75% et de l'évolution de la corrélation moyenne. On peut attribuer ceci au faible nombre de séries composant une moyenne et au faible nombre d'années "signées". L'ajout ou le retrait d'un individu dans un petit échantillon a une forte influence sur le nombre de pentes concordantes minimum pour que l'année soit caractéristique à 90%. Ainsi dans un groupe de 4 arbres chaque série représente une possibilité de variation de la concordance des pentes de

libellé	%90	%75	EPS(30)	rmoy	r	t
BréCont1339.9	52	48	0,985	0,414	0,36	4,05
BréCont1339.4	57	47	0,985	0,416	0,37	4,36
BrCont1339.12	49	56	0,984	0,398	0,49	6,78
BréCont1339.1	51	48	0,983	0,395	0,52	5,54
BréCont1339.11	53	46	0,984	0,397	0,53	6,59
BréCont1338.2	47	47	0,983	0,394	0,54	6,62
BréCont1511-6	53	47	0,983	0,394	0,57	4,71
BréCont.X1	52	48	0,983	0,394	0,60	7,82
BréCont1511.1	47	46	0,983	0,383	0,61	8,37
BréCont1339.6	47	48	0,983	0,383	0,64	8,46
BréCont1339.8	56	45	0,983	0,383	0,67	9,16
BréCont1339.5	46	53	0,982	0,378	0,68	11,01
BréCont1511ABC	49	47	0,982	0,376	0,71	9,47
BréCont1512.2	48	48	0,982	0,380	0,72	9,17
BréCont1339.5bis	54	43	0,982	0,374	0,67	10,13
<b>BrébanM20</b>	<b>57</b>	<b>47</b>	<b>0,985</b>	<b>0,390</b>		
<b>BrébanM21</b>	<b>49</b>	<b>58</b>	<b>0,982</b>	<b>0,459</b>		

25% alors qu'il faut attendre le 10<sup>ème</sup> arbre pour que la variation soit inférieure à 10%. Les années caractéristiques à 90% sont des repères très importants pour la synchronisation mais leur distribution dans la série moyenne est plus fonction du nombre de séries que celles à 75%.

Tableau 25 : homogénéisation de la moyenne BREBAN-M20. Taux d'années caractéristiques (%90, %75) de la chronologie de contrôle, corrélation moyenne (rmoy) entre les séries individuelles en indices Except, Express Population Signal (EPS), corrélation entre la composante exclue et la chronologie de contrôle (r,t)

	Nb éch.	Nb cernes	origine	terme	%75	%90	rmoy	EPS	Wmoy	tmoy
Bréban-M13	18	178	-1153	-976	22	30	0,25	0,85	1,35	2,54
Bréban-M14	9	166	-	-	56	39	0,52	0,90	2,87	5,87
Bréban-M20	15	172	-1056	-885	47	57	0,39	0,985	2,76	4,21
Bréban-M21	12	172	-1056	-885	58	49	0,46	0,982	3,12	4,95

Tableau 26 : statistiques descriptives.

## 1.4 Comparaison de la datation des chronologies moyennes BREBAN-M13, M14, M20, M21

### 1.4.1 Résultats de datation en valeurs brutes

Les chronologies moyennes M13, M20 et M21 sont comparées aux références dans un test de Eckstein.

Entre M13 et Stutt-A200, la valeur du coefficient W la plus élevée de la période de recherche est observée à la date de -976. La proposition ne se dégage cependant pas nettement des autres calculs (fig. 63). Une réplification de valeurs moyennes à faibles est observable sur les autres références. Sur ces seuls critères, la proposition ne peut être retenue, les autres procédures ont donc été engagées.

Pour M20 (fig. 64) et M21 (fig. 65), les valeurs observées à la date du dernier cerne de -885 sont les plus élevées de la période de recherche sur les références de Neuchâtel. Cependant seule la valeur de 4,07 entre Haut-RP et M21 se dégage réellement des autres calculs. Cette synchronisation se réplique avec des valeurs faibles sur les étalons de Stuttgart.

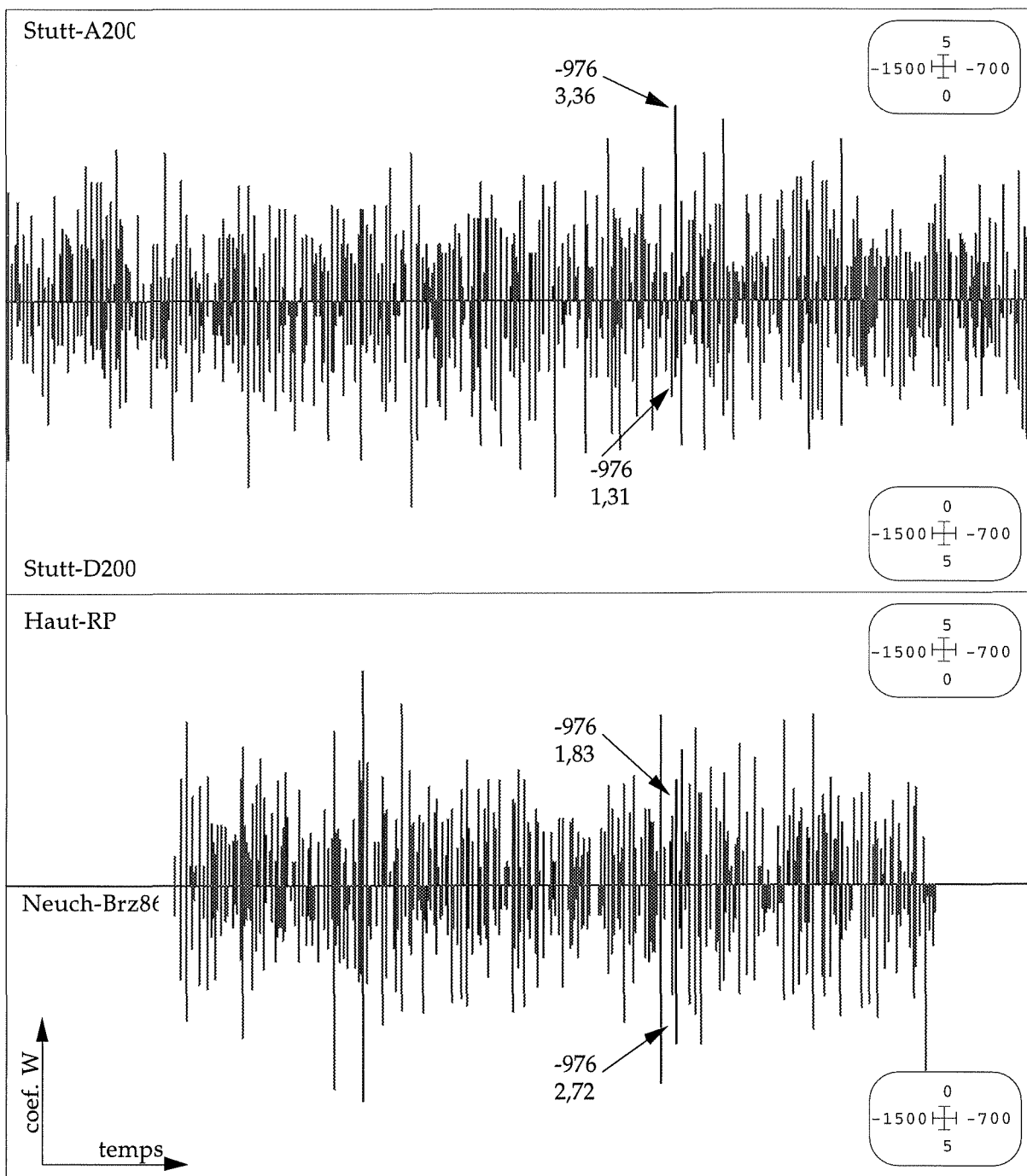


Figure 63 : résultats de datation (coefficient W, valeurs brutes) de la moyenne BREBAN-M13

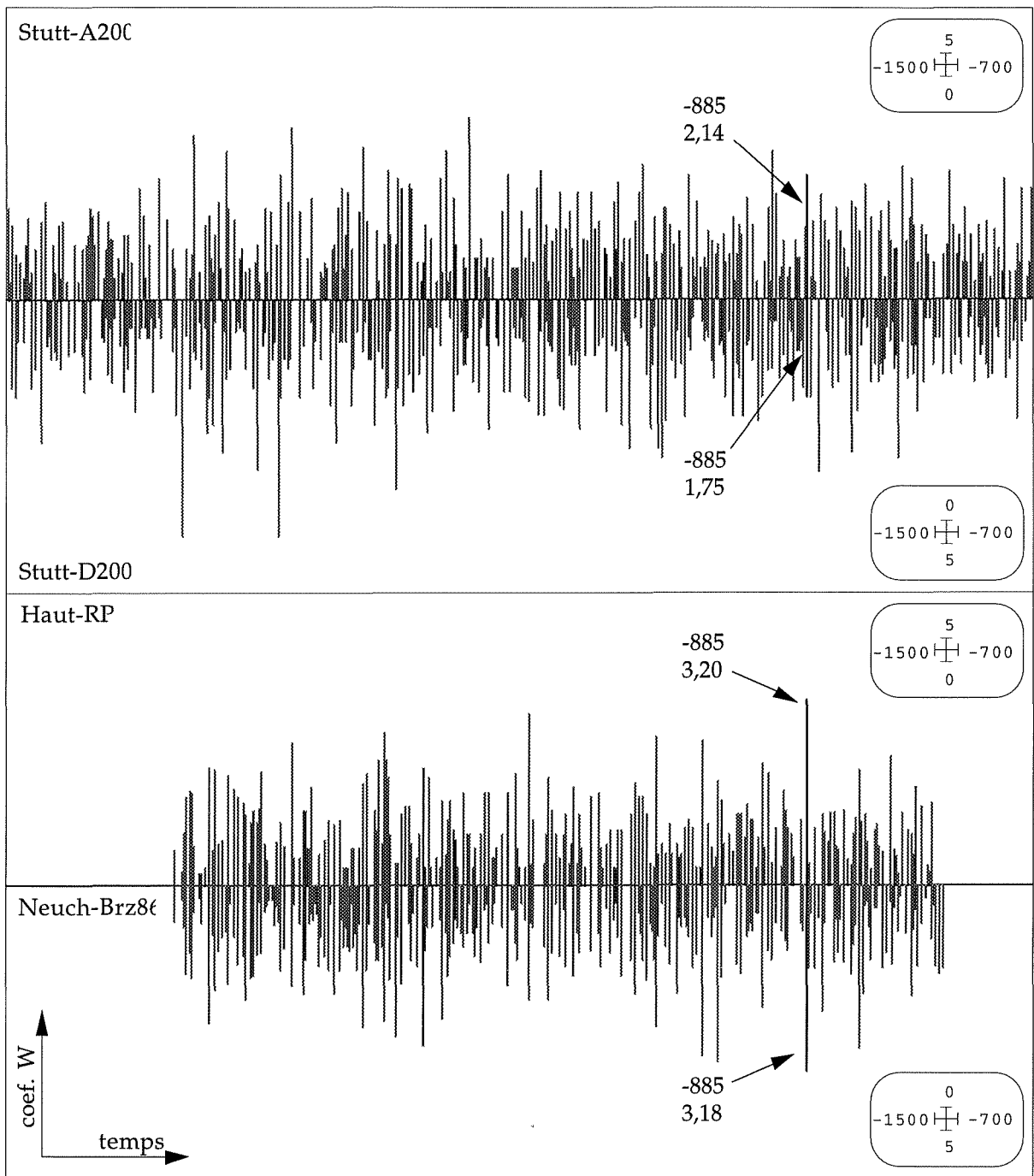


Figure 64 : résultats de datation (coefficient W, valeurs brutes) de la moyenne BREBAN-M20

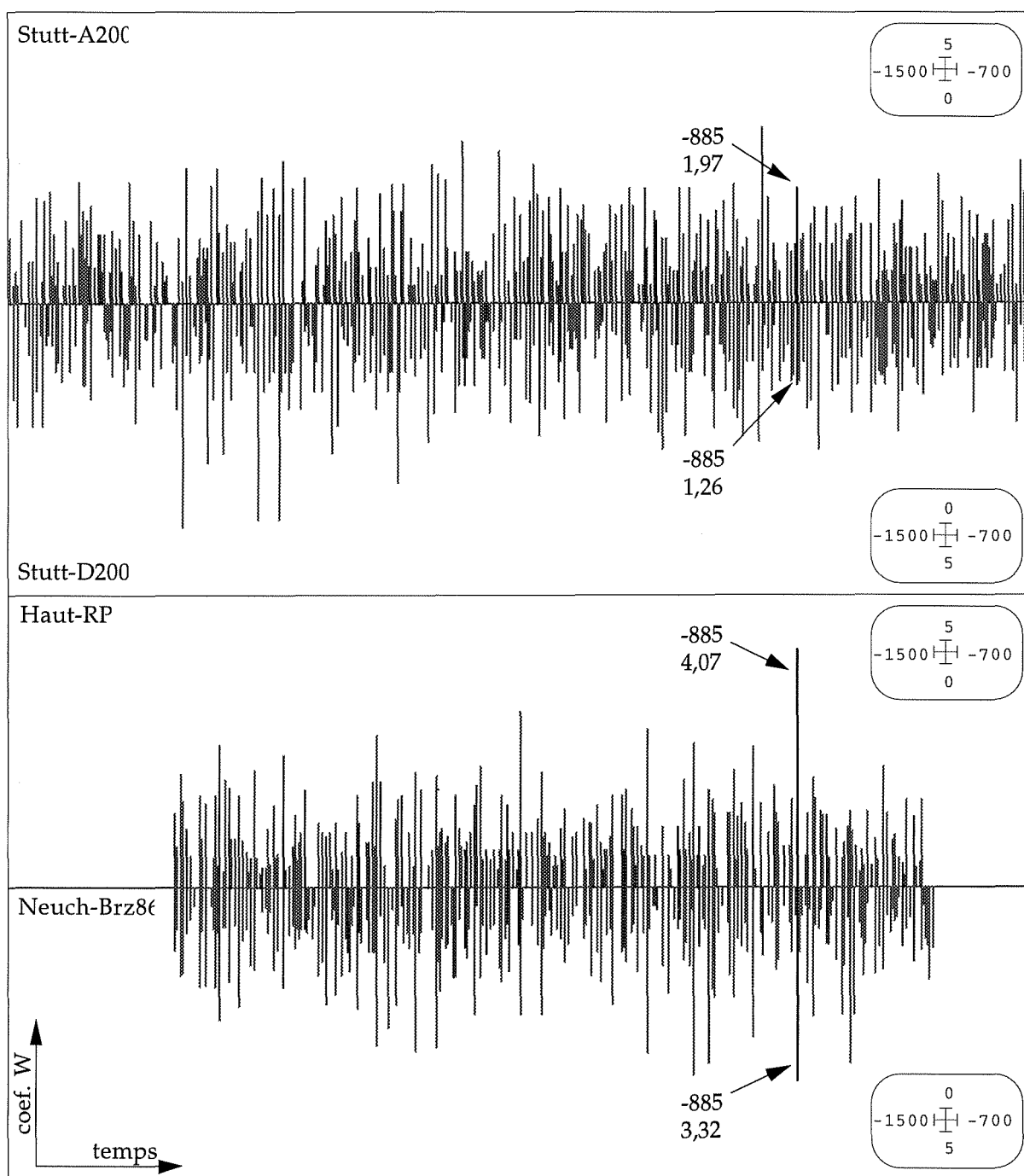


Figure 65 : résultats de datation (coefficient W, valeurs brutes) de la moyenne BREBAN-M21

#### 1.4.2 Résultats de datation en indices Except

Les deux moyennes M20 et M21 sont confrontées dans les mêmes conditions que M14 aux références. Pour la date 885 av. J.-C., du dernier cerne mesurable de M20 et de M21, les valeurs de Student sont élevées sur les quatre références (fig. 67 et 68). La proposition se dégage nettement du reste des valeurs. Une valeur "concurrente", avec un risque associée (directement issu de la table de Student) inférieur à 1/1000, est également observée sur les références suisses mais elle n'est pas répliquée sur celles de Stuttgart. La date de -885 peut être retenue alors que M14 ne synchronise pas significativement à cette proposition.

Dans les mêmes conditions de calculs, la date de -976 pour M13 n'est pas perceptible. Il n'apparaît pas d'autre proposition (fig. 66)

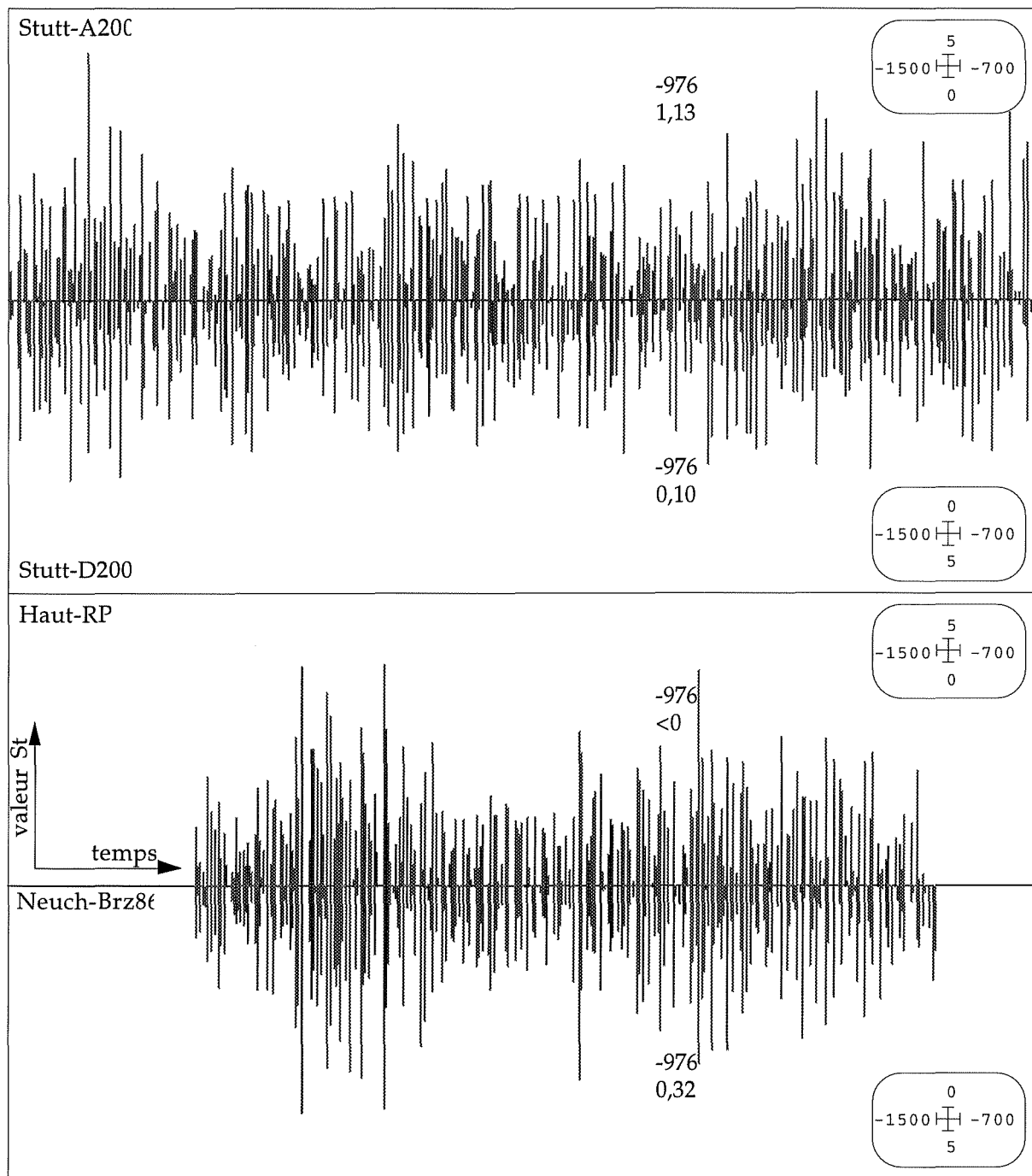


Figure 66 : résultats de datation (valeur t de Student, indices E) de la moyenne BREBAN-M13

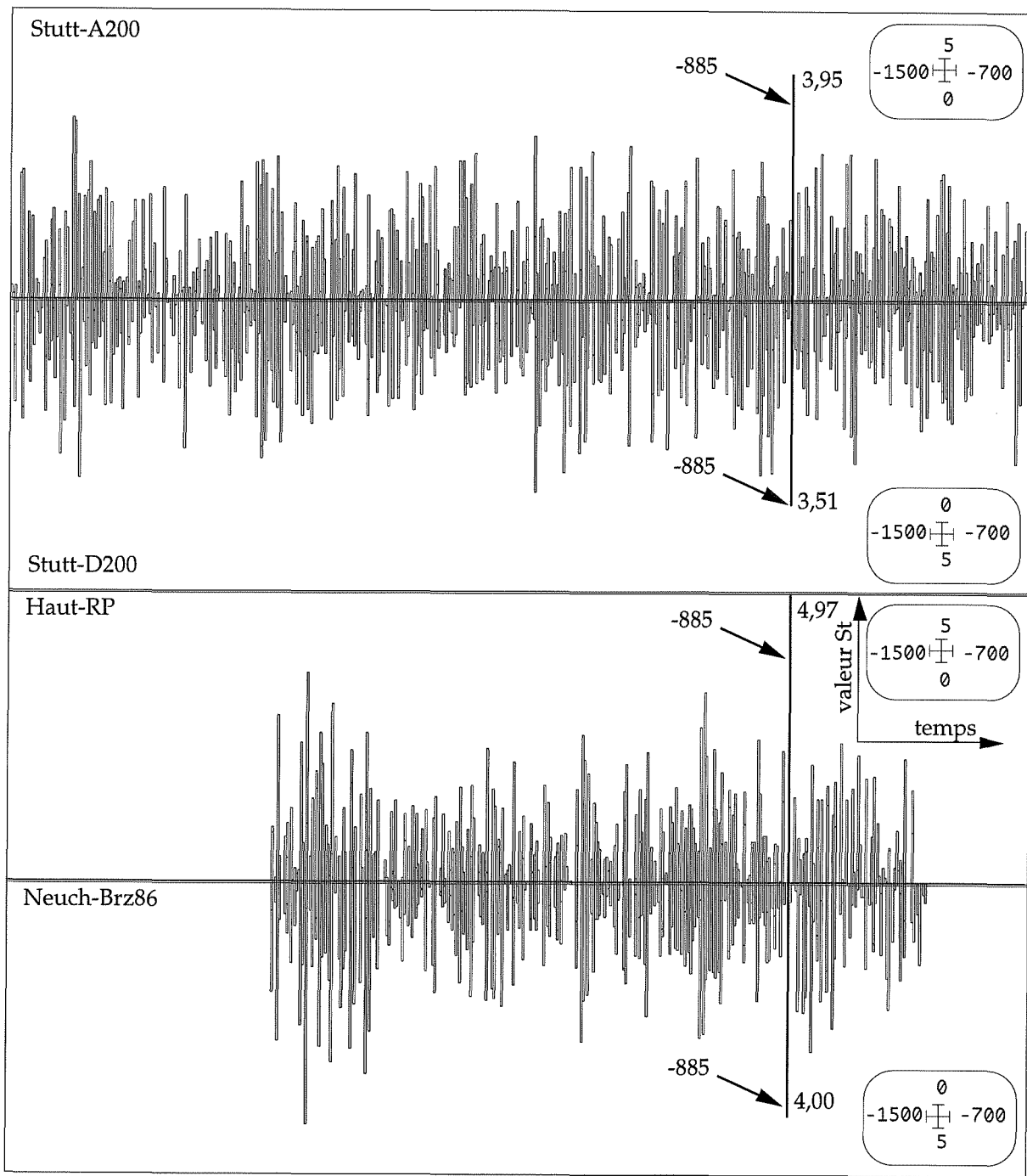


Figure 67 : résultats de datation (valeur t de Student, indices E) de la moyenne BREBAN-M20



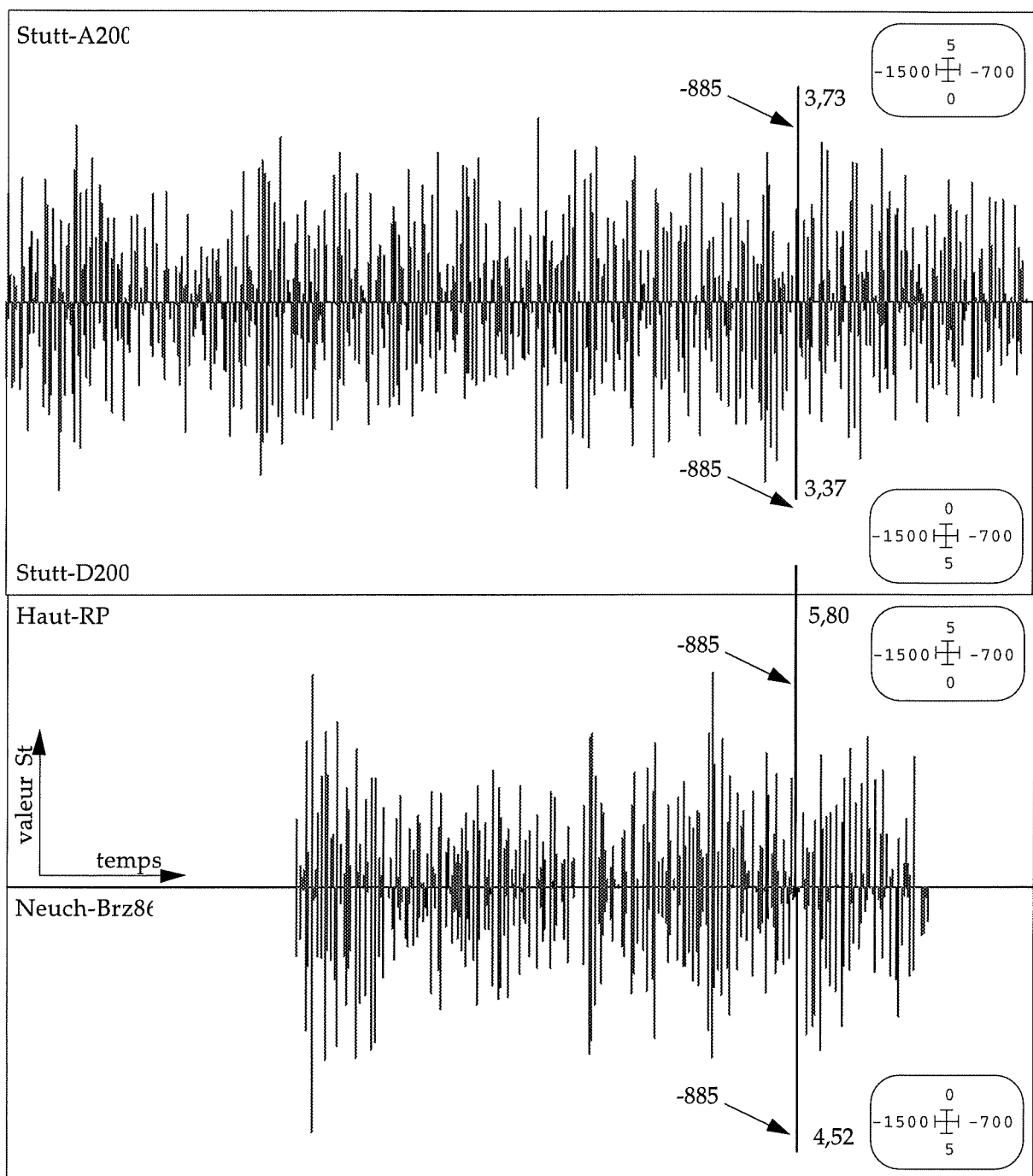


Figure 68 : résultats de datation (valeur  $t$  de Student, indices  $E$ ) de la moyenne BREBAN-M21

La proposition de -885 pour M20 et M21 peut-être retenue avec une sécurité qui est supérieure à celle de BREBAN-M13 pour -976. En routine, la date serait considérée acquise. Cependant la sécurité associée aux dates reste très difficile à chiffrer, car l'utilisation des tables de Student et de loi Normale n'est pas totalement justifiable dans le cas d'un test dendrochronologique et l'indépendance des datations sur les références ne se vérifie pas (cf. Chap. 1 et 1.4.4).

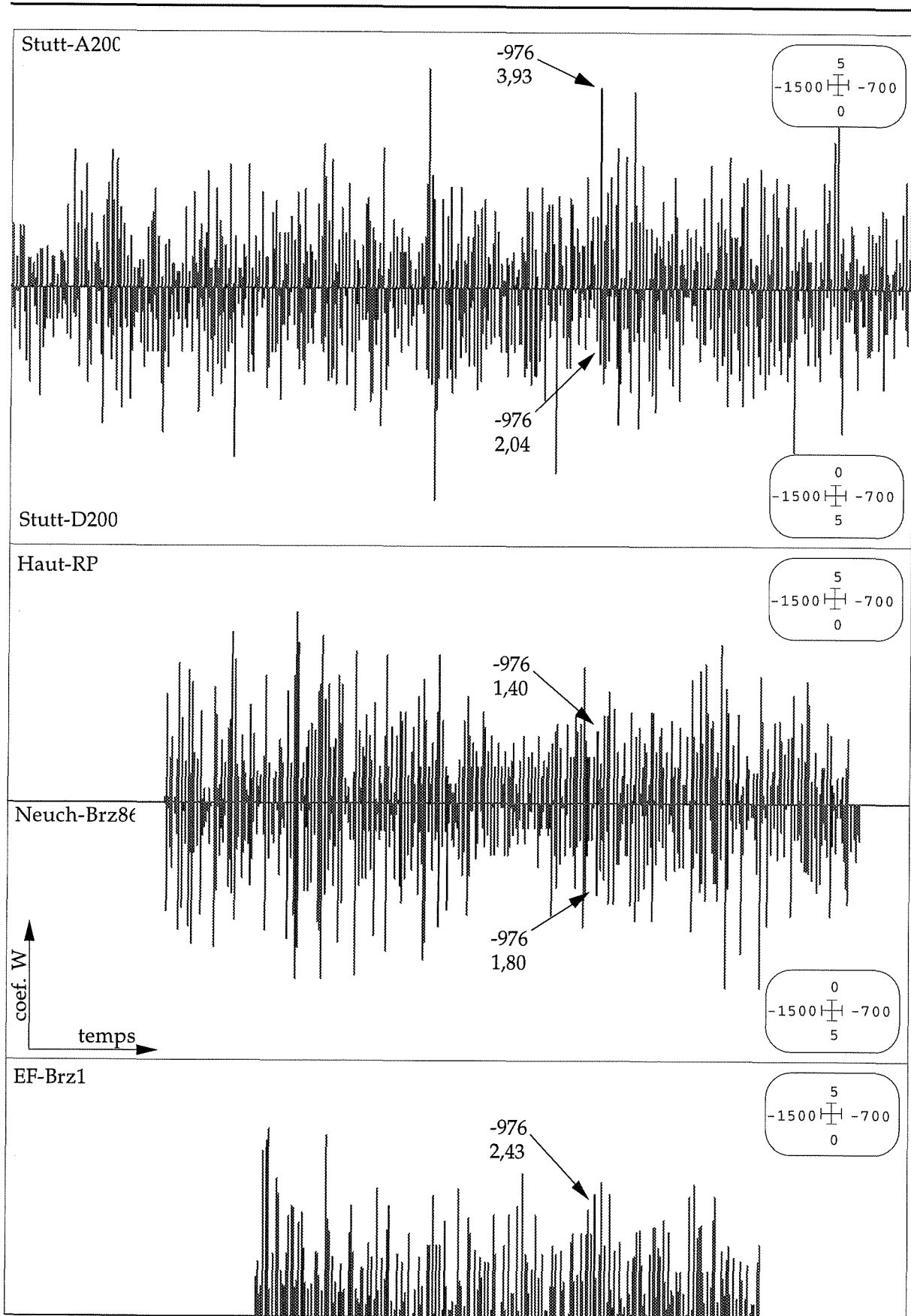


Figure 69 : résultats de datation (coefficient W, indices H) de la moyenne BREBAN-M13

### 1.4.3 Résultats de datation en indices de Hollstein

Pour estimer le synchronisme entre des séries en indices de Hollstein, deux tests peuvent être menés. D'une part, la standardisation autorise l'utilisation du coefficient de corrélation et sa valeur de Student associée. Nous avons vu que sur le plan théorique ces conditions de calculs sont bonnes (cf. chap. 1). D'autre part, il est possible de réaliser un test de Eckstein qui ne considérera que le sens des pentes entre deux indices consécutifs.

Il est beaucoup plus difficile de justifier ce choix sur le plan théorique et biologique. En effet l'indice de Hollstein est basé sur la différence entre deux largeurs de cernes consécutifs (cf. chap. 1). De ce fait la valeur d'une année est, en elle-même, un écart : un indice fort signifie une forte augmentation de la largeur par rapport à l'année antérieure et un indice

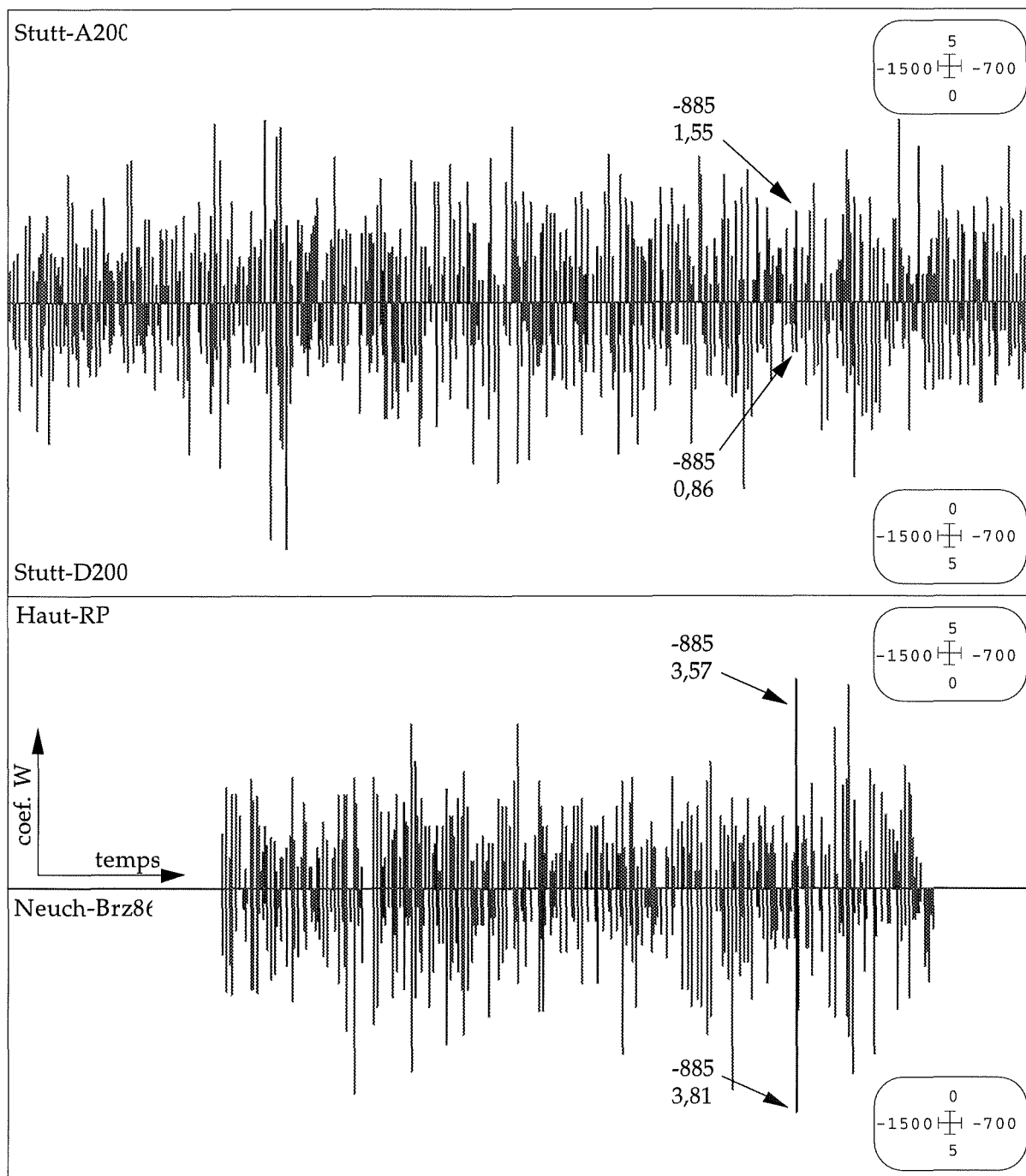


Figure 70 : résultats de datation (coefficient W, indices H) de la moyenne BREBAN-M20

faible une chute de production. Il semble donc plus intéressant de juger des dispersions autour de leur moyenne des indices eux-mêmes, comme dans le cas de l'utilisation du coefficient de corrélation, que de transformer ces indices en pentes représentatives de variations d'écart. Dans ce cas, le pourcentage de pentes concordantes ne représente plus une simple co-variation comme dans le cas de valeurs brutes ou d'indices Except. Malgré ces critiques théoriques par expérience de datations le test de Eckstein est appliqué aux indices de Hollstein est utilisé. C'est la procédure qui a été choisie pour dater M13 (LAMBERT et LAVIER 1992b).

Un coefficient égal à 3,93 est observé au troisième rang des propositions entre le référentiel Stutt-A200 et M13 (fig. 69) à la date de -976. La valeur est très inférieure sur Stutt-D200. Des coefficients faibles sont observés sur les références de Neuchâtel. A la même date, le coefficient s'élève à 2,43 sur EF-Brz1. La référence est hétérogène mais plusieurs de ses

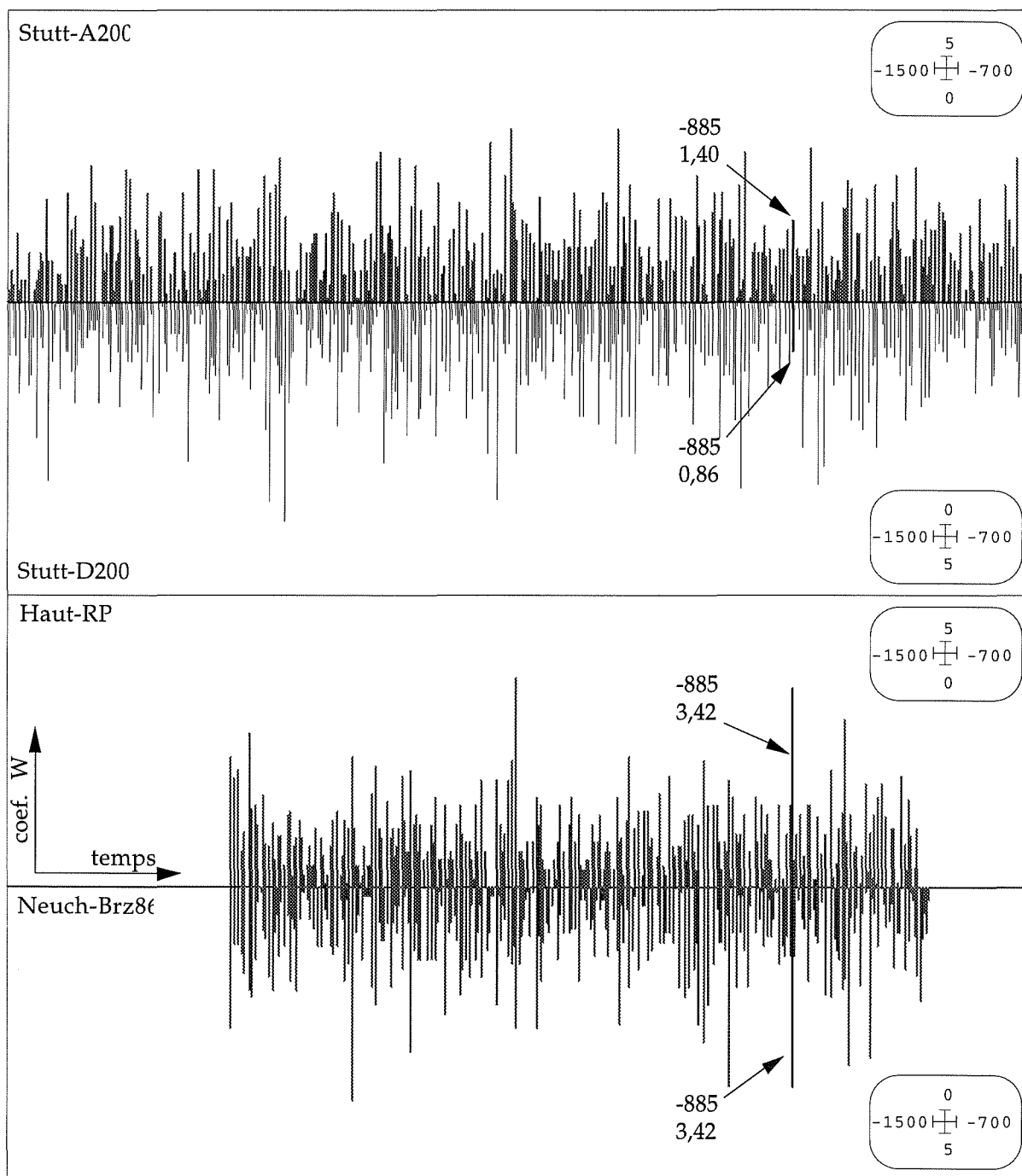


Figure 71 : résultats de datation (coefficient W, indices H) de la moyenne BREBAN-M21

composantes confirment la date (fig. 61). Enfin, un coefficient s'élevant à 2,06 est observé sur la référence du lac de Zug malgré un éloignement important (fig. 61).

La conjonction de ces résultats a justifié le choix de cette date par LAMBERT et LAVIER (1992b). Cependant, du fait des faibles coefficients, notamment sur les références de Neuchâtel selon cette procédure, des résultats encore plus faibles dans les autres procédures et des caractéristiques de M13, le choix a également été orienté par l'hypothèse archéologique. La date correspond au contexte archéologique Bronze final. La date est divulguée sous le terme "proposition", elle nécessite des investigations supplémentaires lorsque de nouveaux bois sont datés dans la région ou pour la période. La part dendrochronologique du choix repose sur cette procédure de calcul.

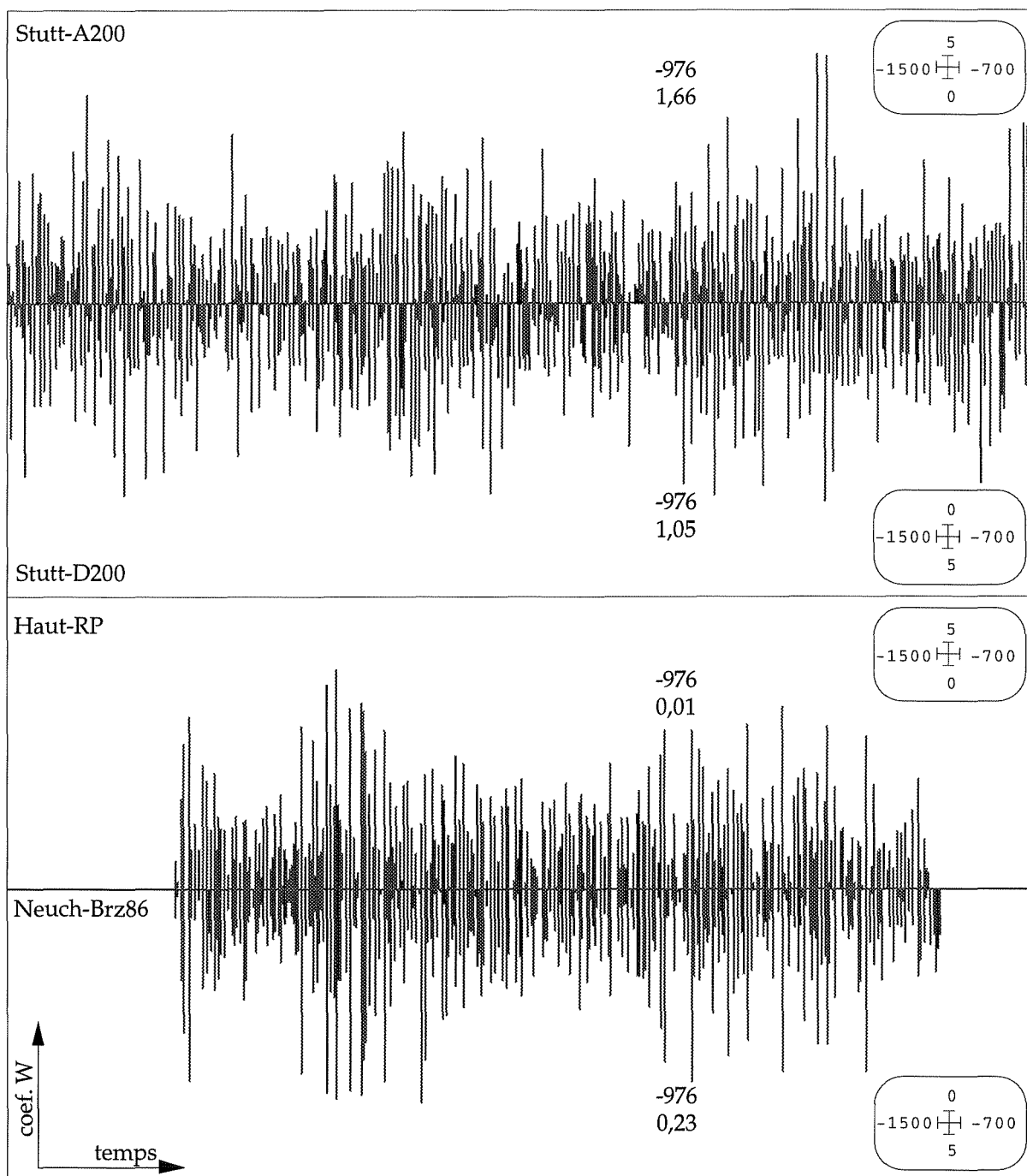


Figure 72 : résultats de datation (valeur  $t$  de Student, indices  $H$ ) de la moyenne BREBAN-M13

En comparaison, les datations de M20 et M21 dans les mêmes conditions (tests de Eckstein appliqué aux indices de Hollstein), présentent des résultats élevés sur les références de Neuchâtel très redondantes et faibles sur celles de Stuttgart à l'année terminale -885 (fig. 70 et fig. 71). La sélection des bois n'est pas favorable dans ce cas. M21 présente des coefficients inférieurs à ceux observés avec M20. La qualité des résultats de synchronisation de ces deux moyennes est voisine de celle obtenue avec M13. Les étalons mis en jeu ne sont cependant pas les mêmes.

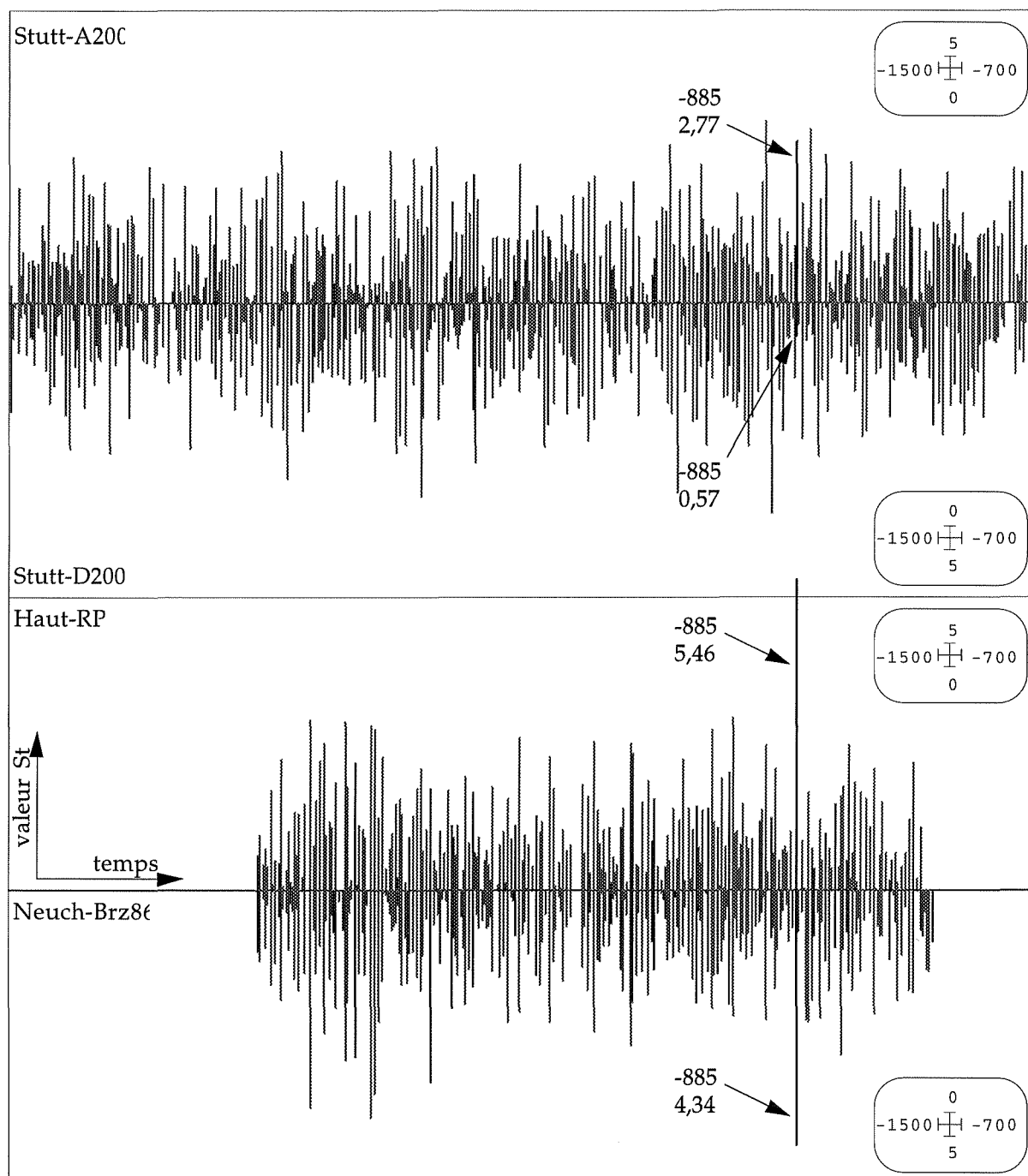


Figure 73 : résultats de datation (valeur  $t$  de Student, indices  $H$ ) de la moyenne BREBAN-M20

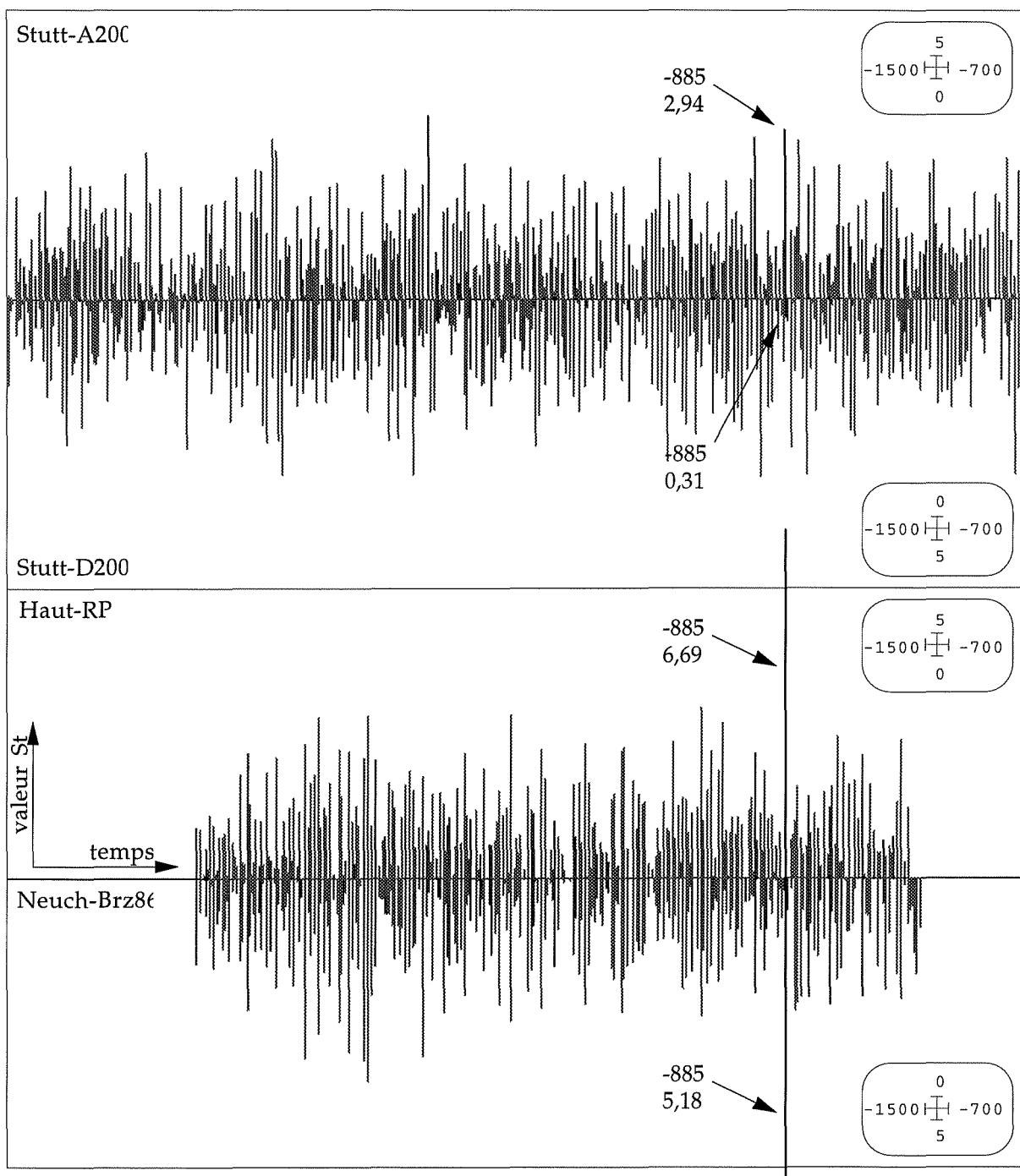


Figure 74 : résultats de datation (valeur  $t$  de Student, indices  $H$ ) de la moyenne BREBAN-M21

De façon à se placer dans une situation mieux soutenue sur le plan théorique et biologique, les datations sont répétées en utilisant le coefficient de corrélation.

On observe, dans ce cas, que la datation de M13 n'est plus perceptible, y compris sur Stutt-A200 où la valeur de Student s'élève à 1,66 (fig. 72). Les valeurs de Student pour les moyennes M20 et M21 à la date de -885 se dégagent très nettement sur les références de Neuchâtel (fig. 73 et fig. 74). La datation de M20 et M21 sur Stutt-A200 conduit à des valeurs faibles, qui ne se dégagent pas des autres calculs, mais qui se situent respectivement au 5<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> rang des propositions. La "réponse" de Stutt-A200 est beaucoup plus positive que dans le cas du test de Eckstein. La corrélation avec Stutt-D200 reste non significative. Dans cette procédure, les coefficients obtenus avec M21 sont supérieurs à ceux obtenus avec M20.

---

#### 1.4.4 Estimation du risque d'erreur associé aux datations

En routine, le calcul du risque associé à une datation ne participe pas directement aux choix qui sont réalisés dans la liste de propositions issue de l'étape de synchronisation. Car, d'une part, son calcul repose sur des bases statistiques qui ne sont pas complètement vérifiables et, d'autre part, les valeurs utilisées sont très faibles et peuvent causer des incompréhensions. Les seuils empiriques ont toujours été définis avec les coefficients eux-mêmes. Par contre, l'estimation du risque, en essayant de quantifier la qualité de celle-ci, devrait être plus utilisée pour la justification d'une date.

Le risque d'erreur ( $\alpha$ ) associé à une date est obtenu en utilisant les propriétés de distribution des coefficients de synchronisation :  $t$  dans le cas d'un test de Student et  $W$  dans le cas du test de Eckstein. Il est admis ici que  $t$  suit une loi de Student et  $W$  une loi normale. Cette acception constitue la part difficilement vérifiable qui rend critiquable l'utilisation du risque d'erreur (cf. chap. 1). Par exemple LAMBERT (*in* GASSMANN *et al.* 1996) montre qu'en fonction du nombre de cernes, un coefficient  $W$  donné n'est pas forcément associé à un même risque d'erreur.

Le risque d'erreur associé à une date "acquise" doit en effet être très faible, par exemple :  $\alpha < 0,001$ .

Ceci s'explique par la nature du test de synchronisation. S'il est exprimé sous forme d'une fraction (comme 1/1000 ou 1‰) il ne peut avoir un dénominateur inférieur à la période de recherche. Dans le cas contraire, si la série à dater peut synchroniser, avec la même confiance statistique, en plusieurs points de la référence, plusieurs dates existeraient. En routine, la période de recherche est classiquement longue, car elle garantit l'indépendance des démarches de datation typologiques et expérimentales. Ainsi, un site historique est classiquement daté sur la période allant de 900 au XXe siècle, soit sur environ 1000 ans, quelles que soient les hypothèses avancées. Ces périodes de recherches sont en fait très orientées par la disponibilité générale des références : ainsi dans l'âge du Bronze, la quasi absence des références du Bronze ancien implique que les datations se déroulent dans de bonnes conditions uniquement sur la période, assez courte, comprise entre -1400 et -800.

Il existe donc un lien entre la période de recherche sur les références et le risque maximum à associer à une date. Il faut relativiser la valeur  $\alpha$ , obtenue pour une synchronisation particulière, par rapport à la période de recherche. Ceci revient à estimer si  $\alpha$  est exceptionnelle par rapport aux nombreux calculs réalisés.

Une première approche est de suivre ORTON (1983) qui a montré que le risque associé à une valeur  $t$  particulière lorsque l'on en calcule des milliers n'est en fait pas directement lisible dans la table de Student. Il faut tenir compte, en plus du degré de liberté (ddl), du nombre de calculs réalisés entre les deux séries ( $N$ ) (cf. chap.1). Dans ces conditions, le risque de 5% constituerait un seuil qui permet de définir une valeur  $t$  critique pour les conditions de datation (ORTON 1983). Le calcul en lui-même n'est pas classiquement réalisé mais il est implicitement admis lorsque le dendrochronologue ne définit comme dates acquises que celles dont le risque est nettement inférieur à l'inverse de la période de recherche.

La signification d'une valeur  $t$  est également fonction de la distribution des  $N$  valeurs calculées. Ainsi dans la datation de M21 sur Haut-RP (fig. 74) la valeur  $t$  est exceptionnelle car d'une part, elle est élevée et d'autre part, elle se dégage très nettement des autres valeurs représentant les positions de non synchronisme. MUNRO (1984) propose de tenir en partie compte des caractéristiques de la distribution des  $t$  en utilisant leur moyenne et leur écart-



type (cf. chap. 1). Dans la majorité des cas, cette prise en compte aboutit à une augmentation du risque (tab. 28 B et C). En effet, l'autocorrélation présente dans les séries de valeurs brutes est pratiquement supprimée dans les séries indicées mais une autocorrélation induite existe, due aux méthodes mêmes de standardisation, et influence la distribution des N valeurs t. La prise en compte de cette distribution dans le calcul du risque maîtrise une part des artefacts produits par la standardisation.

La définition d'un risque relativisé par rapport aux conditions de recherche permet de déterminer si la qualité du synchronisme entre la série à dater et une référence est suffisante pour assurer, à elle seule, que les séquences sont contemporaines à un risque près. Lorsque l'opération est répétée sur des références les plus indépendantes possibles, s'il y a concordance des dates, les risques associés à chaque événement isolé sont multipliés donc largement diminués. Cette démarche est très importante dans notre cas, car les références proviennent d'aires limitrophes. Elles ne représentent pas directement les conditions générales de croissance des arbres intégrés aux moyennes de site. Lorsque le risque est très faible dans ces conditions défavorables la date en est donc encore plus assurée.

	valeur t, indices E			coef. W, valeurs brutes		
	M21	M20	M13	M21	M20	M13
A : Haut-RP coefficient	5,80	4,98	-0,17	4,07	3,20	1,83
Neuch-Brz86	4,52	4,00	0,32	3,32	3,18	2,72
Stutt-A200	3,73	3,95	1,13	1,97	2,14	3,36
Stutt-D200	3,37	3,32	0,01	1,26	1,75	1,31
B : Haut-RP risque a	2E-08	8E-07	9E-01	2E-05	7E-04	3E-02
Neuch-Brz86	6E-06	5E-05	4E-01	5E-04	7E-04	3E-03
Stutt-A200	1E-04	6E-05	1E-01	2E-02	2E-02	4E-04
Stutt-D200	5E-04	5E-04	5E-01	1E-01	4E-02	1E-01

	valeur t, indices H			coef. W, indices H		
	M21	M20	M13	M21	M20	M13
A : Haut-RP coefficient	6,69	5,82	0,00	3,42	3,57	1,40
Neuch-Brz86	5,18	4,51	0,23	3,42	3,81	1,80
Stutt-A200	2,94	3,14	1,66	1,40	1,55	3,93
Stutt-D200	2,61	2,74	1,05	0,86	0,86	1,55
B : Haut-RP risque a	2E-10	1E-08	5E-01	3E-04	2E-04	8E-02
Neuch-Brz86	3E-07	6E-06	4E-01	3E-04	7E-05	4E-02
Stutt-A200	2E-03	1E-03	5E-02	8E-02	6E-02	4E-05
Stutt-D200	5E-03	3E-03	1E-01	2E-01	2E-01	6E-02

Tableau 27 : résultats de datation et risques associés de BREBAN-M13 (datation de 1992), M20 (moyenne totale), M21 (moyenne partielle), gras coefficients significatifs

La période de recherche pour laquelle la datation de la moyenne de site de BREBAN est réalisée s'étend de -1700 à -700 soit 1000 ans. Elle est complètement couverte par les références de Stuttgart. En considérant un chevauchement minimum de 80 ans, environ 900 synchronisations sont testées (tab. 28A). Pour les références de Neuchâtel, le premier cerne est daté de -1450 et le dernier de -869. Pour le même chevauchement minimum, environ 600 calculs sont réalisés (tab. 28 A). Les différentes chronologies moyennes testées comportent toutes plus de 160 cernes. Dans ces conditions de datation, la valeur t de Student minimale pour que le risque selon ORTON (1983) soit inférieur à 5% s'élève à 3,9 pour les références de Stuttgart et à 3,8 pour celles de Neuchâtel. Les différences pour un nombre de cernes assez élevé sont faibles (fig. 49 chap. 1).

		Indices E		Indices H	
		M21	M20	M21	M20
A : Haut-RP	N	587	594	587	594
	$\sigma$	1,195	1,172	1,139	1,145
	t moy	1,59E-03	-2,38E-03	2,27E-03	5,72E-04
Neuch-Brz86	N	597	604	597	604
	$\sigma$	1,205	1,188	1,14	1,149
	t moy	-2,21E-03	-5,55E-03	-1,24E-03	-2,38E-03
Stutt-A200	N	927	934	927	934
	$\sigma$	1,211	1,213	1,131	1,138
	t moy	-1,06E-03	-3,90E-04	-1,38E-03	-1,37E-03
Stutt-D200	N	935	942	935	942
	$\sigma$	1,198	1,199	1,125	1,126
	t moy	-1,93E-03	-1,24E-03	-1,07E-03	-1,97E-03
B : Haut-RP	$1-(1-P(t))^N$	9E-06	5E-04	1E-07	8E-06
Neuch-Brz86		3E-03	3E-02	2E-04	4E-03
Stutt-A200		1E-01	5E-02	8E-01	6E-01
Stutt-D200		4E-01	4E-01	-	-
C : Haut-RP	NP(t')	3E-04	8E-03	1E-06	8E-05
Neuch-Brz86		5E-02	3E-01	2E-03	2E-02
Stutt-A200		9E-01	6E-01	-	-
Stutt-D200		-	-	-	-

Tableau 28 : calcul du risque en fonction de la période et de la distribution des valeurs t. A : N nombre de valeurs t calculées, t moy valeur t moyenne,  $\sigma$  écart-type de t. B : risque selon ORTON 1983. C : risque selon MUNRO 1984

Les valeurs t obtenues sur les références de Neuchâtel pour les moyennes BREBAN-M20 et M21 sont supérieures à ce seuil pour les deux standardisations (tab. 27A). Les risques très faibles obtenus directement dans la table de Student (tab. 27B) restent très significatifs si on les relativise par rapport à la période de recherche (tab. 28B). La valeur de risque la plus faible est observée entre M21 et Haut-RP. Elle s'élève à  $3 \cdot 10^{-4}$  et  $10^{-6}$  selon la standardisation, si la distribution des valeurs t (tab. 28A) est prise en compte (tab. 28C). Ce risque d'erreur est très faible. Dans ces conditions, les résultats obtenus sur la référence Neuch-Brz86 sont au seuil de signification pour M21 (tab. 28C). La valeur t de 4,00 significative par rapport à la

		M20	M21
Haut-RP	N	594	587
	$\sigma$	0,913	0,942
	Wmoy	-4,54E-02	-4,47E-02
Neuch-Brz86	N	604	597
	$\sigma$	0,914	0,952
	Wmoy	-3,50E-02	-2,67E-02
Stutt-A200	N	934	927
	$\sigma$	0,959	1,007
	Wmoy	-4,01E-02	-4,49E-02
Stutt-D200	N	942	935
	$\sigma$	0,967	1,01
	Wmoy	-4,15E-02	-4,26E-02

Tableau 29 : caractéristiques de distribution des coefficients W

période de recherche (tab. 28B) ne se dégage pas assez nettement du reste des propositions pour que le risque soit inférieur à 5% si l'on tient compte de la distribution des valeurs t (tab. 28C)). Sur les figures 73 et 74 on peut juger graphiquement des différences de "dégagement" des propositions de datation des deux moyennes.

Les synchronisations observées entre les références de Stuttgart et ces moyennes sont beaucoup moins sûres. Les valeurs t sont proches du seuil défini pour Stutt-A200 mais si l'on tient compte de la période de recherche et de la distribution, ces résultats ne sont pas significatifs (tab. 28). Seule la valeur de 3,95 observée entre Stutt-A200 et M20 standardisées en indices E est significative à

---

5%. Cependant même cette valeur ne se dégage pas suffisamment des autres et reste non significative si la distribution des valeurs t est considérée. Les figures 73 et 74 montrent qu'à la date -885 les valeurs t ne sont pas exceptionnelles par rapport aux autres.

La distribution des coefficients W ne fait pas l'objet d'une littérature aussi riche que celle des valeurs t. Le calcul du W moyen et de l'écart-type pour chaque datation montre que, pour ces exemples, la moyenne tend vers 0 dans des proportions qui sont voisines de celle des valeurs t. L'écart-type est plus proche de 1, ce qui tendrait à montrer que la distribution des coefficients W est plus proche d'une distribution Normale réduite que celle des valeurs t (tab. 29). Pour relativiser la valeur a par rapport à la période de recherche, un risque inférieur à l'inverse de cette période peut être considéré comme une première limite. Les risques inférieurs à 10<sup>-3</sup> seraient significatifs (tab. 27B). Cependant, par analogie des procédures employées pour la valeur t, un coefficient W critique est déterminé. Il peut être jugé significatif à 5% par rapport au nombre de calculs réalisés. Ce coefficient s'élève à 3,7 pour une datation sur les références de Neuchâtel et 3,8 sur celles Stuttgart plus longues. Deux synchronisations sont significatives selon ce critère : elles sont observées entre M21 et Haut-RP en valeurs brutes et entre M20 et Neuch-Brz86 en indices H (tab. 27B).

Dans ces conditions de datation, que l'on peut juger sur le plan théorique moins favorables, les résultats sont moins significatifs que précédemment. Les valeurs observées ne sont pas suffisamment exceptionnelles pour définir à elles seules que les deux séries sont contemporaines.

Les tests de synchronisme entre M13 et les références ne conduisent à des risques faibles que dans une procédure : le test de Eckstein appliqué aux indices de Hollstein (tab. 27). Par rapport aux conditions de datation, ce risque est faible uniquement pour la comparaison de M13 et Stutt-A200. Le calcul aboutit à une valeur  $\alpha = 4 \cdot 10^{-5}$  (tab. 28B) qui ne peut justifier à elle seule le choix de la date. Dans la plupart des autres situations, le risque est supérieur à celui associé aux datations de M20 et M21. Des coefficients très faibles sont observés. C'est particulièrement le cas des valeurs t en indices E (tab. 27). Selon les standardisations ou le type de test, les résultats de synchronismes ne sont pas homogènes. Il est absolument nécessaire de disposer d'informations externes à la dendrochronologie pour sélectionner la position de synchronisme. La datation ne relevant pas des seuls critères dendrochronologiques est une "proposition de date coïncidante avec le contexte archéologique".

#### *1.4.5 Comparaison des résultats*

Les résultats de datation des deux moyennes M20 et M21 sont associés à des risques très faibles sur les références de Neuchâtel standardisées. A une position de recouvrement équivalente sur les références de Stuttgart, le synchronisme observé ne permet pas, à lui seul, de déterminer si les deux séries sont contemporaines. Cependant, les valeurs des coefficients observés ne sont pas contradictoires avec la proposition. La concordance des deux événements qui peuvent être jugés partiellement indépendants est associée à une probabilité qui est très forte. Le risque d'erreur de datation de M21 et, dans une moindre mesure, pour M20 peut être considéré très faible, la date -885 est acquise, ce qui implique l'abandon de la datation de M13.

Les deux chronologies moyennes datées présentent une valeur d'EPS supérieure à celle de M14 dont le synchronisme avec les références n'est jamais significatif. La corrélation moyenne pour ces deux chronologies est diminuée mais les bois supplémentaires compensent

cette perte. Il semble donc que l'utilisation d'un seuil d'EPS ne soit pas toujours pertinente, car une moyenne homogène peut représenter la croissance d'un groupe d'arbres soumis à des facteurs locaux originaux et ne pas synchroniser avec l'étalon. Par contre, pour un lot donné, la recherche de la chronologie moyenne qui possède la valeur d'EPS maximale, pour une corrélation moyenne également maximale, permet d'obtenir des résultats de datation similaires voire supérieurs à ceux obtenus pour la moyenne comportant tous les bois synchronisés. En effet, le rejet de 3 individus de M20 renforce la cohésion du signal et n'altère pas la représentativité régionale. Dans la plupart des procédures de synchronisation, les coefficients sont plus élevés pour M21.

Homogénéiser une chronologie moyenne la rend plus représentative d'un signal mieux défini. Cependant rien ne préjuge des facteurs qui permettent la cohésion du groupe. On peut communément attendre que l'information régionale soit commune aux individus du lot. Dans ce cas, la chronologie moyenne homogénéisée représente plus clairement cette information. Mais si des facteurs locaux participent fortement à cette cohésion, une chronologie moyenne homogénéisée pourra être aussi singularisée. Dans le cas de Bréban, M14 est trop singulière, M20 présente une dispersion et M21 le signal le plus clair.

## 2 Homogénéisation de la moyenne de site VANDIERES-M18 (54)

La moyenne de site de VANDIERES-M18 est datée avec un risque d'erreur très faible. Le dernier cerne mesuré a été élaboré durant l'année -1093. Cependant, pour intégrer les données du site au référentiel Lor-Brz, la moyenne de site est homogénéisée. Le but est de sélectionner les individus dont la croissance participe le mieux au signal commun défini par la chronologie moyenne. La même procédure que pour homogénéiser la chronologie

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
1 VAN.6		5,12	5,48	1,66	3,68	4,41	2,79	3,97	7,16	0,41	4,41	2,27	2,87	3,32	0,19	4,08	2,89	1,00	3,38	2,81	2,08	4,63	2,10	5,74	2,26	2,17	
2 VAN.28	5,12		10,15	5,57	2,97	6,29	1,09	2,67	3,33	-0,42	2,82	4,04	3,95	4,22	1,28	4,62	3,14	0,10	1,69	2,91	1,78	1,14	2,60	4,81			
3 VAN.40	5,48	10,15		6,29	5,08	6,25		2,00	4,56	-0,90	1,48	2,74	3,08	3,98	1,04	3,41	3,93	1,68	1,25	3,46	3,79	1,57	1,74	3,58	2,88	1,90	
4 VAND.incl1	1,66	5,57	6,29		2,73	4,41		1,41	3,87	-0,24	2,07	2,88	2,66	4,14	2,37	3,31	3,48	0,97	1,00	1,79	3,07	1,54	0,42	1,50	-0,39	0,76	
5 VAN.22	3,68	2,97	5,08	2,73		5,71		3,53	5,94	-0,55	2,34	1,21	5,68	6,07	-0,37	5,35	7,91	1,34	3,06	3,11	1,30	1,73	4,33	7,85	1,58	1,38	
6 VAN.14	4,41	6,29	6,25	4,41	5,71		-0,91	3,53	4,56	-0,76	3,38	1,82	4,41	5,56	2,29	4,73	4,59	1,04	2,28	4,38	4,23	1,13	4,28	6,01	3,09	1,73	
7 VAN.9.2	2,79	1,09				-0,91		0,65	1,78		0,83	1,04	1,18	0,70		1,59					2,53	1,06		3,40		1,27	
8 VAN.23	3,97	2,67	2,00	1,41	3,53	3,53	0,65		3,47		2,52	1,43	4,93	6,30		3,20	2,50			0,82	0,96	0,74	2,17			3,33	
9 VAN.36	7,16	3,33	4,56	3,87	5,94	4,56	1,78	3,47		0,13	3,61	1,55	4,13	3,85	-0,61	6,56	4,63	1,68	3,94	3,80	2,60	5,06				4,14	
10 VAN.33.2	0,41	-0,42	-0,90	-0,24	-0,55	-0,76				0,13	0,59	2,31	-2,12	-2,22	0,84	0,50	0,13	1,61	-0,64	1,98	-0,24	-0,45				-0,97	
11 VAN.25	4,41	2,82	1,48	2,07	2,34	3,38	0,83	2,52	3,61	0,59		1,01	1,51	1,55	-0,67	3,09	1,29	0,60	3,17	1,50	2,05	1,29				2,88	
12 VAN.31	2,27	4,04	2,74	2,88	1,21	1,82	1,04	1,43	1,55	2,31	1,01		1,83	1,15	2,75	2,00	0,85	1,06	1,80	0,94	1,78	1,85	1,43	3,90			
13 VAND.incl2	2,87	3,95	3,08	2,66	5,68	4,41	1,18	4,93	4,13	-2,12	1,51	1,83			9,89	-0,88	3,56	3,94	-0,12	2,00	3,42	2,32	0,56	-0,63	3,61		
14 VAN.1	3,32	4,22	3,98	4,14	6,07	5,56	0,70	6,30	3,85	-2,22	1,55	1,15	9,89		0,98	2,86	5,02	-0,96	2,24	3,35	2,25	0,48	0,27	4,48			
15 VAN.55	0,19	1,28	1,04	2,37	-0,37	2,29				-0,61	0,84	-0,67	2,75	-0,88	0,98		0,21	0,01	0,96	0,82	1,41	2,21	0,22	2,18	-0,10		
16 VAN.24	4,08	4,62	3,41	3,31	5,35	4,73	1,59	3,20	6,56	0,50	3,09	2,00	3,56	2,86	0,21		4,36	1,04	1,96	2,46	2,94	3,14	1,68	5,12			
17 VAN.70.1	2,89	3,14	3,93	3,48	7,91	4,59		2,50	4,63	0,13	1,29	0,85	3,94	5,02	0,01	4,36		0,57	3,20	3,83	2,09	-0,34	2,23	3,31			
18 VAN.19A	1,00	0,10	1,68	0,97	1,34	1,04			1,68	1,61	0,60	1,06	-0,12	-0,96	0,96	1,04	0,57		0,23	1,93	0,91	0,24	0,17	0,11			
19 VAN.X	3,38	1,69	1,25	1,00	3,06	2,28	2,53	0,82	3,94	-0,64	3,17	1,80	2,00	2,24	0,82	1,96	3,20	0,23		1,39	1,82	3,09	2,06	1,57			
20 VAN.8	2,81	2,91	3,46	1,79	3,11	4,38	1,06	0,96	3,80	1,98	1,50	0,94	3,42	3,35	1,41	2,46	3,83	1,93	1,39		2,00	0,30	2,94	0,92			
21 VAN.37	2,08	1,78	3,79	3,07	1,30	4,23		0,74	2,60	-0,24	2,05	1,78	2,32	2,25	2,21	2,94	2,09	0,91		1,82	2,00		0,64	0,87	2,84		
22 VAN.30	4,63	1,14	1,57	1,54	1,73	1,13	3,40	2,17	5,06	-0,45	1,29	1,85	0,56	0,48	0,22	3,14	-0,34	0,24	3,09	0,30	0,64		-0,47	3,78	0,00	0,63	
23 VAN.7	2,10	2,60	1,74	0,42	4,33	4,28						1,43	-0,63	0,27	2,18	1,68	2,23	0,17	2,06	2,94	0,87	-0,47		5,14	0,06	0,22	
24 VAN.2	5,74	4,81	3,58	1,50	7,85	6,01	1,27	3,33	4,14	-0,97	2,88	3,90	3,61	4,48	-0,10	5,12	3,31	0,11	1,57	0,92	2,84	3,78	5,14		1,87	1,46	
25 VAN.38.2	2,26		2,88	-0,39	1,58	3,09																0,00	0,06	1,87		4,50	
26 VAN.59	2,17		1,90	0,76	1,38	1,73																0,63	0,22	1,46		4,50	

Tableau 30 : corrélations croisées des composantes de la moyenne VANDIERES-M18, valeur *t* de Student, indices E, gras : composantes atypiques.

moyenne BREBAN-M20 est employée.

La matrice carrée qui réunit toutes les valeurs de Student des corrélations calculables entre les composantes de la moyenne de site ne montre pas une structuration particulière (tab. 30). Quelques individus comme VAN.33.2 et VAN.38.2 sont atypiques. Ils présentent des

corrélations opposées ( $t < 0$ ) avec plusieurs individus et de faibles corrélations avec les autres. Ces résultats s'expliquent par un nombre de cernes très faible, respectivement 31 et 26. D'autres participent nettement à la cohésion du groupe : VAN.70.1, VAN.22, VAN.inc2. Les valeurs  $t$  qui leur correspondent sont élevées sauf éventuellement avec les individus atypiques. La corrélation moyenne qui unit ces individus s'élève à 0,27. Les analyses analogues de la croissance des peuplements vivants soumis à des conditions homogènes conduisent à des corrélations moyennes en général proche de 0,3. Cette population peut donc être considérée comme assez typique des lots analysés.

De façon à mieux mesurer la participation de chaque bois à l'élaboration de la moyenne de site, chaque composante est synchronisée avec la chronologie moyenne partielle

libellé	%90	%75	EPS(30)	rmoy	r	t	Nb c.
VandièresCont.33.2	22	45	0,990	0,295	-	-	31
VandièresCont.38.2	20	45	0,989	0,270	-	-	26
VandièresCont.55	20	44	0,989	0,283	-	-	47
VandièresCont.30	24	48	0,989	0,283	0,34	4,51	158
VandièresCont.9.2	25	43	0,989	0,274	0,34	2,85	63
VandièresCont.31	29	45	0,988	0,275	0,35	4,30	138
VandièresCont.X	24	47	0,988	0,277	0,38	4,55	127
VandièresCont.8	24	43	0,988	0,271	0,39	4,51	117
VandièresCont.incl	24	45	0,988	0,268	0,39	4,36	108
VandièresCont.37	24	44	0,988	0,273	0,42	4,22	87
VandièresCont.25	21	45	0,988	0,274	0,43	4,40	85
VandièresCont.7	20	47	0,989	0,270	0,48	4,33	64
VandièresCont.14	23	45	0,988	0,264	0,53	8,20	176
VandièresCont.2	21	47	0,988	0,269	0,54	8,67	189
VandièresCont.28	21	43	0,988	0,266	0,55	8,15	157
VandièresCont.59	22	44	0,989	0,270	0,56	3,74	33
VandièresCont.40	22	45	0,988	0,263	0,57	7,74	124
VandièresCont.36	22	45	0,987	0,254	0,58	7,43	113
VandièresCont.24	21	45	0,988	0,264	0,58	7,93	126
VandièresCont.Inc2	21	43	0,988	0,266	0,59	5,87	67
VandièresCont.19A	20	47	0,989	0,285	0,60	6,03	68
VandièresCont.6	22	47	0,988	0,266	0,60	9,39	157
VandièresCont.23	20	45	0,988	0,262	0,61	5,19	47
VandièresCont.1	21	43	0,988	0,264	0,62	6,68	74
VandièresCont.22	22	44	0,988	0,262	0,64	8,67	112
VandièresCont.70.1	20	44	0,988	0,263	0,64	6,16	56
<b>Vandières.M18</b>	<b>20</b>	<b>44</b>	<b>0,989</b>	<b>0,270</b>			
<b>Vandières.M20</b>	<b>38</b>	<b>56</b>	<b>0,979</b>	<b>0,322</b>			

Tableau 31 : homogénéisation de la moyenne VANDIERES-M18. Taux d'années caractéristiques (%90, %75) de la chronologie de contrôle, corrélation moyenne (rmoy) entre les séries individuelles en indices Except, Express Population Signal (EPS), corrélation entre la composante exclue et la chronologie de contrôle ( $r, t$ )

l'excluant. 3 composantes atypiques sont décelées. La corrélation entre chacune et la moyenne de contrôle n'est pas la plus élevée de la liste de propositions. Les deux individus (VAN.33.2 et 38.2) présentant les valeurs  $t$  les plus faibles dans la matrice carrée sont rejetés par cette procédure, de même que VAN.55. Le nombre de cernes des séries explique ces résultats (tab. 31). L'utilisation du seuil de corrélation de 0,5 induit l'abandon de 9 composantes supplémentaires. La série VAN.59 ne comporte que 33 cernes mais corrèle avec la moyenne de contrôle avec une sécurité convenable. La valeur de Student associée correspond à un risque directement lu dans la table inférieur à 1‰ (tab. 32). Il faut remarquer que les séries proviennent de planches refendues. Il n'est donc pas assuré qu'une série comportant peu de cernes corresponde à un arbre jeune. Les planches refendues sont, en effet, généralement obtenues sur

l'extérieur de la bille, les rayons formant un angle plus aigu qui est favorable pour guider le plan de fente.

14 séries sur 26 analysées participent nettement à l'homogénéité du groupe. La chronologie moyenne VANDIERES-M20 est réalisée avec ces 14 séries. Les indices d'homogénéité de cette moyenne sont, bien sûr, supérieurs à ceux de M18 (tab. 31). L'EPS

---

diminue de 0,01. M20 conserve une représentativité comparable à M18 malgré la perte de 12 séries.

Le nombre de séries individuelles à rejeter peut être jugé assez élevé. Une recherche de positions concurrentes a donc été réalisée à partir de M20. Aucune proposition de qualité supérieure à celle initialement retenue n'a été identifiée.

Le lot complet de séries présente des caractéristiques d'homogénéité classiques. Il est également daté avec un risque d'erreur faible. Il semble que, même dans ces conditions favorables, les séries qui induisent une dispersion du signal commun soit assez nombreuses. Ceci montre nettement que les relations entre les facteurs et l'arbre doivent s'entendre en terme de population présentant une variabilité assez forte. L'homogénéisation de la chronologie moyenne revient à rechercher les individus les plus centrés de cette population. La croissance moyenne de ces individus représente mieux le signal commun par élimination des particularismes individuels. La variance et l'autocorrélation de la chronologie moyenne M20 ( $s : 26,5$ ,  $r1 : 0,70$ ) légèrement plus favorables que celles de M18 ( $s : 24,5$ ,  $r1 : 0,73$ ) indiquent qu'elle porte un signal de meilleure qualité. De plus, l'utilisation de la moyenne arithmétique pour représenter le signal commun se trouve d'autant plus justifiée que le groupe est homogène. La croissance moyenne des individus "centrés" du lot représente donc de façon plus "claire" leur signal commun.

L'information régionale, qui est exploitée pour la datation absolue, est nécessairement commune aux individus du lot. Si cette information participe effectivement à l'homogénéité du lot, alors la chronologie homogénéisée en est une meilleure représentation. Cependant si les arbres sont soumis à des conditions locales particulières qui structurent fortement leur croissance, l'information régionale peut être présente dans le lot comme un particularisme. Dans ce cas, la chronologie homogénéisée peut avoir perdu de l'information régionale.

Les deux chronologies moyennes sont donc confrontées aux références pour mettre en évidence l'influence de la sélection des séries individuelles sur la qualité de la datation. Les figures 75 et 76 présentent graphiquement les résultats obtenus après standardisation en indices Except. Dans les deux confrontations, sur les références Stutt-A200 et de Neuchâtel, la valeur  $t$  de Student, à la date du dernier cerne de -1093, se dégage nettement des autres propositions.

Les coefficients obtenus sur ces références, dans les différentes procédures de calculs du synchronisme confirment ce résultat (tab. 32A,B). Les valeurs  $t$  peuvent être relativisées par rapport aux conditions de calcul (cf. chap. 1). Le synchronisme pris individuellement sur chaque référence justifie à lui seul le risque d'erreur bien inférieur à 5% (tab.33B, C). Lors de la comparaison avec Stutt-D200, les valeurs de risque ne sont pas significatives à ce taux. Elles ne sont cependant pas contradictoires avec la proposition. La concordance de ces événements sur les références les plus indépendantes permet de considérer le risque associé à la datation des deux moyennes (moyenne totale et moyenne homogénéisée) comme extrêmement faible.

Les coefficients obtenus entre M20 (moyenne partielle) et les références sont, en général, supérieurs à ceux obtenus avec M18 (moyenne de site) (tab. 32A). Seule la datation en valeurs brutes est meilleure avec M18. Les différences sont faibles mais il est important de constater que malgré la perte de près de la moitié de ses constituants la chronologie moyenne est datée avec un risque d'erreur voisin (tab. 33B, C).

Dans ce cas, dégager le signal commun porté par un lot d'arbres, en conservant la

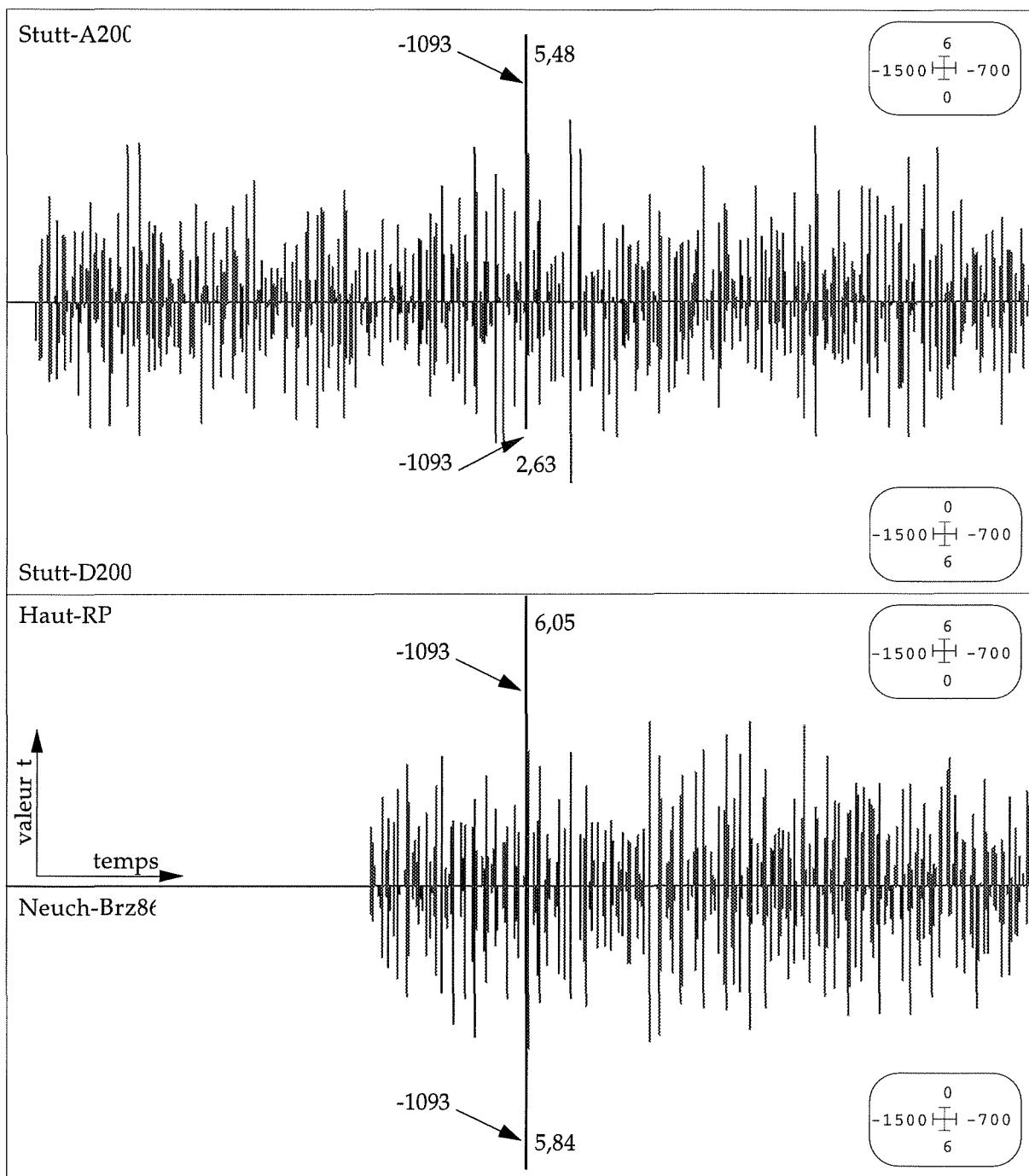


Figure 75 : résultats de datation de la moyenne VANDIERES-M18

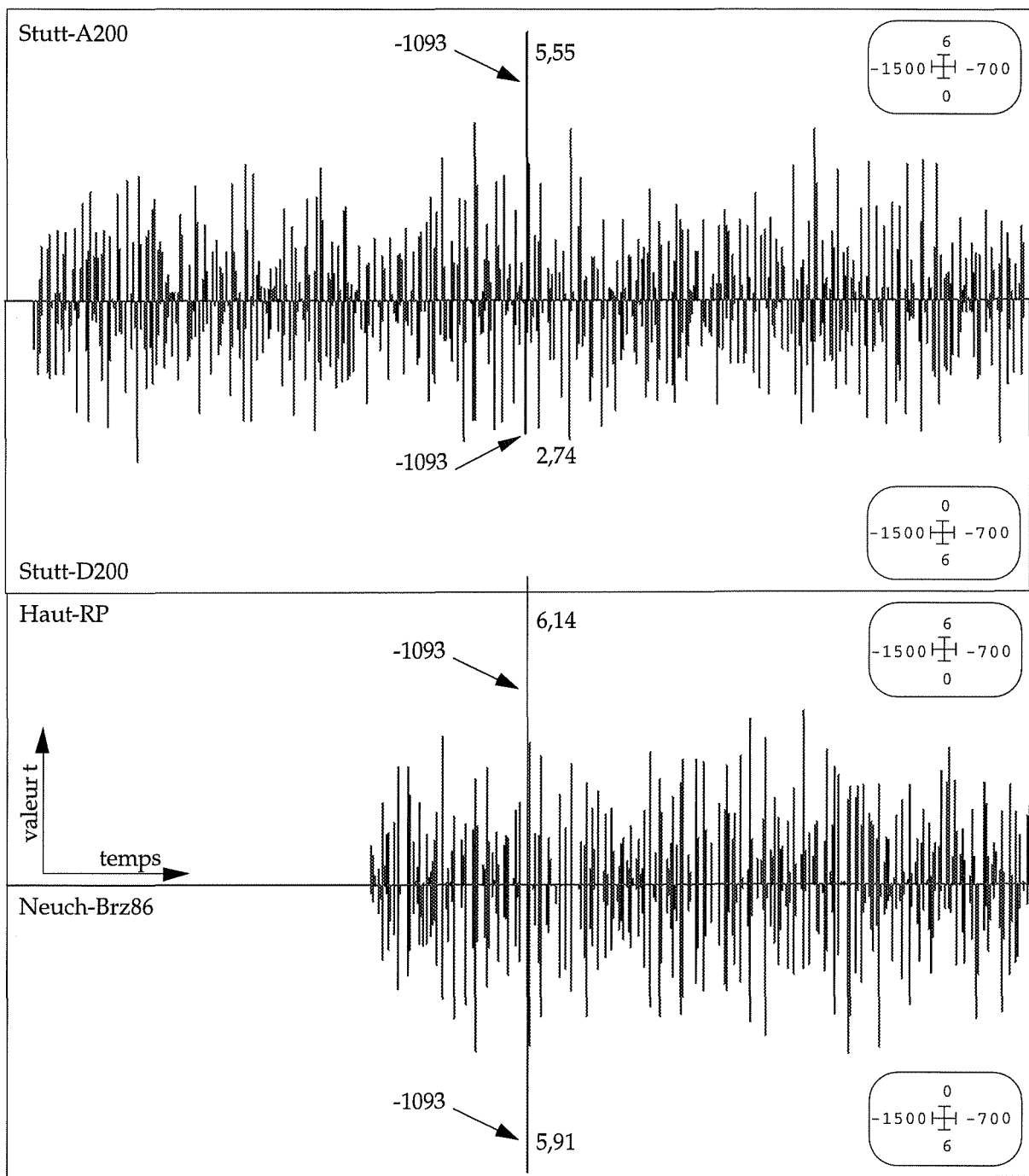


Figure 76 : résultats de datation de la moyenne VANDIERES-M20



	t indices E		t indices H		W valeurs brutes	
	M20	M18	M20	M18	M20	M18
A : Haut-RP coef.	6,14	6,05	5,07	4,64	3,85	4,11
Neuch-Brz86	5,91	5,84	4,58	4,1	2,41	2,94
Stutt-A200	5,55	5,48	4,92	4,36	3,46	3,72
Stutt-D200	2,74	2,63	2,65	2,27	1,2	1,24
B : Haut-RP risque a	2E-09	3E-09	4E-07	3E-06	6E-05	2E-05
Neuch-Brz86	6E-09	9E-09	4E-06	3E-05	8E-03	2E-03
Stutt-A200	4E-08	5E-08	8E-07	1E-05	3E-04	1E-04
Stutt-D200	3E-03	5E-03	4E-03	1E-02	1E-01	1E-01

Tableau 32 : résultats de datation et risques associés de VANDIERESM18 et M20

		Except		Hollstein	
		M20	M18	M20	M18
A : Haut-RP	N	648	648	648	648
	$\sigma$	1,275	1,283	1,085	1,063
	t moy	-1,15E-03	-5,70E-04	7,37E-04	1,32E-03
Neuch-Brz86	N	658	658	658	658
	$\sigma$	1,27	1,277	1,112	1,089
	t moy	-2,01E-03	-5,38E-04	5,21E-04	9,06E-04
Stutt-A200	N	988	988	988	988
	$\sigma$	1,197	1,178	1,104	1,08
	t moy	7,03E-04	8,88E-04	-7,75E-04	-5,31E-04
Stutt-D200	N	996	996	996	996
	$\sigma$	1,145	1,125	1,082	1,051
	t moy	1,49E-03	6,48E-04	5,87E-04	1,54E-04
B : Haut-RP	$1-(1-P(t))^N$	5E-07	8E-07	3E-04	1E-03
Neuch-Brz86		2E-06	3E-06	2E-03	2E-02
Stutt-A200		2E-05	3E-05	8E-04	7E-03
Stutt-D200		9E-01	-	-	-
C : Haut-RP	NP(t')	4E-04	6E-04	8E-04	4E-03
Neuch-Brz86		9E-04	1E-03	1E-02	5E-02
Stutt-A200		2E-03	1E-03	4E-03	2E-02
Stutt-D200		-	-	-	-

Tableau 33 : calcul du risque en fonction de la période et de la distribution des t

A : N nombre de valeurs t calculées, t moy valeur t moyenne, s écart-type de t

B : risque selon ORTON 1983

C : risque selon MUNRO 1984

représentativité de la chronologie moyenne, ne le rend pas singulier. L'information régionale portée par la chronologie moyenne constituée des 14 séries individuelles sélectionnées est identique à celle portée par la série comportant tous les échantillons.

### 3 Homogénéisation de la moyenne de site CHAMAGNE-M102 (88)

Les corrélations entre toutes les composantes de la moyenne de site sont réunies dans une matrice. Les valeurs t de Student qui leur sont associées sont élevées (tab. 34). La chronologie a des caractéristiques d'homogénéité déjà élevées.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 1CHA		11,65	9,12	8,25	8,16	7,42	2,33	4,33	3,03
2 4CHA	11,65		13,55	11,59	11,25	9,63	3,89	5,51	3,89
3 5CHA	9,12	13,55		8,68	10,12	7,95	3,25	4,93	4,23
4 6CHA	8,25	11,59	8,68		16,76	14,19	3,01	4,39	3,18
5 10CHA	8,16	11,25	10,12	16,76		16,28	3,10	4,10	3,15
6 12CHA	7,42	9,63	7,95	14,19	16,28		2,62	3,77	3,16
7 11CHA	2,33	3,89	3,25	3,01	3,10	2,62		12,11	4,95
8 7CHA	4,33	5,51	4,93	4,39	4,10	3,77	12,11		8,87
9 13CHA	3,03	3,89	4,23	3,18	3,15	3,16	4,95	8,87	

Tableau 34 : corrélations croisées des composantes de la moyenne CHAMAGNE-M102, valeur t de Student, indices E.

Pour intégrer le site dans la référence, la même procédure d'homogénéisation que précédemment est cependant employée. La corrélation entre la série individuelle CHA.13 et la moyenne partielle l'excluant s'élève à 0,44. La composante peut être rejetée d'autant que la corrélation moyenne se trouve alors augmentée (tab. 35). Il faut cependant noter une légère baisse du taux d'années caractéristiques. L'EPS reste pratiquement constante. La chronologie moyenne CHAMAGNE-M103 est donc légèrement plus homogène que M102.

La recherche de synchronisme entre les deux chronologies moyennes M102 et M103 et les références est réalisée après standardisation en indices Except. La valeur t de Student

libellé	%90	%75	EPS(30)	rmoy	r	t
ChaControl13	56	57	0,968	0,516	0,44	5,89
ChaControl7	49	61	0,965	0,494	0,54	8,68
ChaControl11	50	60	0,965	0,498	0,60	7,43
ChaControl1	54	57	0,963	0,481	0,63	10,33
ChaControl4	53	53	0,959	0,454	0,69	11,13
ChaControl5	55	56	0,961	0,469	0,70	13,16
ChaControl12	51	57	0,961	0,469	0,71	12,35
ChaControl10	51	57	0,960	0,460	0,73	13,83
ChaControl6	54	58	0,960	0,462	0,75	14,25
ChamagneM102	47	61	0,971	0,478		
ChamagneM103	56	57	0,968	0,516		

Tableau 35 : homogénéisation de la moyenne CHAMAGNE-M102

à la date du dernier cerne de 1289 av. J.-C. s'élève à 6,14 pour M102 et 6,28 pour M103 sur la référence Stutt-A200. Ces valeurs t se dégagent très nettement du reste des propositions (fig. 77-78).

Elles correspondent à des risques directement lus dans la table de Student (tab. 36B). Ce résultat peut être relativisé par rapport à la période de recherche et à la distribution des valeurs t obtenues. Dans les deux cas, il est associé à des risques inférieurs à 1/10 000 (tab. 37B, C). C'est également le cas avec

une standardisation en indices H (tab. 37B,C). Le résultat est plus modeste pour la référence Stutt-D200 (fig. 77). La valeur t n'est pas significative par rapport aux conditions de calcul (tab. 37 B, C).

A la date de -1289, le recouvrement entre les références de Neuchâtel et ces moyennes est partiel. L'origine des chronologies, -1519, est antérieure à celle des références. Cependant, 160 cernes sur les 231 peuvent être comparés. Les résultats très faibles observés sur les figures 77 et 78 sont très partiellement expliqués par cette perte de chevauchement. Les risques reportés dans le tableau 36 B ne sont pas significatifs. Il est donc impossible de relativiser ces résultats par rapport aux conditions de calculs (tab. 37 B,C).

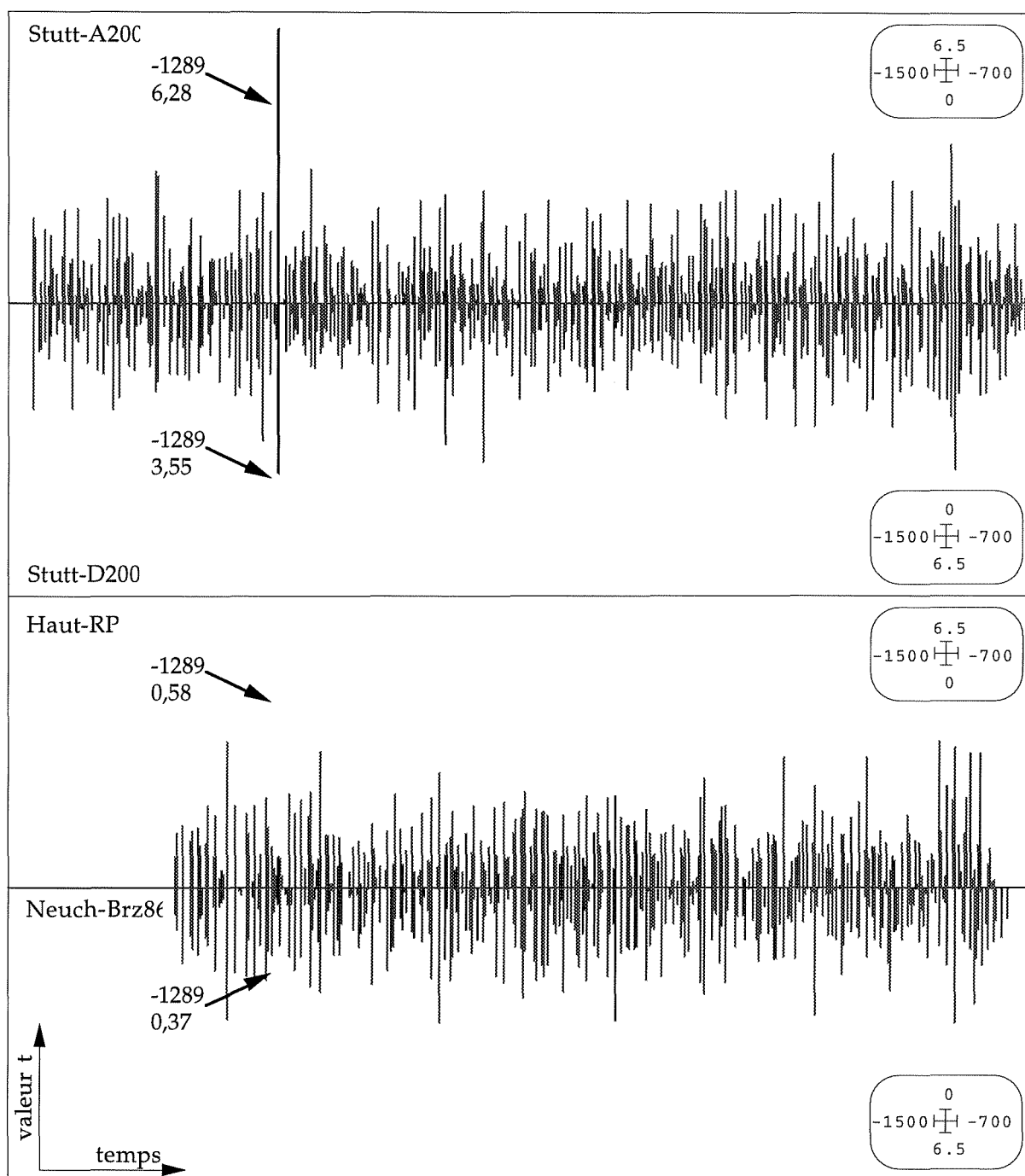


Figure 77 : résultats de datation de la moyenne CHAMAGNE-M102

de croissance de type médio-européennes que celle de Vandières, bien qu'elle soit constituée d'un nombre de séries inférieur. Il est donc possible d'expliquer une part du mauvais résultat de datation sur les références de Neuchâtel par ce résultat meilleur que d'accoutumée sur Stutt-D200. De plus, la référence de Neuchâtel est constituée d'un nombre de séries relativement faible dans sa partie la plus ancienne. D'après des informations communiquées par P. GASSMANN, le site de Hauterive-Champréveyres fournit toutes les séries antérieures à -1325. La couverture de ce site, après l'étude de 1993-1995, atteint 10 séries en -1365 ; en -1289, elle est de 53 individus. Le référentiel est également enrichi à partir de -1325 de la moyenne de site de Cortaillod-est (30 bois). Le résultat non significatif peut donc aussi être expliqué par une forte variation de la quantité de l'information au début du référentiel qui représente de 1 à environ 80 individus durant la période de comparaison. La participation de l'effet de jeunesse dans les parties anciennes des chronologies est également plus importante.

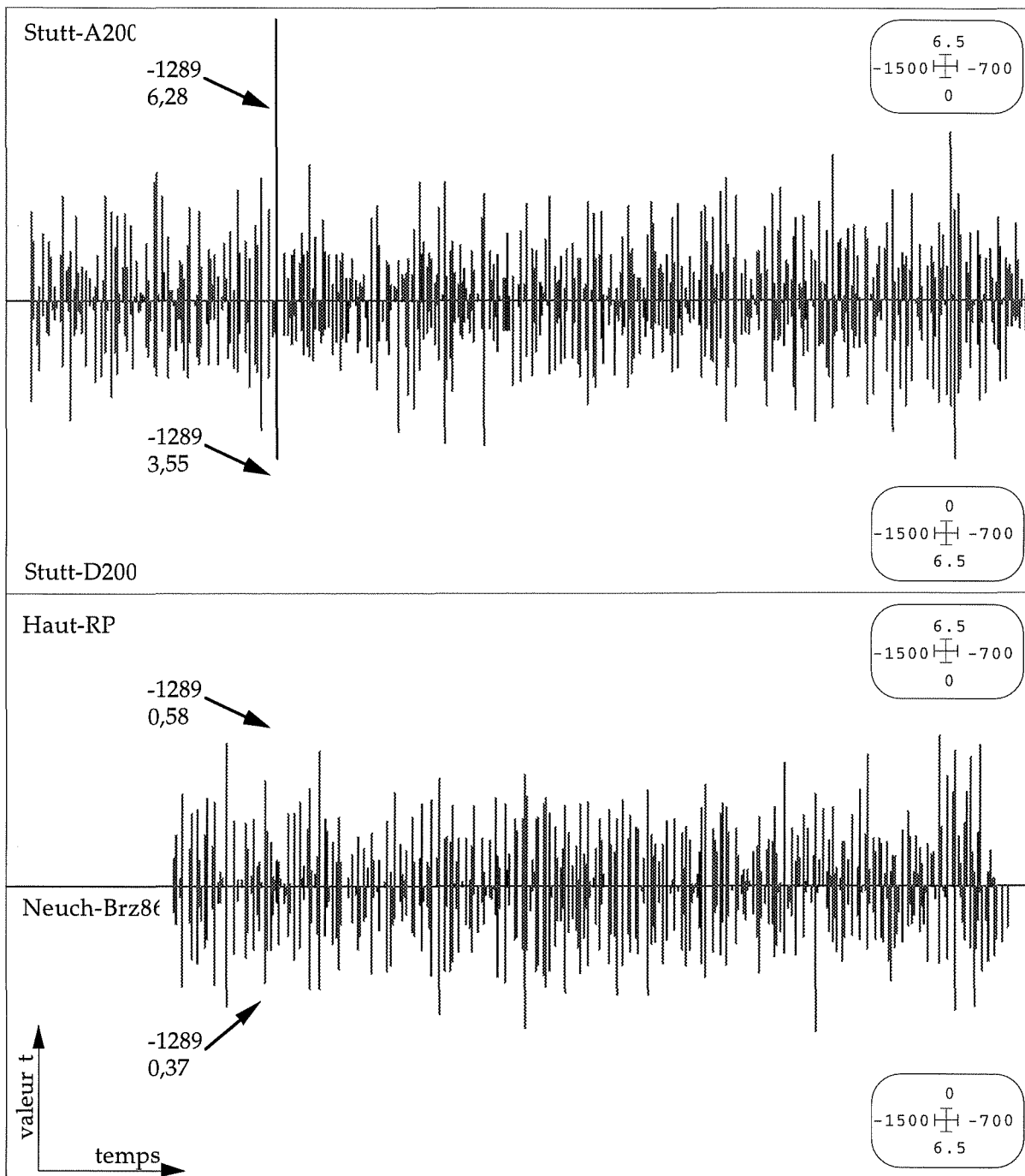


Figure 78 : résultats de datation de la moyenne CHAMAGNE-M103

Un essai de datation sur une version de la chronologie moyenne du site de Hauterive-Champréveyres, réalisée spécialement par P. GASSMANN avec les 104 individus les plus anciens du site, montre qu'avec une référence plus homogène le synchronisme est de meilleure qualité mais reste non significatif vis-à-vis des conditions de calcul. La valeur  $t$  de Student entre cette référence et la moyenne CHAMAGNE-M102 s'élève à 2,35.

Les résultats sur les références de Stuttgart sont, dans l'ensemble, légèrement supérieurs avec M103. Ici encore, la suppression d'une série individuelle qui disperse la chronologie moyenne permet d'obtenir un signal régional au moins d'aussi bonne qualité qu'avec tous les individus.

	valeur t, indices E		valeur t, indices H		coef. W, valeurs brutes	
	M102	M103	M102	M103	M102	M103
A : Haut-RP	0,71	0,58	0,33	0,26	1,10	-
Neuch-Brz86	0,39	0,37	0,02	0,10	-	-
Stutt-A200	6,14	6,28	6,84	7,04	4,22	4,09
Stutt-D200	3,81	3,55	5,38	5,07	4,88	4,75
B : Haut-RP	2E-01	3E-01	4E-01	4E-01	1E-01	-
Neuch-Brz86	3E-01	4E-01	5E-01	5E-01	-	-
Stutt-A200	2E-09	8E-10	3E-11	1E-11	1E-05	2E-05
Stutt-D200	9E-05	2E-04	9E-08	4E-07	5E-07	1E-06

Tableau 36 : résultats de datation et risques associés de CHAMAGNE-M102 et M103

		Except		Hollstein	
		M102	M103	M102	M103
A : Haut-RP	N	643	643	643	643
	$\sigma$	1,101	1,102	1,114	1,095
	t moy	1,54E-03	1,94E-03	4,04E-04	4,42E-04
Neuch-Brz86	N	653	653	653	653
	$\sigma$	1,122	1,121	1,078	1,072
	t moy	2,70E-03	2,45E-03	4,44E-04	9,40E-04
Stutt-A200	N	983	983	983	983
	$\sigma$	1,139	1,149	1,167	1,18
	t moy	-1,24E-03	-1,43E-03	5,09E-05	-4,38E-04
Stutt-D200	N	991	991	991	991
	$\sigma$	1,166	1,168	1,2	1,214
	t moy	9,89E-04	5,45E-04	2,42E-04	-1,79E-04
B : Haut-RP	$1-(1-P(t))^N$	-	-	-	-
Neuch-Brz86		-	-	-	-
Stutt-A200		2E-06	8E-07	4E-08	2E-09
Stutt-D200		8E-02	2E-01	9E-05	2E-04
C : Haut-RP	NP(t')	-	-	-	-
Neuch-Brz86		-	-	-	-
Stutt-A200		3E-05	2E-05	2E-06	9E-07
Stutt-D200		5E-01	-	3E-03	1E-02

Tableau 37 : calcul du risque en fonction de la période et de la distribution des t

A : N nombre de valeurs t calculées, t moy : valeur t moyenne,  $\sigma$  écart-type de t

B : risque selon ORTON 1983

C : risque selon MUNRO 1984

## 4 Constitution de la référence régionale

### 4.1 Intégration du site de Bréban

Le site de Bréban présente une situation biogéographique en limite de l'aire représentée par la référence. Pour justifier son intégration à Lorraine-Brz, Lor-Brz3 et 5 sont datées. Lor-Brz3 est constituée des individus sélectionnés pour les chronologies moyennes des sites de Chamagne et Vandières ainsi que du bois isolé de Saint Marcel. Lor-Brz5 comporte, en plus, les séries individuelles sélectionnées de Bréban.

Les résultats de datation des deux références sont globalement significatifs (tab. 38). Les risques associés aux coefficients sont très faibles (cf 4.2). Les coefficients non significatifs entre Lor-Brz3 et les références de Neuchâtel font exception. La chronologie Lor-Brz3 présente, par contre, un synchronisme élevé avec les références de Stuttgart.

L'intégration du site de Bréban induit d'une part, une très nette amélioration des coefficients entre Lor-Brz5 et les références de Neuchâtel. La valeur t de Student passe de 2,77 à 6,16 sur Haut-RP en indices E. Et d'autre part, dans la majorité des procédures, le synchronisme entre Lor-Brz5 et les étalons de Stuttgart sont améliorés. La valeur t de Student passe de 9,46 à 10,23 sur Stutt-A200 en indices E. L'intégration du site à la référence permet donc de l'enrichir en information régionale.

#### 4.2 Datation des références homogénéisée et totale

Lor-Brz4 comporte toutes les séries individuelles synchronisées par site et Lor-Brz5

valeur t, indices E

étalon	référence	Nb cernes	r	t	risque a
Stutt-A200	Lor-Brz5	629	0,38	10,23	4E-23
	Lor-Brz4	629	0,37	9,97	4E-22
	Lor-Brz3	610	0,36	9,46	3E-20
Stutt-D200	Lor-Brz5	629	0,27	7,11	2E-12
	Lor-Brz4	629	0,27	7,01	3E-12
	Lor-Brz3	610	0,25	6,49	9E-11
Haut-RP	Lor-Brz5	563	0,25	6,16	7E-10
	Lor-Brz4	563	0,24	5,79	6E-09
	Lor-Brz3	541	0,12	2,77	3E-03
Neuch-Brz	Lor-Brz5	563	0,22	5,29	9E-08
	Lor-Brz4	563	0,21	4,97	4E-07
	Lor-Brz3	541	0,14	3,35	4E-04

valeur t, indices H

étalon	référence	Nb cernes	r	t	risque a
Stutt-A200	Lor-Brz3	614	0,33	8,58	4E-17
	Lor-Brz5	633	0,31	8,12	1E-15
	Lor-Brz4	633	0,3	7,93	5E-15
Stutt-D200	Lor-Brz5	633	0,25	6,38	2E-10
	Lor-Brz3	614	0,25	6,34	2E-10
	Lor-Brz4	633	0,24	6,25	4E-10
Haut-RP	Lor-Brz5	567	0,2	4,85	8E-07
	Lor-Brz4	567	0,19	4,47	5E-06
	Lor-Brz3	545	0,08	1,82	3E-02
Neuch-Brz	Lor-Brz5	567	0,18	4,34	8E-06
	Lor-Brz4	567	0,16	3,95	4E-05
	Lor-Brz3	545	0,1	2,28	1E-02

coefficient W, valeurs brutes

étalon	référence	Nb cernes	%G	W	risque a
Stutt-A200	Lor-Brz4	635	62	6,31	1E-10
	Lor-Brz5	635	62	6,3	1E-10
	Lor-Brz3	616	62	6,09	6E-10
Stutt-D200	Lor-Brz3	616	59	4,64	2E-06
	Lor-Brz5	635	59	4,64	2E-06
	Lor-Brz4	635	59	4,49	4E-06
Haut-RP	Lor-Brz5	569	61	5,32	5E-08
	Lor-Brz4	569	61	5,23	8E-08
	Lor-Brz3	547	56	3,04	1E-03
Neuch-Brz	Lor-Brz4	569	59	4,17	2E-05
	Lor-Brz5	569	59	4,15	2E-05
	Lor-Brz3	547	55	2,44	7E-03

Tableau 38 : résultats de datation des références Lor-Brz

seulement celles sélectionnées après homogénéisation. La datation, de façon générale, est de meilleure qualité avec la référence homogénéisée (tab. 38). La différence est la plus significative en utilisant les indices. Par exemple, la valeur t de Student passe de 5,79 à 6,16 en indices E sur la référence Haut-RP.

Entre les coefficients de Eckstein la différence est moins marquée. L'homogénéisation ne se traduit pas toujours par un gain. Ainsi, les coefficients entre Stutt-A200, Neuch-Brz86 et la moyenne totale sont légèrement supérieurs à ceux obtenus avec la moyenne partielle. La constitution des moyennes est beaucoup plus dépendante du nombre de séries individuelles intégrées lorsqu'il s'agit de valeurs brutes que d'indices. Dans une chronologie en valeurs brutes la sélection du signal commun et la maîtrise du bruit reposent uniquement sur la répartition des séries individuelles dans le temps. Lors de l'homogénéisation, les séries éliminées induisent une cohésion plus forte du groupe résiduel mais également une perte dans la répartition des différents bruits. L'apport au signal commun de l'homogénéisation doit donc être supérieur à la perte de maîtrise du bruit pour être significatif. La plus grande dépendance de l'échantillonnage des

---

chronologies en valeurs brutes explique que, parfois, la moyenne totale est mieux datée qu'une moyenne partielle, même plus homogène.

Lors de la standardisation, d'une part, le signal de haute fréquence est sélectionné (cf. chap. 1) et d'autre part, les indices individuels ont des distributions beaucoup plus homogènes, plus proches de distributions normales. La moyenne est donc beaucoup plus justifiée pour représenter le signal commun. La position des séries individuelles dans la chronologie moyenne influence beaucoup moins celle-ci. Le gain de l'homogénéisation est beaucoup plus direct.

Dans l'état du corpus de données, Lor-Brz5 en valeurs indicées nous semble donc être la meilleure représentation de l'influence des facteurs régionaux sur la croissance des chênes.

### **4.3 Risque associé à la datation**

Les moyennes de sites qui composent Lor-Brz sont datées avec des risques d'erreur très faibles. La synthèse de ces séries est mieux documentée, sur une période plus longue et par un plus grand nombre d'individus. Le risque observé lors de la datation de la synthèse est alors beaucoup plus faible.

On peut remarquer que la plupart des risques, lus directement dans les tables, associés aux datations des versions de Lor-Brz (tab. 38) sont très inférieurs à 10<sup>-4</sup> ou 1/10000. Ceci signifie que le synchronisme ne peut se répéter avec la même qualité pour une période de 10000 ans. Cette période est proche de l'étendue maximale pour laquelle on peut théoriquement espérer construire les références du Chêne. Le synchronisme de qualité élevé entre les références bien documentées de l'Europe de l'ouest, principalement d'Allemagne médio-continentale et des îles britanniques (PILCHER *et al.* 1984), a permis de construire un schéma global de la croissance du Chêne. Les chronologies comparées dans cette datation étaient beaucoup plus documentées que dans notre cas. Toutefois, la référence Lor-Brz peut être synchronisée avec un risque d'erreur très faible sur Stutt-A200 qui participe à ce schéma global. C'est ce résultat qui lui confère une valeur de référence régionale.

Les résultats sont, d'une façon générale, de meilleure qualité avec la référence Stutt-A200 qu'avec les références de Neuchâtel. On peut donc penser que l'influence sur la croissance des facteurs régionaux est plus similaire entre les régions Lorraine et médio-continentale qu'avec une zone localisée dans la plaine lémanique. Le nombre très réduit de références disponibles pour cette période et une différence importante de représentativité entre Stutt-A200 et les références de Neuchâtel peuvent également expliquer une part de ce résultat. Cependant il faut remarquer qu'il va dans le sens de la description biogéographique des trois aires concernées. Également dans le même sens, il faut remarquer que la référence lorraine synchronise assez fortement avec Stutt-D200 dont les constituants sont plus typiquement sous influence médio-continentale.

## **4.4 Statistiques descriptives de Lorraine-Brz**

### **4.4.1 Statistiques pour la chronologie moyenne**

La chronologie est utilisable sur la période comprise entre -1519 et -885. Le nombre d'échantillons est faible, par rapport à la longueur de la chronologie. La couverture moyenne est inférieure à 10 arbres. Il est donc conseillé de privilégier les procédures de calcul de synchronisme faisant appel à la standardisation pour diminuer les effets du sous-échantillonnage.

Le cerne moyen et l'écart-type indiquent des croissances assez lentes à variabilité assez forte mais dont la répartition dans le temps doit beaucoup à l'autocorrélation. Celle-ci est très élevée car la tendance à long terme n'est pas maîtrisée par une répartition des échantillons suffisante (fig. 80).

L'homogénéité du groupe est élevée. Les taux de signatures et la corrélation interne moyenne peuvent être imputés au nombre d'échantillons faible mais surtout à l'homogénéisation. Lor-Brz5 présente les caractéristiques d'homogénéité les plus fortes. Si la corrélation moyenne est relativisée par rapport au nombre d'échantillons, la valeur de l'EPS obtenue montre que le signal commun représente les conditions de croissance de façon significative. La valeur est largement supérieure au seuil de 0,85 défini par WIGLEY (*et al.* 1984). De façon globale, l'homogénéisation de Lor-Brz4 induit une augmentation de la cohésion interne qui compense la perte d'échantillons.

	origine	terme	Nb. éch.	Nb. cernes	âge moy	Nb.c/an	cmoy	$\sigma$	r1	r2
Lor-Brz3	-1519	-904	23	616	143	5,3	110	78,23	0,92	0,90
Lor-Brz4	-1519	-885	46	635	133	9,4	111	74,45	0,92	0,89
Lor-Brz5	-1519	-885	35	635	134	7,3	113	74,86	0,91	0,89

Tableau 39 : statistiques descriptives. cmoy largeur de cerne moyenne,  $\sigma$  écart-type, r1 r2 autocorrélation d'ordre 1 et 2

	75%	90%	rmoy	EPS
Lor-Brz3	54	39	0,40	0,987
Lor-Brz4	47	30	0,29	0,994
Lor-Brz5	52	37	0,31	0,988

Tableau 40 : indices d'homogénéité

Cette description, pour la série entière, montre que Lor-Brz5 est une référence régionale qui doit être complétée pour être parfaitement représentative sur le plan de l'échantillonnage. Cependant, les arbres sélectionnés représentent au mieux le signal commun. La chronologie peut être jugée suffisante pour être utilisée en datation.

#### 4.4.2 Statistiques en fonction du temps

##### 4.4.2.1 Chronologie en valeurs brutes

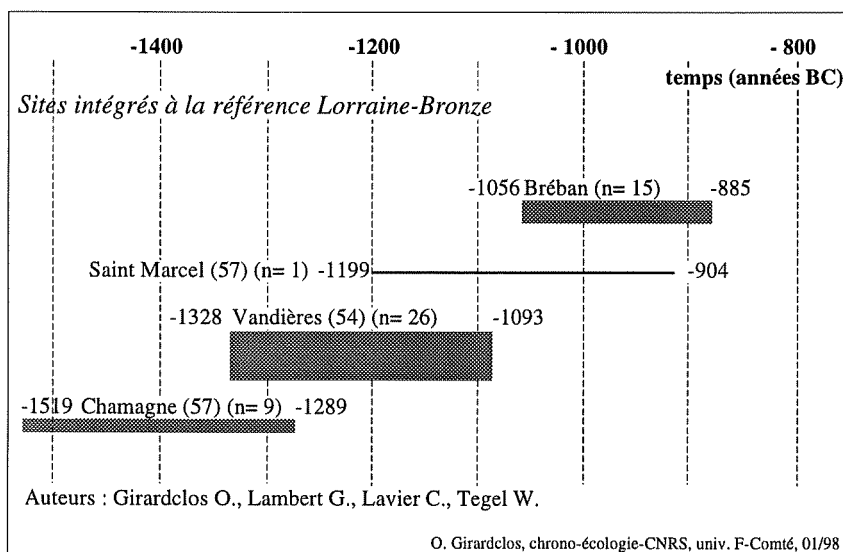


Figure 79 : bloc diagramme des sites intégrés à la référence Lorraine-Bronze

Le bloc diagramme montre la répartition dans le temps des sites intégrés aux deux versions de la référence (fig. 79). La distribution des séries individuelles dans la chronologie reflète très directement celle des sites. Ceux-ci se chevauchent peu dans le temps. 3 "dômes" plus ou moins marqués de la couverture correspondent aux 3 principaux. Une série unique est disponible pour quelques années aux extrémités de la chronologie mais



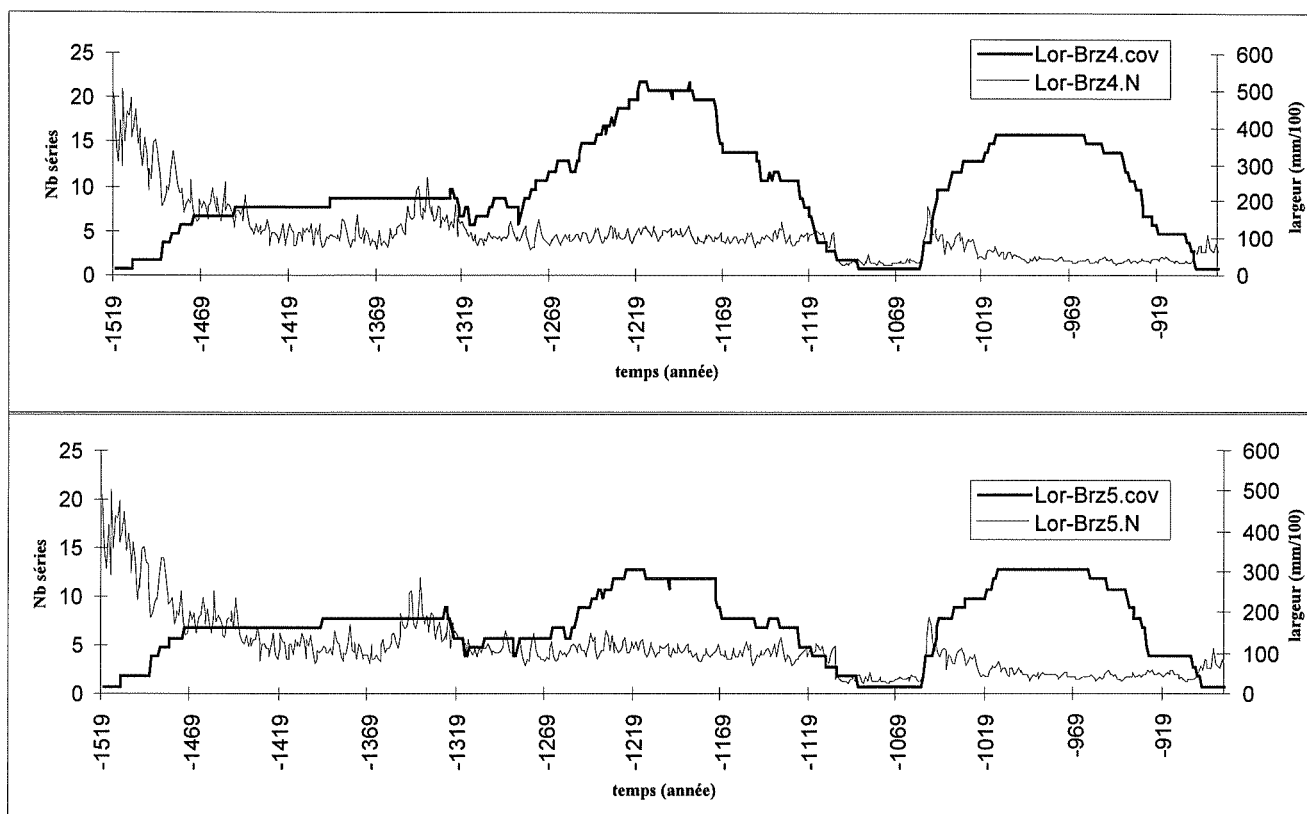


Figure 80 : chronologies moyennes Lor-Brz4 et Lor-Brz5 en valeurs brutes et couverture

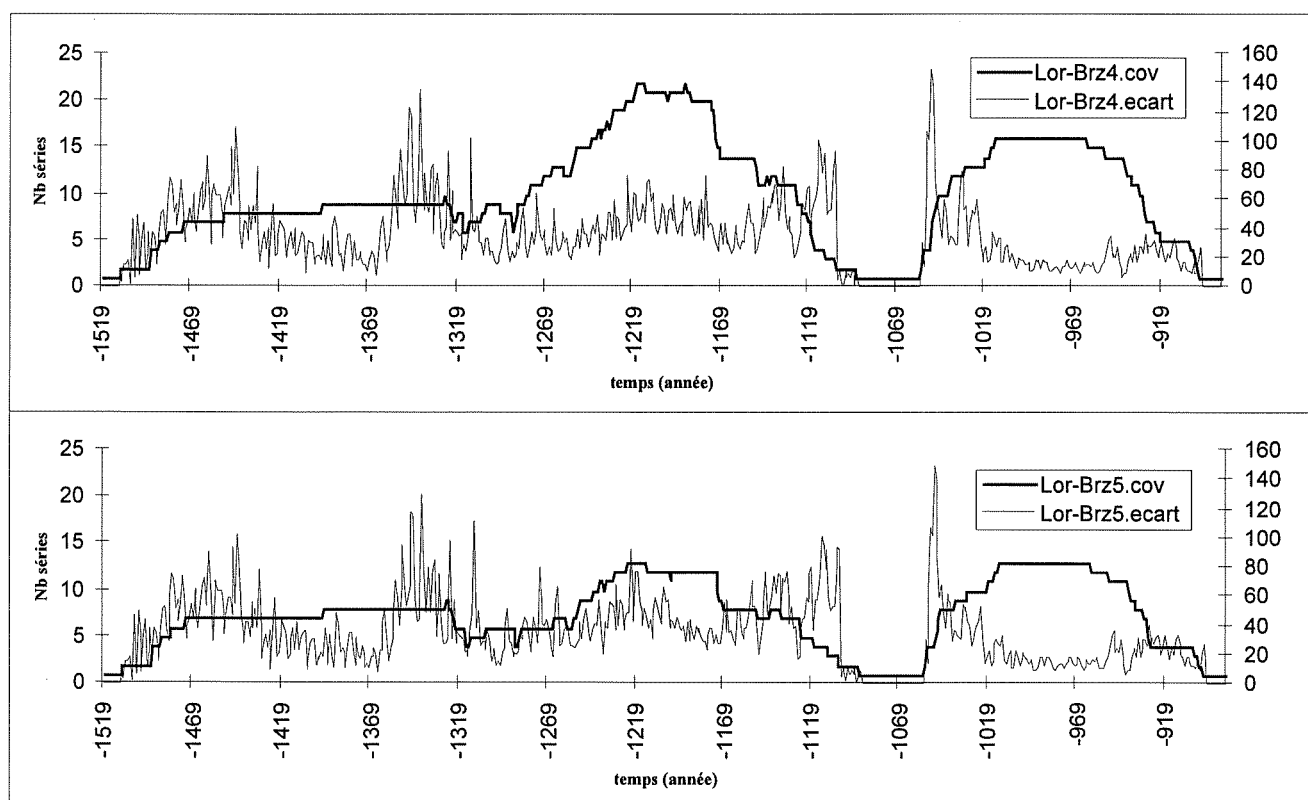


Figure 81 : écart-type des réalisations des chronologies moyennes Lor-Brz4 et Lor-Brz5 en valeurs brutes et couverture

surtout pour la période comprise entre -1092 et -1056 où seul le bois de Saint Marcel est daté. La couverture montre donc que l'échantillonnage est déficient pour certaines périodes.

Le faible chevauchement des sites a des conséquences sur le niveau moyen de la chronologie. Pendant ces périodes, les arbres du site le plus ancien sont âgés alors que ceux du site récent sont jeunes. L'amplitude des largeurs de cernes moyennées est donc très importante. La chronologie présente une augmentation de son niveau moyen pendant ces périodes qui est entièrement attribuable à cette différence d'âge (fig. 80).

Les séries de largeurs de cernes présentent, de façon générale, une corrélation entre le niveau moyen et l'écart-type (cf. chap. 1). Des variations de la variance sont donc également observables pendant les périodes de chevauchement (fig. 81). De plus, le site de Bréban présente une croissance localement forte puis très faible. L'écart-type en fonction du temps est élevé de -1056 à environ -1019 puis très faible de -1019 à -940.

Les fonctions d'autocorrélation des références montrent aussi que le signal n'est pas stationnaire (fig. 84). La valeur du coefficient de corrélation est très élevée. Elle atteint 0,92 à l'ordre 1 et reste supérieure à 0,80 à l'ordre 20. Ces valeurs exceptionnelles sont liées à une forte tendance à long terme. Celle-ci est principalement due aux largeurs comprises entre 500 et 300 /100 mm, observées pendant la phase de jeunesse des arbres de Chamagne (fig. 80).

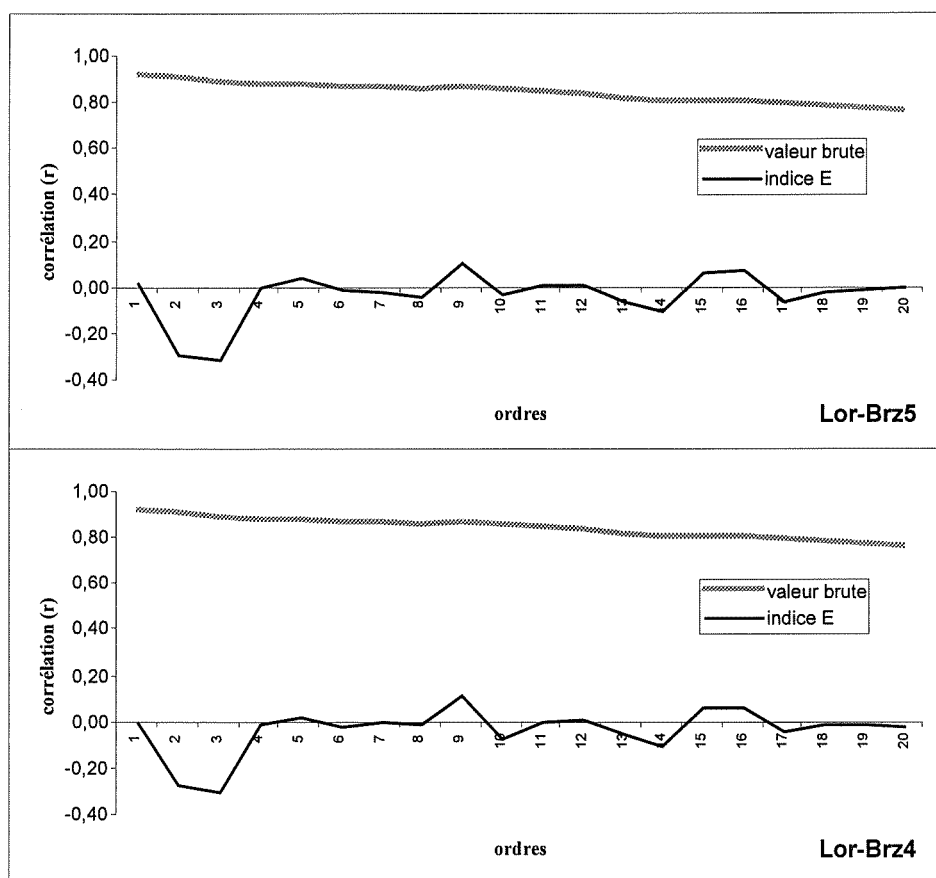


Figure 84 : fonction d'autocorrélation des références Lor-Brz4 et Lor-Brz5

Ces caractéristiques sont assez typiques des chronologies moyennes en valeurs brutes mais elles sont ici exagérées car le nombre de séries individuelles est faible ainsi que le chevauchement des sites. Cependant, la perte de 11 séries entre Lor-Brz4 et Lor-Brz5 ne se traduit pas par de grandes différences de ces caractéristiques. La moyenne et l'écart-type de Lor-Brz5 présentent même des variations interannuelles plus amples et plus stables à long

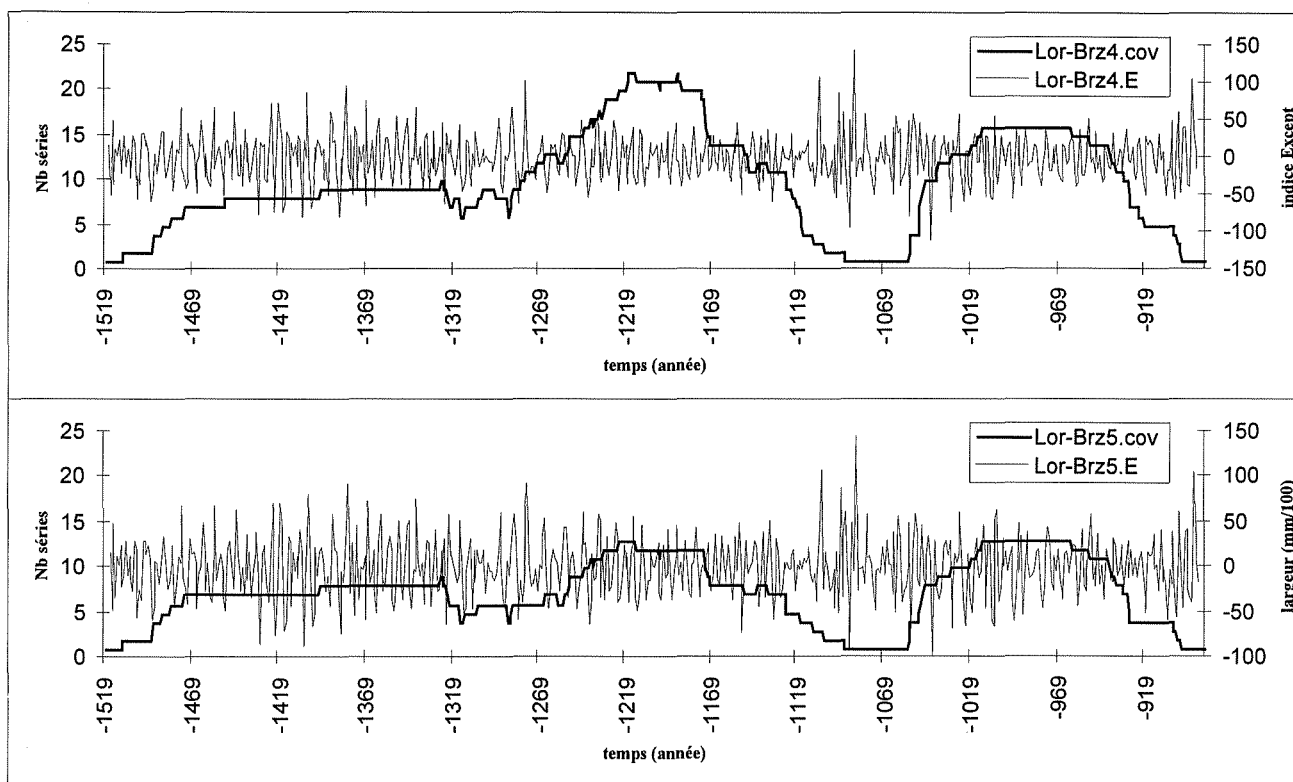


Figure 82 : chronologies moyennes Lor-Brz4 et Lor-Brz5 en indices Except et couverture

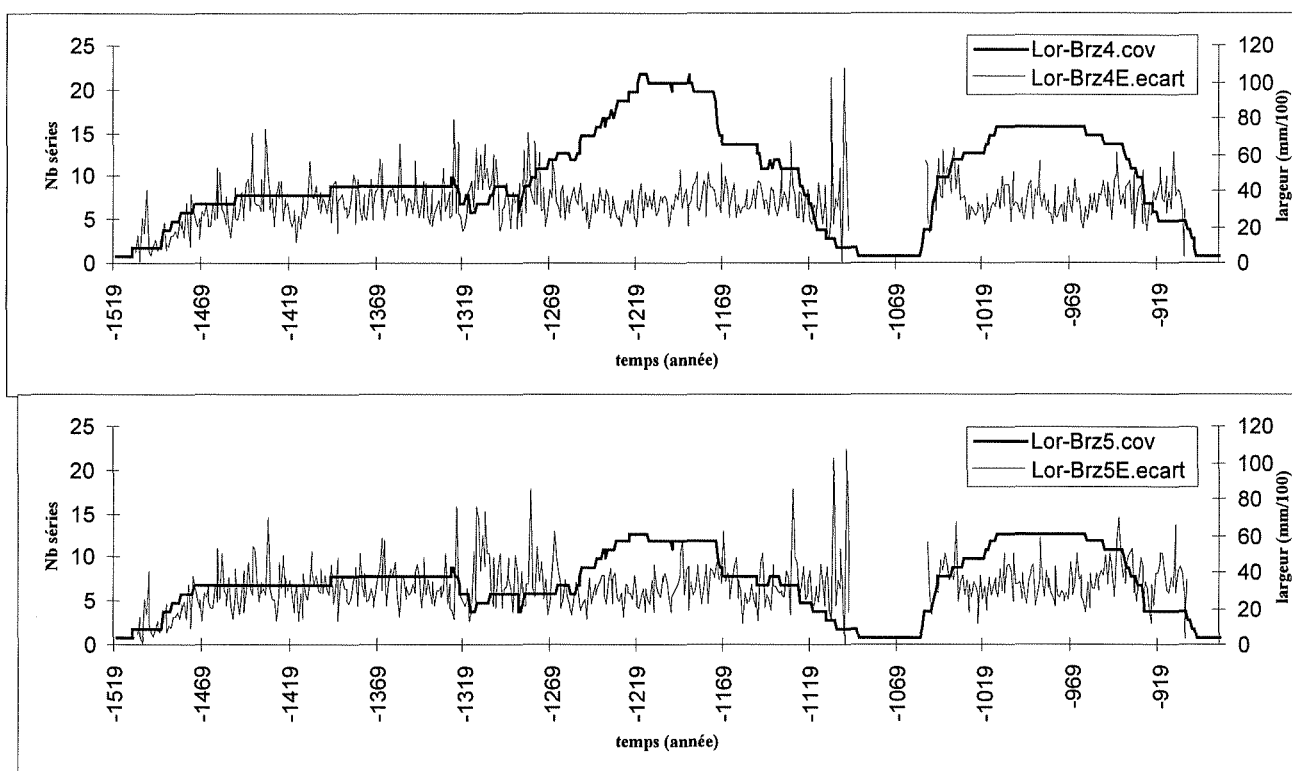


Figure 83 : écart-type des réalisations des chronologies moyennes Lor-Brz4 et Lor-Brz5 en indices Except et couverture

---

terme que Lor-Brz4, notamment pour le tronçon -1269 -1119 où la sélection a le plus d'effet (fig. 81). Il est évident qu'une référence est d'autant plus stable que le nombre de sites et de bois qui la composent sont importants et bien répartis. Mais extraire les séries qui participent le plus à la dispersion de la moyenne apporte des compensations dans l'amplitude du signal.

#### 4.4.2.2 Chronologie standardisée

La chronologie standardisée présente une plus grande stabilité dans le temps que celle en valeurs brutes mais les défauts d'échantillonnage sont toujours perceptibles (fig. 82). Des variations dans le temps de la moyenne et de l'écart-type sont visibles, particulièrement entre -1119 et -1056, et, dans une moindre mesure, entre -1319 et -1269 (fig.83). Ces variations sont également liées, aux périodes de chevauchement des sites. La chronologie est cependant assez stationnaire pour que ces artefacts d'échantillonnage influent peu sur la datation. L'autocorrélation, très élevée en valeurs brutes, varie autour de 0 après standardisation (fig. 84). Il existe cependant une autocorrélation induite de faible amplitude. Elle se caractérise par une valeur négative pour les ordres 2 et 3. Pour les ordres plus élevés, le coefficient varie avec une période de 3 à 4 ans autour de 0 atteignant au plus une valeur absolue de 0,15. Cette autocorrélation n'est pas de nature à introduire de l'ambiguïté dans l'utilisation du coefficient de corrélation et ne perturbe pas la datation. Les différentes représentations des valeurs  $t$  en fonction du temps ne montrent pas une organisation particulière de celles-ci.

#### 4.4.2.3 Qualité du signal en fonction du temps

Le calcul des paramètres descriptifs avec toutes les observations de la référence peut masquer des particularités de certaines périodes. De façon à caractériser les chronologies Lor-Brz4 et Lor-Brz5 en fonction du temps, les paramètres corrélation moyenne, nombre de séries chevauchantes et EPS sont calculés dans une fenêtre progressivement décalée (fig. 85). Le développement informatique spécifique a été réalisé par S. MEIGNIER au laboratoire de Chrono-écologie. La taille de la fenêtre, le nombre de cernes minimal pour engager le calcul et le pas de décalage peuvent être modifiés.

La fonction du temps des paramètres est d'autant lissée que le pas de temps choisi est large. De façon à observer des variations des caractéristiques des références intéressantes des périodes courtes, un pas de décalage de la fenêtre de 10 ans apparaît adapté. Les fonctions sont également lissées, mais de façon moins marquée, lorsque la taille de la fenêtre et le nombre de cernes minimal sont augmentés. La figure 86 montre que les fonctions du temps de la corrélation moyenne sont similaires calculées avec 30 observations ou avec 90 au plus et 50 au moins. Les différences les plus importantes apparaissent aux extrémités de la référence alors que les chevauchements deviennent de moins en moins nombreux. Toujours dans le but d'observer des variations des paramètres sur des périodes courtes, les calculs sont réalisés à la limite de la signification, c'est à dire pour 30 observations.

Le nombre de séries chevauchant d'au moins 30 ans en fonction du temps suit des variations qui sont très comparables à celles de la couverture c'est-à-dire à celles du nombre de cernes par an. Trois "dômes" représentant les trois principaux sites sont observables (fig. 86). Cependant, ce paramètre montre mieux que la couverture que les séries se chevauchent mal durant la période commune aux sites de Chamagne et Vandières. Pour les deux références une baisse de ce nombre est observable entre -1359 et -1259.

Calculée pour toute la chronologie, l'homogénéité des deux références est forte mais la représentation de la corrélation moyenne en fonction du temps permet de montrer que selon les périodes, cette homogénéité varie fortement (fig. 87). Les valeurs extrêmes observées

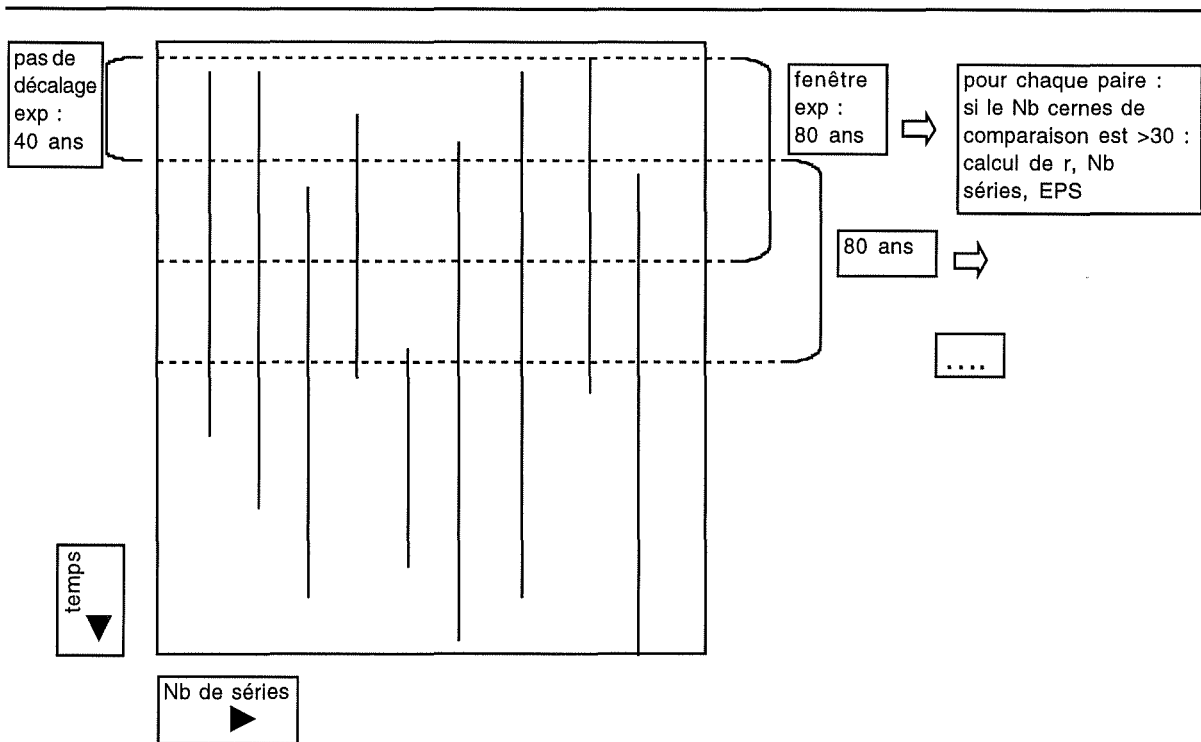


Figure 85 : représentation schématique du calcul des paramètres en fonction du temps

pour une fenêtre de 30 ans sont 0,63 et 0,05. Les valeurs les plus faibles sont observées en liaison avec une baisse importante du nombre de séries, comme aux extrémités des références. Le chevauchement des sites de Chamagne et Vandières est également une source d'hétérogénéité. En dehors des périodes où le nombre de séries est faible, le niveau de corrélation moyenne est également variable, reflétant les caractéristiques des sites. Pendant la période entre -1489 et -1359, qui correspond à la séquence où le site de Chamagne est le mieux représenté, la corrélation moyenne est très élevée autour de 0,5. Pour les périodes qui correspondent aux deux autres principaux sites, la corrélation est voisine de 0,3. Cette valeur semble plus typique des lots de séries de Chêne. Les croissances des arbres de Chamagne présentent un synchronisme plus exceptionnel.

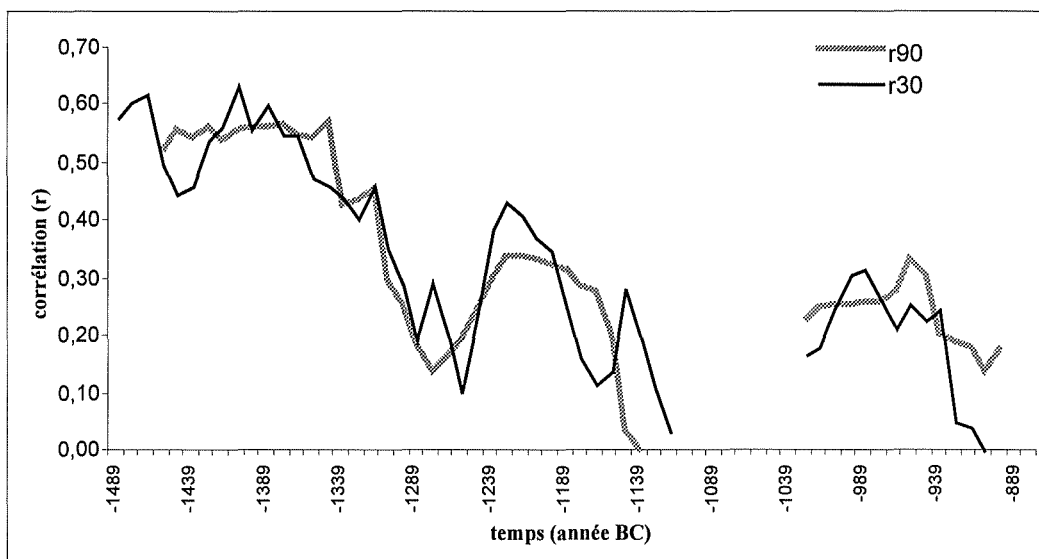


Figure 86 : comparaison de la corrélation moyenne en fonction du temps de lor-Brz5 calculée dans une fenêtre de 30 ans décalées de 10 ans et un chevauchement minimum de 30 cernes et calculée dans une fenêtre de 90 ans décalées de 10 ans et un chevauchement minimum de 50 ans

Ce synchronisme exceptionnel conduit à une période où l'EPS est aussi forte que pour les deux périodes correspondant aux sites de Vandières et Bréban alors que le nombre de séries intégrées est inférieur de moitié. La qualité de représentation de la croissance des deux moyennes suit les variations de l'homogénéité et du nombre de séries. Elle est supérieure au seuil de 0,85 que localement.

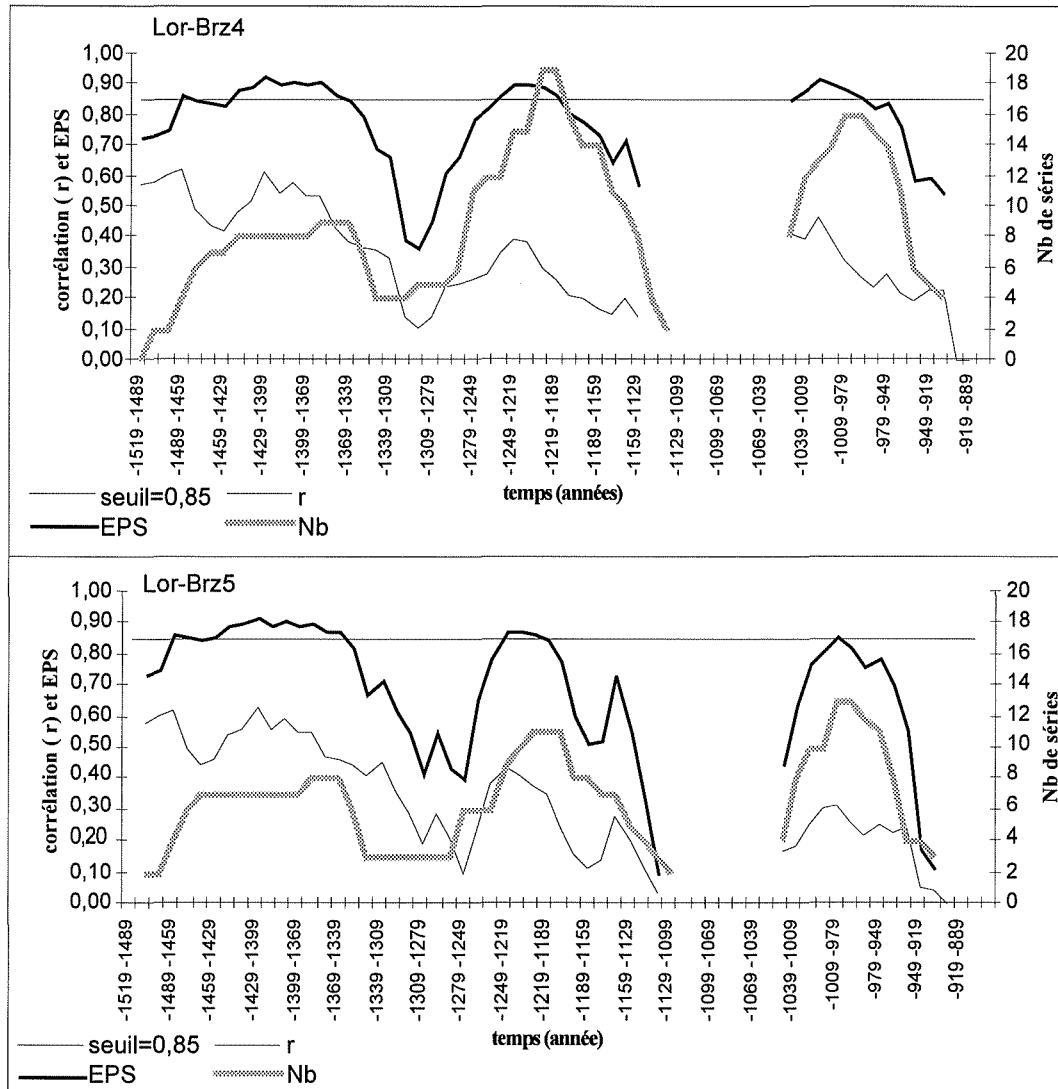


Figure 87 : corrélation moyenne et EPS en fonction du temps des chronologies Lor-Brz4 (A) et Lor-Brz5 (B), calculées sur une fenêtre de 30 ans décalée de 10 ans avec un minimum de 30 cerne. Nb nombre de séries chevauchant de plus de 30 cerne par fenêtre

La valeur moyenne du cerne pour les périodes comprises entre -1359 et -1259, -1159 et -1039, où l'EPS est inférieure à 0,85, ne représente pas dans de bonnes conditions statistiques la croissance. Ces périodes correspondent à celles pour lesquelles, même indicées, les chronologies présentent des instabilités du niveau moyen et de la variance (cf. 4.2.2).

#### 4.4.2.4 Représentativité régionale en fonction du temps

Le synchronisme, calculé avec toutes les observations, entre Stutt-A200 et les références Lor-Brz4 et Lor-Brz5 est plus élevé qu'avec les références de Neuchâtel. On peut donc penser, qu'en absence de référence propre à la région, des références disponibles, Stutt-A200 représente le mieux l'information régionale propre au secteur lorrain. Ceci peut être soutenu par les caractéristiques biogéographiques des trois régions. Le niveau de

synchronisme entre les références lorraines et Stutt-A200, en fonction du temps, est donc une estimation de leur représentativité régionale, selon les périodes.

La corrélation entre Stutt-A200 et les références lorraines est calculée dans une fenêtre de 80 ans décalée de 10 années. La valeur  $r$  est rapportée à la borne supérieure de la

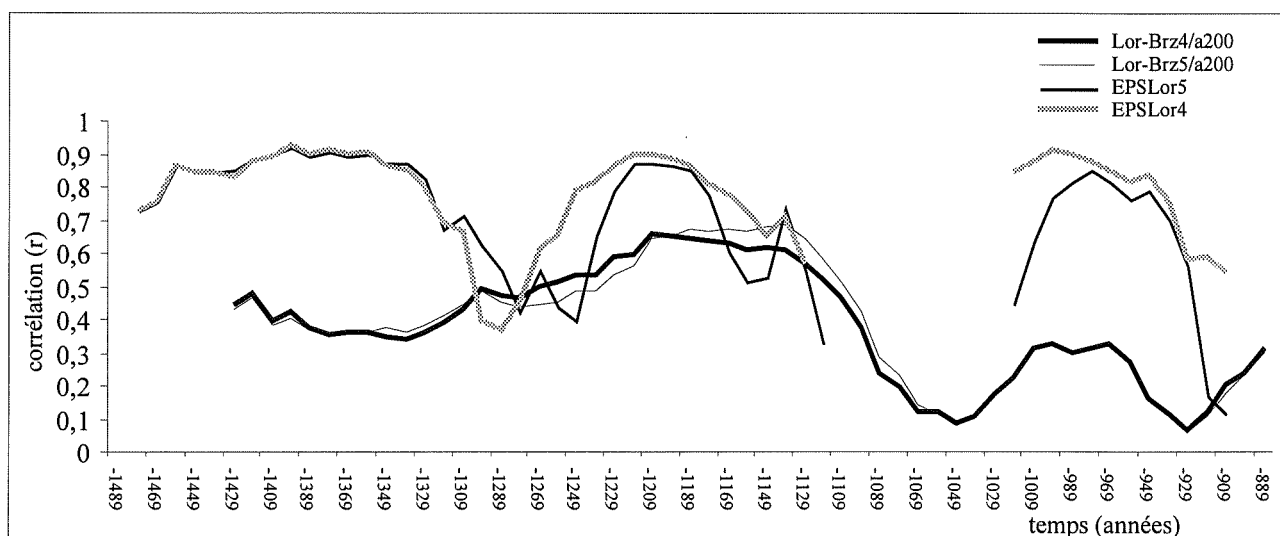


Figure 88 : comparaison de la corrélation entre l'étalon Stutt-A200 et les chronologies Lor-Brz4 et Lor-Brz5 (fenêtre de 80 ans, décalée de 10 ans) et de l'EPS des séries lorraines (fenêtre de 30 ans décalées de 10 ans)

fenêtre. La fonction du temps qui en résulte montre que le synchronisme varie fortement. Les valeurs extrêmes rencontrées sont 0,68 et 0,08 (fig. 88).

La corrélation est maximale pendant une période comprise entre -1209 et -1109, elle est supérieure à 0,4 de -1429 à -1209. Sur toute cette séquence on peut penser que les références représentent convenablement un signal régional.

Une part des valeurs faibles s'expliquent par les manques d'échantillonnage. C'est principalement le cas de la période entre -1159 et -1039 où l'EPS est faible et où le bois de Saint Marcel est unique.

Entre -1359 et -1259, l'EPS indique une baisse de la qualité de la représentation mais elle ne se traduit pas par une baisse du synchronisme. L'EPS estime le niveau de qualité de la moyenne pour représenter le lot assemblé, ceci sans préjuger du niveau d'information représenté. Cependant, il peut être admis que, plus une information est commune aux arbres, plus elle est liée à des facteurs généraux. Il n'y a donc pas de lien direct entre la qualité du signal et l'information qu'il contient.

Inversement, pour une représentation qui peut être jugée en partie suffisante ( $EPS > 0,85$ ), la période comprise entre -1039 et -889 est caractérisée par un niveau de synchronisme faible avec Stutt-A200. Cette partie de la chronologie est constituée du site de Bréban et d'une partie du bois isolé de Saint Marcel. Il faut imputer cette baisse de la corrélation à la position plus marginale dans l'aire Lorraine du site de Bréban. Également, les facteurs locaux et internes semblent fortement influencer la croissance sur ce site.

Après -1209, la représentativité régionale des références lorraines est donc moindre.

La corrélation en fonction du temps entre Stutt-A200 et les références Lor-Brz4 et

---

Lor-Brz5 présentent des différences (fig. 88). Lor-Brz4 synchronise mieux que Lor-Brz5 avec l'étalon entre -1299 et -1199 alors que la situation s'inverse pour la période : -1199, -1059. Globalement, Lor-Brz5 (référence homogénéisée) synchronise mieux avec Stutt-A200 que Lor-Brz4 (référence totale). Ceci se traduit par une datation de meilleure qualité. Mais Pour une période qui comprend le chevauchement entre les sites de Chamagne et Vandières, l'homogénéisation s'est traduite par une perte d'information régionale. Une part de cette perte peut être attribuée à la diminution du nombre de séries pendant le chevauchement des sites qui induit un manque de maîtrise du bruit. Cependant, la méthode même de sélection peut être en cause. Elle porte sur des séries individuelles complètes or la relation entre les facteurs externes et la croissance n'est probablement pas constante dans le temps. Particulièrement, des différences entre les phases juvénile et mature peuvent être attendues. Lors de l'homogénéisation, la relation entre les facteurs et la croissance est considérée en terme de population et seuls les individus centrés sont conservés. Or un individu peut être très représentatif du lot uniquement pour une part de sa croissance et ne pas être sélectionné. Pour réaliser une homogénéisation fonction du temps, JANSMA (1995) propose d'extraire de la moyenne de site non pas une série individuelle complète mais un intervalle de 50 ans et de ne conserver que ceux dont la corrélation avec la moyenne résiduelle est supérieure à 0,32.



# Chapitre 3

## DATATION DE LA SECONDE GÉNÉRATION DE TRONCS DE CHÊNE EN BRIÈRE

### Introduction

Dans les faits, la constitution de la référence brièronne s'est déroulée sur une longue durée en raison du caractère discontinu des campagnes d'échantillonnage. J'ai présenté un état ponctué de cette référence en 1994 (VISSET *et al.*). Les hypothèses avancées à ce stade, notamment celle de la datation, nécessitaient des compléments d'échantillonnages, réalisés maintenant et qui les confirment. Le développement de la chronologie nécessite une accumulation progressive de bois analysés, liée au fait qu'il n'est pas possible de connaître *a priori* le nombre de séries individuelles aptes à constituer un échantillonnage représentatif de la croissance de la population régionale pour permettre la datation. C'est particulièrement le cas des chronologies qui sont issues de régions biogéographiques différentes. Cette intégration progressive reflète, en fait, surtout les aléas des campagnes d'échantillonnage. Ici, le lot complet de séries individuelles est donc considéré indépendamment de ces dates d'approvisionnements, comme un ensemble cohérent.

La chronologie Brière-Ref3 est constituée de tous les individus interdatés sur les sites d'Ile d'Errand, d'Ile Clidan, et quelques individus provenant d'Ile Fédrun et de Cabéno. Les références pour dater cette série présumée de l'âge du Bronze font défaut dans l'ouest de la

---

France. La datation doit donc être menée à l'aide des étalons médio-continentaux, éloignés, décrits précédemment (cf. chap. 2). Les publications de BECKER (*et al.* 1985) et de PILCHER (*et al.* 1984) montrent que des séquences des longues références des laboratoires de Stuttgart et Belfast peuvent être synchronisées. La référence Brière-Ref3 présente des caractéristiques proches de celles d'une de ces séquences : 400 cernes et une couverture moyenne de 30 cernes par an. Par ailleurs, nous avons pu montrer que ce niveau de représentation de la croissance régionale pouvait suffire pour dater des séries de l'ouest de la France jusque sur les étalons suisses et allemands dans 3 périodes différentes. La synchronisation des croissances de forêts actuelles, qui ne permet aucune équivoque quant au résultat puisque les cernes peuvent être datés par dénombrement, est également positive (cf. partie 1).

Dans les procédures classiques en datation dendrochronologique, seule la quantité d'information est prise en compte pour déterminer si les chronologies sont suffisamment documentées pour être comparées et la totalité du matériel est intégrée à la référence. Nous cherchons à justifier, ici, comme pour la constitution de la référence lorraine, l'intégration de chaque composante. La procédure employée pour la constitution de Lorraine-Brz5, est comparée à une seconde, plus adaptée aux lots de taille importante. La chronologie Brière-Ref3 se trouve homogénéisée au terme de ces procédures. La confrontation des chronologies homogénéisées aux références médio-continentales est comparée à la datation de la série complète.

Les troncs subfossiles sont découverts sur le lieu même où ils se sont développés. Des moyennes peuvent alors être réalisées en fonction de la topographie. Elles permettent de considérer très probable que les arbres inclus dans une chronologie moyenne sont originaires d'un seul milieu. Celui-ci peut être décrit par la topographie, la sédimentation et la palynologie. Cette situation est très rare pour du matériel ancien daté en dendrochronologie. Elle permet de montrer qu'en fonction des milieux de développement des arbres, les résultats de datation sont variables.

La confrontation de la chronologie moyenne totale et des différentes moyennes partielles aux référentiels contribue à soutenir que les séries peuvent être homogénéisées pour mieux représenter l'influence régionale sur la croissance.

## 1 Zones de prélèvement

### 1.1 Localisation

145 échantillons sont prélevés sur 8 sites différents (fig. 89 et 90). 4 d'entre eux, voisins, sont localisés sur le côté est de l'île d'Errand, sur la commune de Saint Malo-de-Guersac (44). 2 sites sont positionnés au sud et à l'ouest de l'île de Clidan, sur la commune de Saint Joachim (44). Un échantillon isolé provient d'une charpente de chaumière en démolition sur l'île de Fédrun faisant également partie de la commune de Saint Joachim. La datation de ce chevron de postérieur à -1097 démontre sans équivoque l'utilisation des mortas pour réaliser de petites pièces de charpente. Le site proche du lieu-dit Cabéno est localisé sur la commune de Saint André-des-Eaux (44).

Ce dernier est le plus à l'ouest des marais de Brière (47°19'40"N, 2°16'45"W coordonnées internationales). L'île Fédrun peut être considérée comme faisant partie de la ligne d'îles qui partage les marais par leur centre (47°22'20"N, 2°12'45"W). Île d'Errand et Île Clidan, à l'est de cette ligne sont incluses dans les marais privés. Les zones de prélèvements d'île Clidan sont localisées aux coordonnées suivantes : 47°22'10"N, 2°10'20"W (CLI1.1) et

47°21'00"N, 2°10'10"W (CLI.2). Celles d'Ile d'Errand s'échelonnent du nord au sud entre 47°22'40"N et 47°22'20"N pour 2°9'30"W. L'altitude reste voisine de 0,8 m NGF.

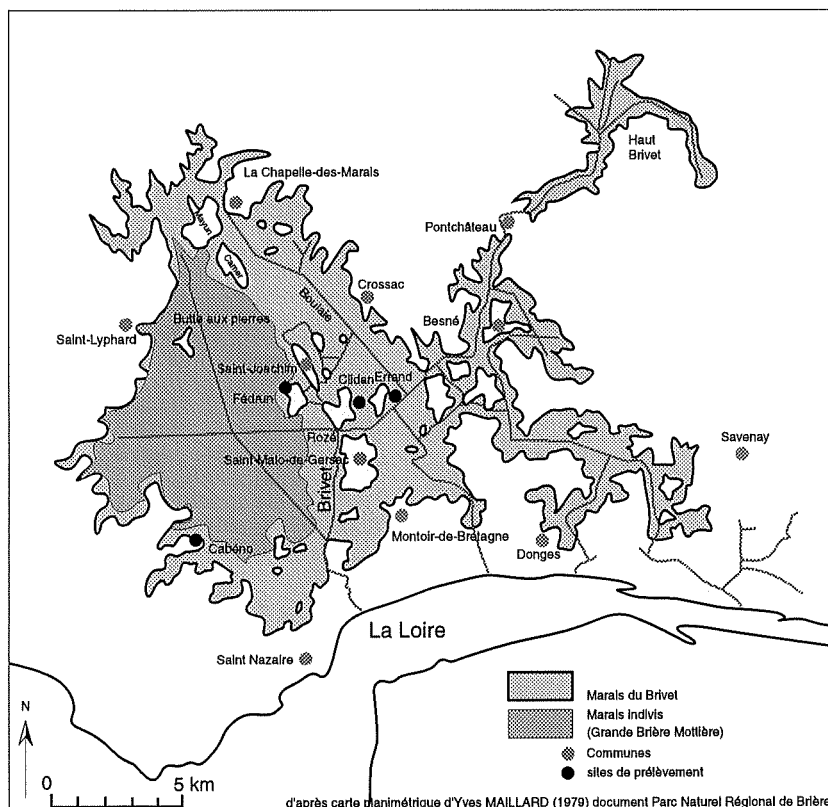


Figure 89 : localisation des sites en Brière

## 1.2 Nombre d'échantillons prélevés

Les échantillons provenant des environs d'Errand sont numérotés dans l'ordre des découvertes, toutes réalisées en septembre, au moment où le niveau d'eau est le plus bas dans le marais. En 1991, 36 arbres sont relevés à IDE 1, et en 1992, 24 sur le site IDE2. Les découvertes de ces lots doivent beaucoup à M. Moyon, agriculteur en Ile d'Errand et informateur de L. Visset. En 1994, M. Moyon aménage un étang, en retirant l'épaisseur de tourbe sur une surface d'environ 30 \* 15 m, ce qui permet d'échantillonner une quinzaine d'arbres (IDE 3). Le nombre d'échantillons sur ce site est porté à 22 après la campagne de 1995 qui permet également de

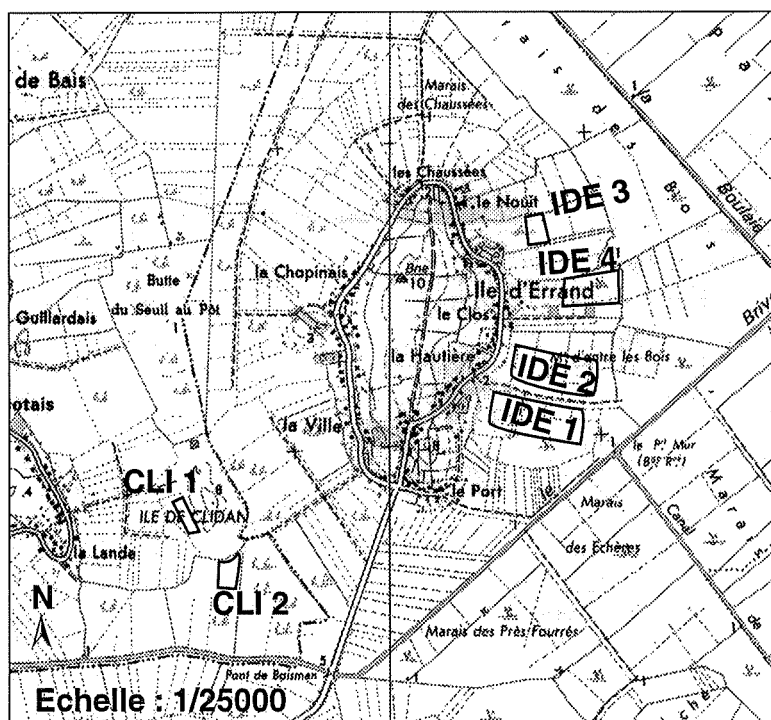


Figure 90 : localisation des zones de prélèvements près d'Ile d'Errand et Clidan.

---

relever 16 individus sur le site IDE 4. Les 4 ensembles livrent donc 98 échantillons soit la majorité du matériel analysé.

Les prélèvements ont également été réalisés en 1995 sur les sites de Clidan qui comportent 13 et 15 échantillons. A Cabéno, le matériel prélevé en 1996 provient des environs d'une zone d'exploitation réalisée par Mr Sébilo (artisan pipier à Herbignac). Le ramassage de 18 échantillons a eu lieu en surface dans une stratigraphie très modifiée.

### *1.3 Observations sédimentaires*

Des sondages sont réalisés à la tarière pédologique sur les sites IDE2-3 et 4 ainsi que CLI1-2. Leur objectif est de situer la sédimentation sur le site parmi les observations connues, faites par L.VISSET (cf. partie 1). L'utilisation d'une rallonge permet d'atteindre une profondeur de 2 m. Ceci correspond uniquement à la partie supérieure de la sédimentation. En effet, le socle est repéré à des profondeurs très variables allant de 5 m à plus de 20 m (VISSET 1974, cf. partie 1). Seuls des critères morphologiques sont employés et le sédiment étant se compactant facilement, les profondeurs observées avec une tarière pédologique présentent une erreur d'estimation supérieure à celles obtenues avec les carottiers utilisés pour les prélèvements palynologiques.

Les sondages réalisés sur les sites IDE2-3 et 4 et CLI2 indiquent que la sédimentation est très proche de celle classiquement observée pour la cuvette notamment au centre de la Grande Brière, au quatre canaux (fig. 91). Le dépôt marin, argileux, est observé à une profondeur comprise entre 180 cm à IDE2 et 190 cm à IDE3. Une couche de vase organique très noire, pâteuse fluide, dont l'épaisseur varie de 5 cm (CLI2) à 10 cm (IDE2) s'intercale entre l'argile marine et les formations tourbeuses. La tourbe a donc une puissance comprise entre 170 et 180 cm. Elle peut être divisée en deux entités dont la transition est progressive entre 75 cm (IDE2) et 100 cm (IDE3). La tourbe est dans un premier temps brune et fibreuse puis pâteuse et noire. Un horizon de surface, de 5 à 10 cm d'épaisseur est le siège d'une activité biologique (actuelle) intense et présente une fraction minérale, probablement limoneuse plus importante. On peut supposer que cet apport présente un lien avec l'inondation hivernale.

Aucun des sondages réalisés n'a permis de mettre en évidence le niveau de vase marine superposant la tourbe tel qu'il est observé dans des parties plus au sud de la Brière, comme à Rozé (fig. 91).

Le site CLI1 est localisé au contact entre l'île, affleurement du socle, et les formations tourbeuses du marais. Les carottages ont été multipliés pour appréhender la variation du profil sur un axe partant de l'île vers le marais. Ils ont été réalisés près des arbres échantillonnés, de façon à assurer le lien entre les croissances et la sédimentation. Ils sont repérés par la distance qui les sépare du contact entre la tourbe et le socle (fig. 91).

Le socle est à porté de la tarière dans deux sondages, à 3 m et à 5 m de l'île. Sa partie supérieure est dégradée en arène. Un pélosol est observable dans le profil à 5 m à son contact puis l'horizon tourbeux, comportant un apport originaire de l'île de toutes dimensions (des cailloux aux argiles) apparaît structuré sur une puissance de 25 à 30 cm. Il n'est pas observé de formation marine dans ces profils, la tourbe repose directement sur l'arène. Les arbres sont découverts affleurant et sont beaucoup moins bien conservés que plus avant dans le marais.

A une distance comprise entre 10 m et 20 m de l'île, le socle ne peut plus être atteint

à la tarière qui reste bloquée dans le dépôt marin sableux. Ce niveau est trouvé à une profondeur progressivement supérieure, partant de 40 cm à 10 m vers 120 cm à 20 m. L'épaisseur de tourbe va croissante dans le même sens et la vase organique est observée localement (à 10 m).

A 40 m de la limite du marais, la sédimentation classique décrite pour CLI 2, localisé entre 80 et 150 m de cette limite, est retrouvée (fig. 91).

La variation latérale de la sédimentation près de l'île de Clidan est donc assez rapide. On peut supposer que seuls les arbres échantillonnés dans une bordure inférieure à 50 m autour de l'île disposaient de conditions de développement différentes de celles qui peuvent être admises de façon globale pour le marais. Les arbres de CLI1 sont les seuls analysés dans cette situation.

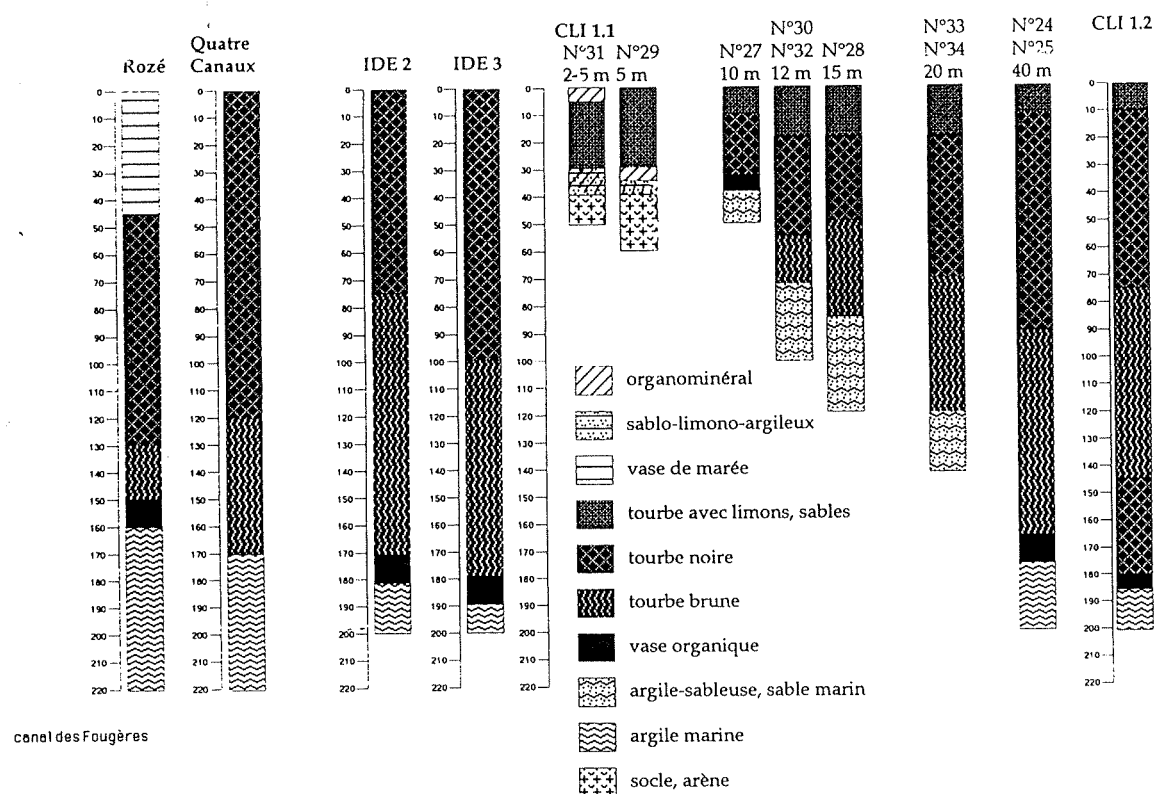


Figure 91 : sondages réalisés à la tarière pédologique sur les sites d'échantillonnage des arbres

## 2 Constitution d'une référence Brièronne

### 2.1 Statistiques descriptives de Brière-Ref3

L'étude progressive en fonction des lots d'arrivage, des lieux de provenance et des périodes de saisie a permis de synchroniser 97 séries individuelles sur 130 étudiées. La constitution des chronologies moyennes se déroule, dans un premier temps, de façon indépendante par lot d'étude. Les chronologies intermédiaires obtenues sont ensuite comparées entre elles, ainsi qu'à des individus non intégrés à une série moyenne. L'agglomération progressive est menée de façon à agglomérer le maximum d'individus tout en maintenant un risque d'erreur le plus faible. Risque calculé par les différents tests de

synchronisation disponibles.

La dernière synthèse, comportant 97 séries, est nommée Brière-ref3. Les séries datées proviennent essentiellement de la commune de Saint Malo-de-Guersac, du lieu-dit Ile d'Errand (69 séries) et de celle Saint Joachim, au lieu-dit Ile Clidan (19 séries). Quelques séries sont issues également de Saint Joachim, lieu-dit Ile Fédrun (1 série) et de Saint André-des-Eaux, lieu-dit Cabéno (8 séries). La répartition dans le temps du nombre de séries et du nombre de cernes par site montre que la construction s'est principalement réalisée à partir de matériel d'Ile d'Errand (fig. 92). La concentration de mortas autour de l'île et surtout des contacts faciles avec les propriétaires nous ont permis d'obtenir le matériel en quatre campagnes.

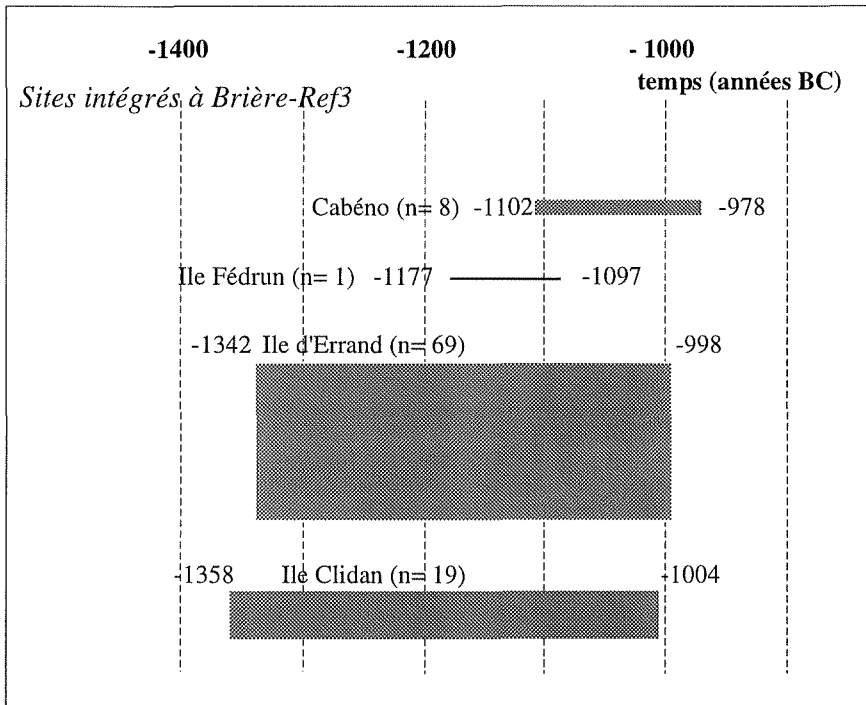


Figure 92 sites intégrés à la référence Brière-ref3

	Ile d'Errand Ile Clidan Cabéno Ile Fédrun				
	Brière-Ref3	IDE-M32	CLI-M7	CAB-M21	FED-1
origine	-1358	-1342	-1358	-1102	-1173
terme	-978	-998	-1004	-978	-1097
Nb. éch.	97	69	19	8	1
Nb. cernes	381	345	355	125	77
âge moy.	116	123	116	62	-
Nb.c/an	30	25	6	4	-
c. moy. (mm/100)	162	157	162	144	66
E. typ.	76	65	95	89	40
r1	0,83	0,84	0,84	0,77	0,9
r2	0,68	0,68	0,68	0,59	0,76
%75	51	56	63	70	-
%90	33	39	45	47	-
rmoy	0,413	0,432	0,497	0,54	-
EPS	0,999	0,999	0,988	0,95	-

Tableau 41 : statistiques descriptives des chronologies de site

Les deux sites d'Ile Clidan et d'Ile d'Errand livrent des chronologies qui couvrent une même période dans l'âge du Bronze final. Les séries de Cabéno et d'Ile Fédrun sont plus courtes (tab. 41). Cependant, ce résultat n'est probablement pas significatif pour ces sites où peu d'échantillons ont été datés.

L'âge moyen des séries montre que dans les deux principaux sites, le nombre de cernes n'est pas limitant pour la recherche des synchronismes. Par contre, dans le cas de Cabéno, les séries sont courtes et présentent une croissance assez perturbée par l'effet de jeunesse (cf. partie 4).

La quantité de matériel étudiée par site est très déséquilibrée. En conséquence, le nombre moyen de cernes par an est de 25 pour les bois provenant d'Ile d'Errand alors que dans la chronologie de synthèse il atteint 30 cernes par an. Ce site est donc largement sur-représenté dans la référence.

La largeur moyenne des cernes est voisine de 1,5 mm sauf pour le bois de Fédrun qui a une croissance plus lente. Ce bois est cependant très incomplet. La variance de cette largeur atteint environ la moitié de la moyenne mais est très largement expliquée par une très forte autocorrélation (tab. 41). Cette dépendance sérielle, observable pour tous les sites, est imputable à une tendance très prononcée de la largeur des cernes.

La corrélation moyenne entre les séries constituant les chronologies de site et les taux d'années caractéristiques sont typiques de croissances très synchrones. Ceci vaut également pour le site de Cabéno. Cependant, en fonction de l'âge des arbres, la signification de la corrélation est beaucoup plus faible pour ce site que pour les autres. Elle se traduit par une médiane des valeurs t de Student entre les séries individuelles médiocre (2,50) (cf. 1.2).

L'âge des arbres à Cabéno a également une répercussion sur le synchronisme entre la moyenne de site CAB-M21 et celle des autres sites (tab. 42). Les résultats restent cependant significatifs. *A contrario*, les deux séries présentant les meilleures statistiques descriptives, IDE-M32 et CLI-M7 corrélaient très fortement. Le bois d'Ile Fédrun est synchronisé avec une sécurité également élevée malgré son manque de représentativité. D'une façon générale, les chronologies de site concordent bien.

	IDE-M32	CLI-M7	FED1	CAB-M21
IDE-M32		332	71	99
CLI-M7	18,76		71	92
FED1	6,9	7,33		6
CAB-M21	4,86	3,61	-	

Tableau 42: valeurs t et nombre d'années de chevauchement entre les moyennes de site

## 2.2 Corrélation entre les séries individuelles

Le synchronisme entre les individus est estimé par la valeur t de Student associée au coefficient de corrélation obtenu entre deux séries standardisées en indices Except. La matrice de corrélation pour les 97 individus intégrés à Brière-ref3 comporte 4456 valeurs. Parmi celles-ci, 2971 engagent plus de 30 cernes et sont donc considérées significatives. Dans les autres cas, le chevauchement entre les arbres est nul ou insuffisant pour le calcul. La matrice comporte donc 43% de vide d'information. Les études dendrochronologiques de matériel historique sont toujours dépendantes de ce manque d'information. Des méthodes de calcul comme l'analyse de variance (FRITTS 1976) ne peuvent être appliquées à ce type de matrice. L'analyse de la qualité du signal par le paramètre EPS, qui peut être jugée analogue à l'analyse

de variance (BRIFFA et JONES 1990), est imposée par ce manque d'information.

Pour les représenter, les valeurs  $t$  de Student sont transformées en classes associées à des niveaux de gris (fig. 93). Les valeurs extrêmes observées sont -2,3 et 15,5. Parmi 2971 corrélations, 74 sont opposées et concernent peu de cernes. Les valeurs  $t$  comprises entre 0 et 3,35 sont au nombre de 816 alors que 2155 sont supérieures. Le risque d'erreur associé à une valeur  $t$  de 3,35 pour 30 cernes est de 1%. Les 2155 corrélations correspondent donc à des risques inférieurs à 1%. Parmi ces valeurs, 626 sont supérieures à 5,8 et correspondent à des risques très faibles.

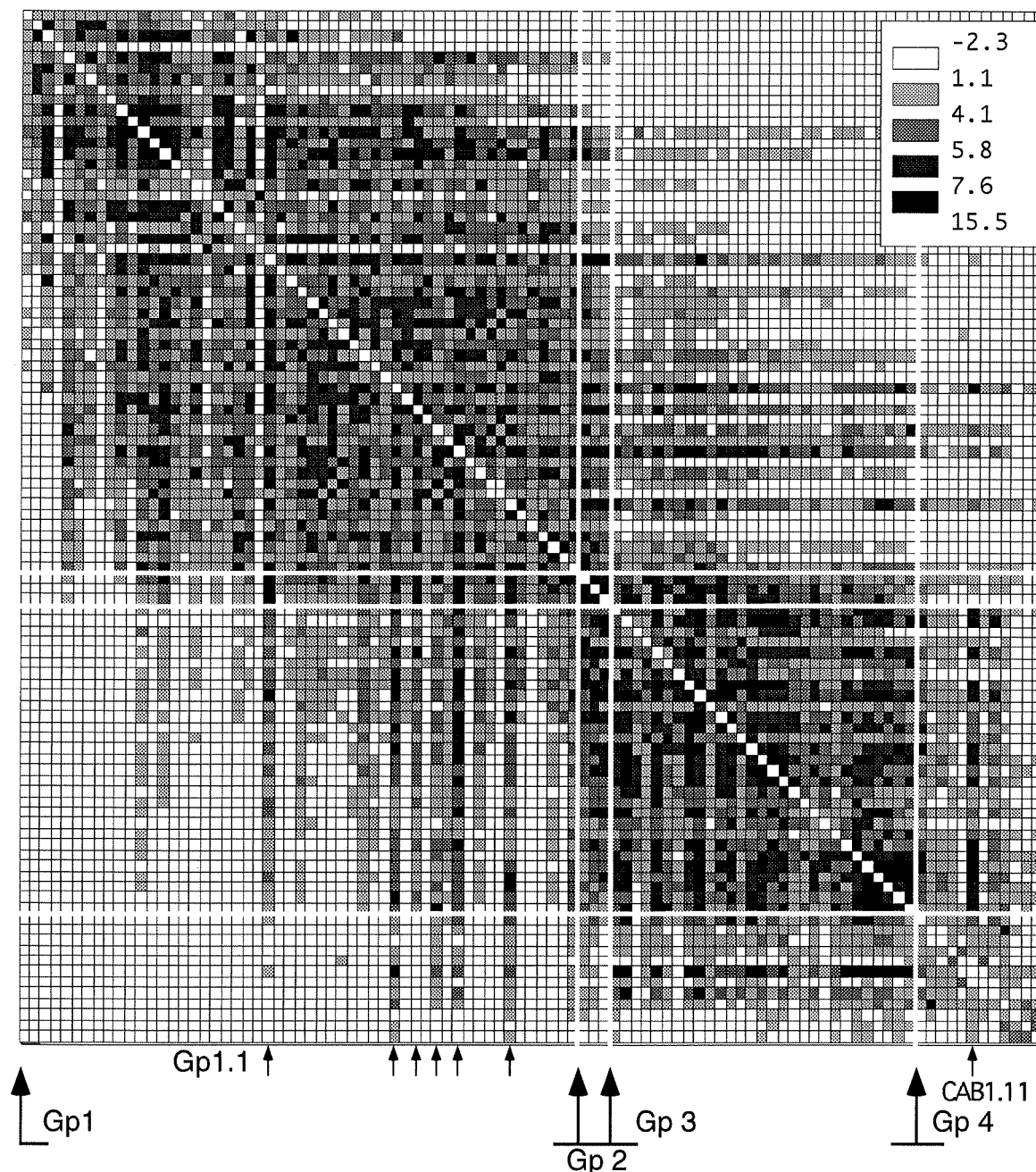


Figure 93 : matrice de corrélations entre les composantes de Brière-Ref3 ordonnées suivant leur position dans la chronologie moyenne. Valeur  $t$  de Student, indices Except

La forme de la distribution des valeurs  $t$  de Student permet de déterminer le paramètre le plus justifié entre la médiane et la moyenne pour caractériser le lien qui unit des sous-ensembles de séries. La position de la distribution par rapport à 0 sera mieux déterminée par la médiane si elle présente une asymétrie (THOMAS 1976, ZAR 1996).



Pour le corpus de Brière-Ref3, la distribution montre un seul mode compris entre 2,43 et 3,37 (fig. 94). Le Kurtosis inférieur à 0 indique que ce mode est plus "élevé" que dans la distribution d'une variable Normale. Une asymétrie est également mise en évidence par un Skewness de 0,32. La médiane s'élevant à 3,79 est probablement le paramètre de position le plus adapté pour cette distribution. La moyenne, ici de 3,89, influencée par l'asymétrie, surestime donc légèrement la position de la distribution. D'une façon générale, on peut supposer que les valeurs t suivent une distribution unimodale asymétrique avec une prépondérance en nombre des valeurs plus élevées que le mode. La médiane d'un ensemble de valeurs t est donc le paramètre qui décrit le mieux le lien qui unit un ensemble de séries. La moyenne surestime ce lien dans la plupart des cas, mais dans des proportions qui semblent faibles.

Les valeurs t obtenues entre toutes les séries individuelles de Brière-Ref3 peuvent être jugées caractéristiques d'un lot homogène.

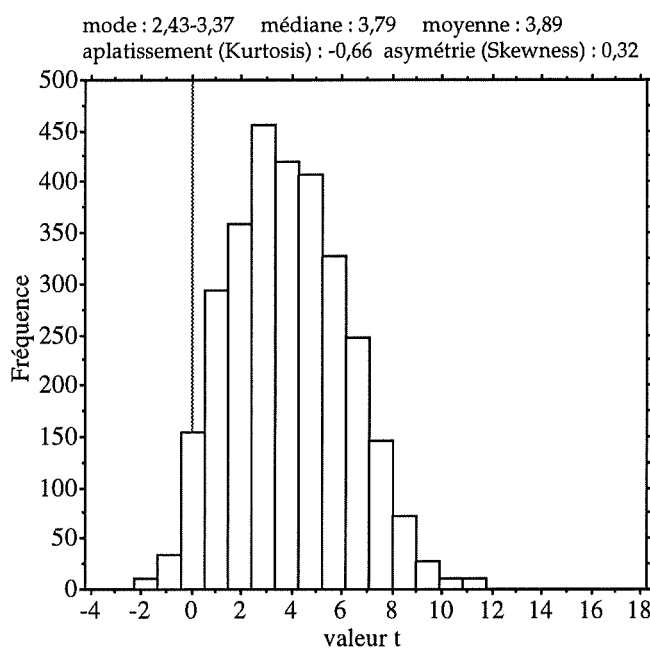


Figure 94 : distribution des valeurs t de Student calculées entre les composantes de Brière-Ref3

Les caractéristiques de la distribution des valeurs t permettent de juger de l'homogénéité du lot mais il faut également vérifier que la qualité des corrélations est régulièrement répartie dans la matrice.

Celle-ci est ordonnée en fonction de la position relative des séries individuelles dans la chronologie moyenne. Les valeurs t calculées avec plus de 30 cernes sont réparties le long de la diagonale de la matrice. Plus l'arbre offre une longue chronologie, plus la colonne et la ligne qui lui correspondent contiennent de valeurs (fig. 93). Pour que la chronologie moyenne soit la plus équilibrée possible on espère une répartition régulière de la qualité de la corrélation le long de la diagonale.

Ce n'est pas le cas pour la chronologie Brière-ref3. Ceci implique que selon les périodes, des croissances sont plus ou moins synchronisées. Il est possible de créer 4 groupes de séries en fonction des corrélations et du temps.

	gp1	gp2	gp3	gp4		gp3
gp1	4,31	3,82	2,61	1,82	gp1.1	4,68
gp2		7,81	5,29	1,73	gp1.2	1,70
gp3			5,50	1,94		
gp4				2,50		

Tableau 43 : médianes des valeurs t de Student par groupe et entre groupes de corrélation

Le groupe 1 comporte les 54 séries les plus anciennes de la chronologie (fig. 93). La médiane des valeurs t indique que les croissances sont assez fortement synchrones (tab. 43). Trois arbres qui proviennent d'Ile d'Errand (IDE3.70, IDE2.44, IDE2.48) constituent le deuxième. Leurs croissances corrélaient très fortement entre elles. La médiane s'élève à 7,81. Elles corrélaient également avec celles d'individus des groupes 1 et 3 (tab. 43). Le troisième groupe est constitué de 30 séries plus récentes dont les positions se "suivent" dans la chronologie synthétique. La croissance de l'arbre CAB1.11 provenant de Cabéno, est très

---

similaire à celle de ce groupe bien qu'il soit décalé vers la fin de la chronologie. Les 31 séries sont très synchrones entre elles. La valeur médiane est 5,50. Ces séries montrent des valeurs de Student relativement médiocres avec celles du groupe 1. Les séries les plus récentes, constituent un quatrième groupe beaucoup plus dispersé, dont la valeur t médiane n'atteint que 2,50. Ce groupe est également plus original. Les valeurs médianes avec les autres groupes sont médiocres. Les 12 arbres qui le constituent sont jeunes et issus de Cabéno.

Le premier groupe peut être divisé en deux sous-ensembles (GP1.1 et 1.2) en fonction de la corrélation des séries avec le troisième. 6 individus, qui constituent le sous-groupe 1.1, présentent des valeurs de Student supérieures à 5,8 avec au moins une composante du groupe 3. Les 49 séries restantes du groupe 1, inversement, ne corréleront jamais avec une valeur t associée de 5,8. Entre les sous-groupes et le groupe 3, les valeurs médianes sont donc très contrastées.

Les séries intégrées à Brière-Ref3 apparaissent donc corréler avec une bonne qualité mais la répartition de cette qualité est irrégulière dans le lot.

## 2.3 Chevauchement entre les individus

### 2.3.1 Matrice des chevauchements

Le chevauchement entre les individus le long de la chronologie pourrait expliquer la répartition irrégulière de la qualité de la corrélation. Si les individus ne sont pas correctement répartis, pour certaines périodes, les comparaisons engagent des arbres âgés et jeunes qui peuvent expliquer la baisse des coefficients. La standardisation amortit toutefois, au mieux, ces effets.

Une matrice, analogue de la précédente, contient les nombres de cernes de chevauchement pour chaque paire de composantes (fig. 95). Le seuil de signification est placé à 30 cernes et le recouvrement maximum observé est de 189 cernes. En moyenne, les séries chevauchent de 75 ans. Les recouvrements les plus longs sont localisés autour de la diagonale.

La figure 95 montre que la répartition des séries est bien entendu soumise à la variation aléatoire du nombre de cernes par série mais les différences observées ne peuvent être la cause de la formation des groupes de corrélation. 3 individus qui comportent 42, 68 et 90 cernes et dont les positions 148, 151 et 154 se suivent, conduisent à une discontinuité dans le groupe 1 mais restent insuffisants pour expliquer les groupes de croissance.

### 2.3.2 Bloc diagramme

Dans le bloc diagramme, les séries individuelles sont représentées par des segments dont la longueur est fonction de leur nombre de cernes. Ces segments sont situés selon la position des séries dans la chronologie moyenne. Le bloc diagramme de Brière-Ref3 ne montre pas de période lacunaire en séries individuelles. Les séries chevauchent donc assez régulièrement.

Cependant on peut remarquer que la partie ancienne de la chronologie est moins riche en séries et que l'âge des arbres va en diminuant des groupes 1 et 2 aux groupes 3 et 4. Le nombre moyen de cernes des séries du groupe 1 est de 128. Il est de 110 pour celles du groupe 3 et nettement plus faible pour le groupe 4, avec 67. Du fait du décalage des positions et de ce rajeunissement, certaines corrélations sont calculées entre arbres âgés et jeunes et mettent en jeu de moins en moins de cernes. Ces décalages sont probablement très courants

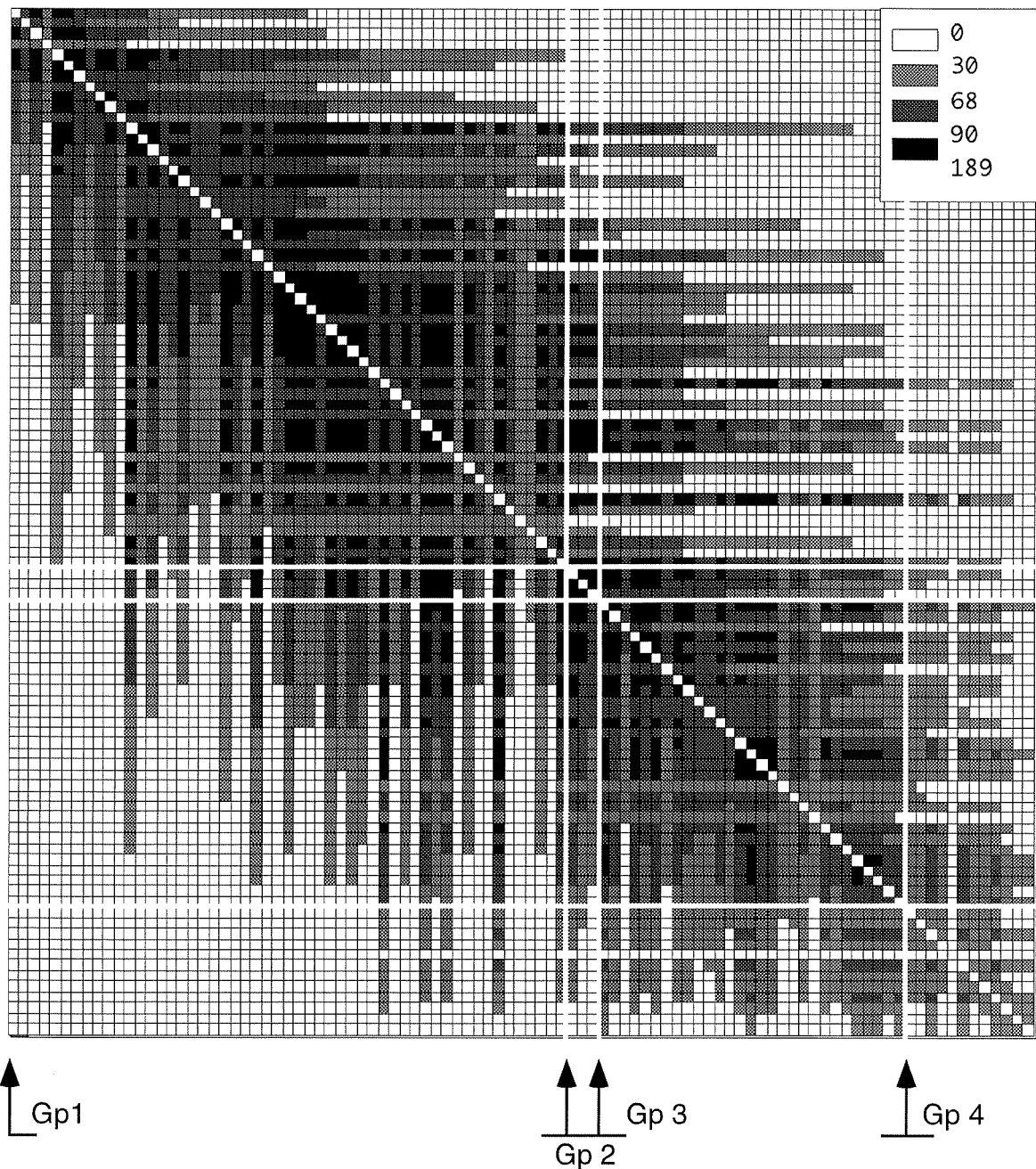


Figure 95 : matrice des chevauchements entre les composantes de Brière-Ref3 ordonnées suivant leur position dans la chronologie

dans les séries qui composent les références historiques.

La dégradation de la qualité de la corrélation en fonction du décalage entre les séries, exprimé en années, peut être observée (fig. 96).

Lorsque deux séries sont proches dans le temps, les âges auxquels les cernes ont été formés peuvent être considérés comme voisins. En effet, pour une majorité du corpus, les prélèvements ont eu lieu à la base du tronc conservé. De même, si les rondelles ne comportent pas la moelle, la dégradation de leur centre n'atteint en général que quelques cernes (cf. partie 4). Le nombre de cernes utilisés lors du calcul du coefficient de corrélation est également, en moyenne, plus élevé car les chevauchements sont plus longs.

Si la comparaison engage des séries dont les positions relatives sont proches, la

Figure 96 : bloc diagramme des composantes de Brière-Ref3



qualité de la corrélation est très diversifiée mais atteint les valeurs les plus élevées observées. Elle est en moyenne supérieure à celle obtenue entre des séries très décalées. La différence d'âge explique une part de cette observation mais également le nombre de cernes utilisés dans les comparaisons.

D'une façon générale, pour la population, la tendance de la croissance liée à l'âge est singulière comparée aux observations habituelles (cf. partie 4). La croissance est faible pendant une première partie de la période de jeunesse des arbres puis atteint une valeur forte en moyenne de 250 /100 mm vers 40-50 ans. Cette croissance particulière peut être attribuée à l'influence de facteurs locaux des sites (cf. partie 4). La période de maturité est, par contre, caractérisée par une croissance plus faible, environ 100 /100 mm.

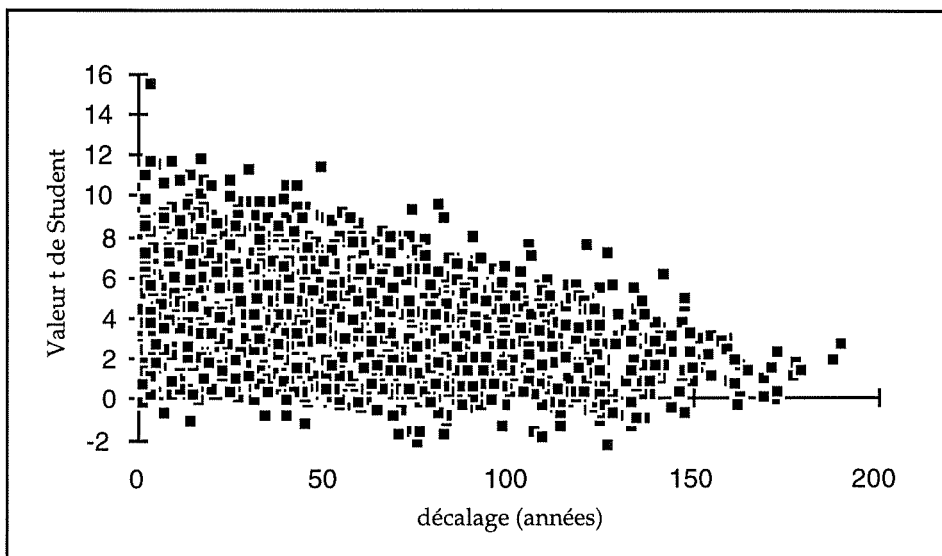


Figure 97 : valeur t de Student en fonction de la position relative des composantes

Pour ces raisons, la concordance le long du bloc diagramme de cernes élaborés à des âges différents induit une perte de la corrélation observable. Celle-ci est toutefois, au mieux, maîtrisée par la standardisation. Cette remarque est probablement valable pour beaucoup de chronologies élaborées avec du matériel ancien.

Deux individus du groupe de corrélation 3, IDE2.50 et IDE1.35, présentent, de façon ponctuelle, des coefficients de corrélation négatifs, pouvant atteindre -0,20, avec les séries du groupe 1. Ces valeurs justifient une observation particulière des courbes de croissance sur la table lumineuse. Pendant leur phase juvénile, ces deux séries comportent des cernes minces dont les variations ne concordent pas avec celles de la population. La différence de croissance est la plus marquée avec les arbres du groupe 1, qui sont plus âgés. Pendant la phase de jeunesse, elle est également assez forte, avec les arbres du groupe 3 lui-même. Ces deux arbres font donc exception et leur particularisme peut être attribué à des facteurs individuels.

La perte de qualité de la corrélation en fonction du décalage (fig. 97) des séries existe mais elle est progressive et ne semble pas exceptionnelle pour ce corpus. Il n'apparaît pas de discontinuité suffisamment marquée pour justifier les différences de corrélation entre les séries des groupes 1 et 3 par une mauvaise répartition des séries dans le temps.

#### 2.4 Vérification du synchronisme entre les groupes de croissance

L'observation de discontinuités dans le synchronisme des séries individuelles implique une vérification des positions relatives de chaque ensemble. Une chronologie moyenne est réalisée par groupe. Elles sont nommées Brière-Gp suivi du numéro de groupe.

Une recherche de synchronisme est menée entre toutes les chronologies moyennes. Les résultats sont présentés pour les séries standardisées en indices Except. Dans tous les cas, le résultat le plus significatif correspond à la position du groupe dans la synthèse Brière-Ref3. Ces résultats se dégagent très nettement des autres propositions. Les valeurs t de Student obtenues (tab. 44) correspondent à des risques très faibles qui ne permettent pas de remettre en cause la place des différentes séries dans la chronologie moyenne Brière-ref3. Une représentation graphique des séries standardisées (indices E) permet un accord visuel avec ces résultats (fig. 98A).

	Gp1	Gp1.1	Gp1.2	Gp2	Gp3	Gp4
Gp1		-	-	153	165	84
Gp1.1	-		252	153	165	84
Gp1.2	-	12,60		153	143	65
Gp2	11,29	11,28	8,51		139	60
Gp3	11,31	12,00	7,86	9,81		99
Gp4	5,55	5,41	-	-	7,22	

Tableau 44 : valeurs t de Student des corrélations croisées des groupes de séries et nombre de cernes utilisés dans le calcul

Le groupe 4 est principalement constitué de séries provenant de Cabéno. Ce site peut présenter une relative indépendance des facteurs locaux et les arbres découverts sont jeunes. Cependant, la chronologie moyenne est synchronisée, après standardisation, avec un risque faible sur celles des groupes 1 et 3 avec lesquelles elle présente le plus long

chevauchement (tab. 44). L'origine et l'âge des arbres expliquent la discontinuité observée dans la matrice.

La discontinuité principale dans le synchronisme entre toutes les séries est observée entre celles des groupes 1 et 3. Les chronologies moyennes des sous-ensembles du groupe 1 sont fortement synchronisées avec celle du groupe 3, excluant tout risque d'erreur. Cependant, les séries du groupe 1.2 corrélient avec une qualité inférieure aussi bien avec celles du groupe 3 qu'avec celles du deuxième (tab. 43 et tab. 44).

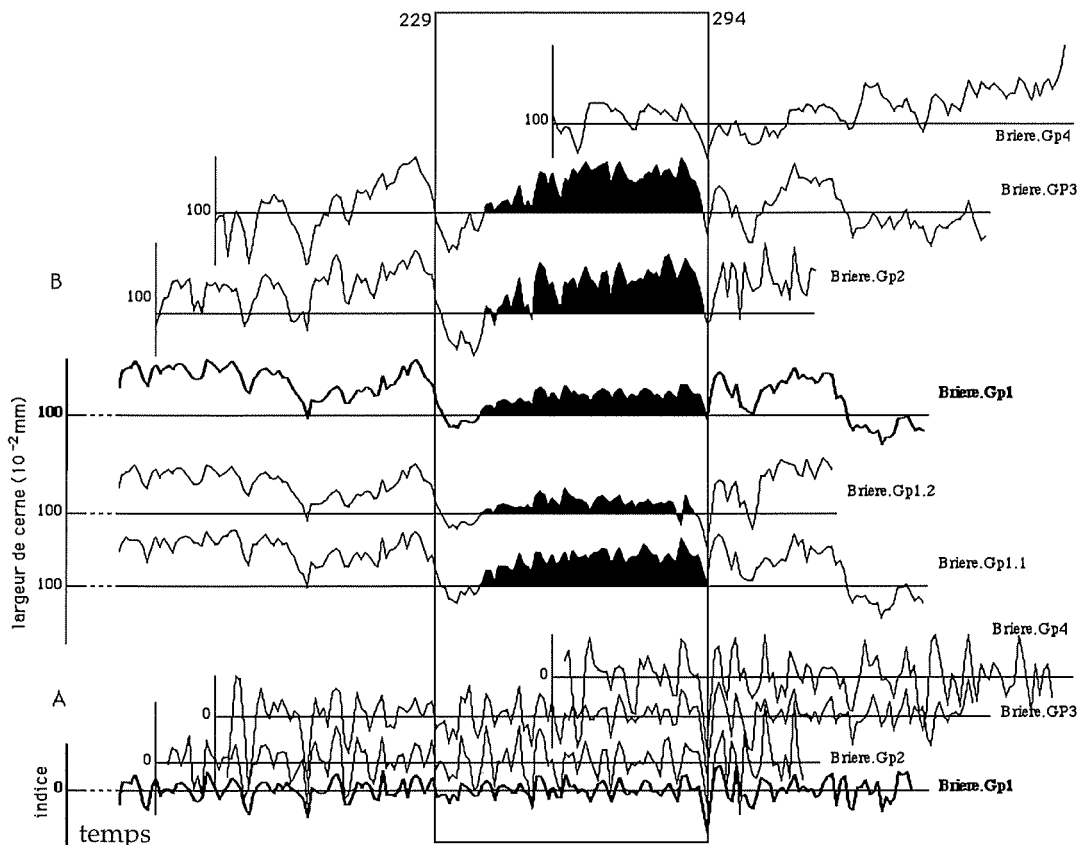


Figure 98 : croissance moyenne des groupes de séries, standardisée (A) en indices E et en valeurs brutes (B)

La représentation graphique des différentes séries moyennes en valeurs brutes permet de montrer que les épaisseurs sont très synchrones entre tous les groupes jusqu'à une grande dépression débutant à l'année relative 229 (fig.98B). L'année 294 correspond également à un stress important pour toute la population. Entre ces deux cernes en général très minces, la croissance est assez élevée pour tous les arbres. Elle présente cependant de grandes différences de niveau moyen selon les groupes. Le stress de 229 semble très diversement affecter la production des arbres des différents groupes. Ceux du sous-ensemble 1.2 sont les plus atteints. Entre 229 et 294, le groupe 1 est caractérisé par une production

moyenne inférieure et une variation interannuelle plus faible que celles observées pour la croissance des groupes 2 et 3. Les séries qui constituent le groupe 1.1 sont moins affectées et conservent un niveau de production plus proche de celui de ces deux groupes.

Ce résultat visuel peut être quantifié par le calcul de la corrélation mobile entre les groupes. Le coefficient de corrélation entre deux séries moyennes standardisées en indices E est calculé dans des fenêtres de 30 cernes décalées d'année en année. Le résultat est rapporté à la borne inférieure de la fenêtre. Entre 180 et 235, en année relative, la corrélation est élevée : entre 0,6 et 0,9 en fonction des groupes et de leur représentativité (fig. 99). Le résultat le plus élevé, 0,94, est obtenu entre les sous-ensembles du groupe 1, qui comportent le plus de séries individuelles d'âge avancé chevauchantes pour cette période. Inversement, la corrélation la plus basse pour cette période, inférieure à 0,6, est observée ponctuellement entre les groupes 1.2 et 3.

Après l'année 235, la chronologie moyenne Brière.Gp1.2 corrèle avec celles des autres groupes avec une valeur de  $r$  qui est au maximum de 0,6 puis chute localement vers 0,2 jusqu'à l'année 265. Les intervalles 235-265 et 265-295 marquent le début et la fin de la période de croissance de niveau moyen assez élevé pour la population entière, consécutive au stress de 229. La corrélation est fortement dégradée sur la fin de la période, car le groupe 1.2 n'est

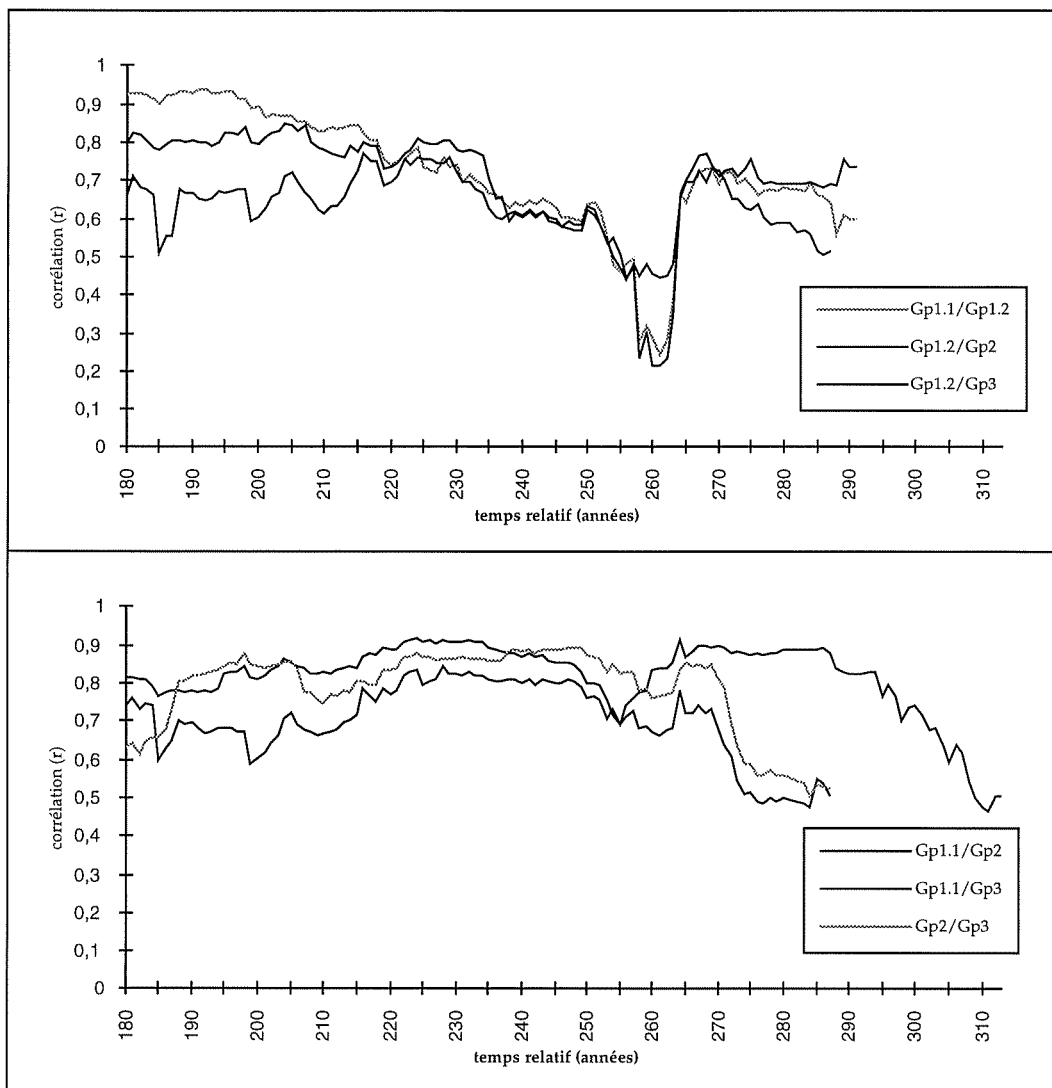


Figure 99 : corrélation en fonction du temps entre les chronologies en indices E des groupes de croissance. Fenêtre de 30 cernes décalée d'année en année

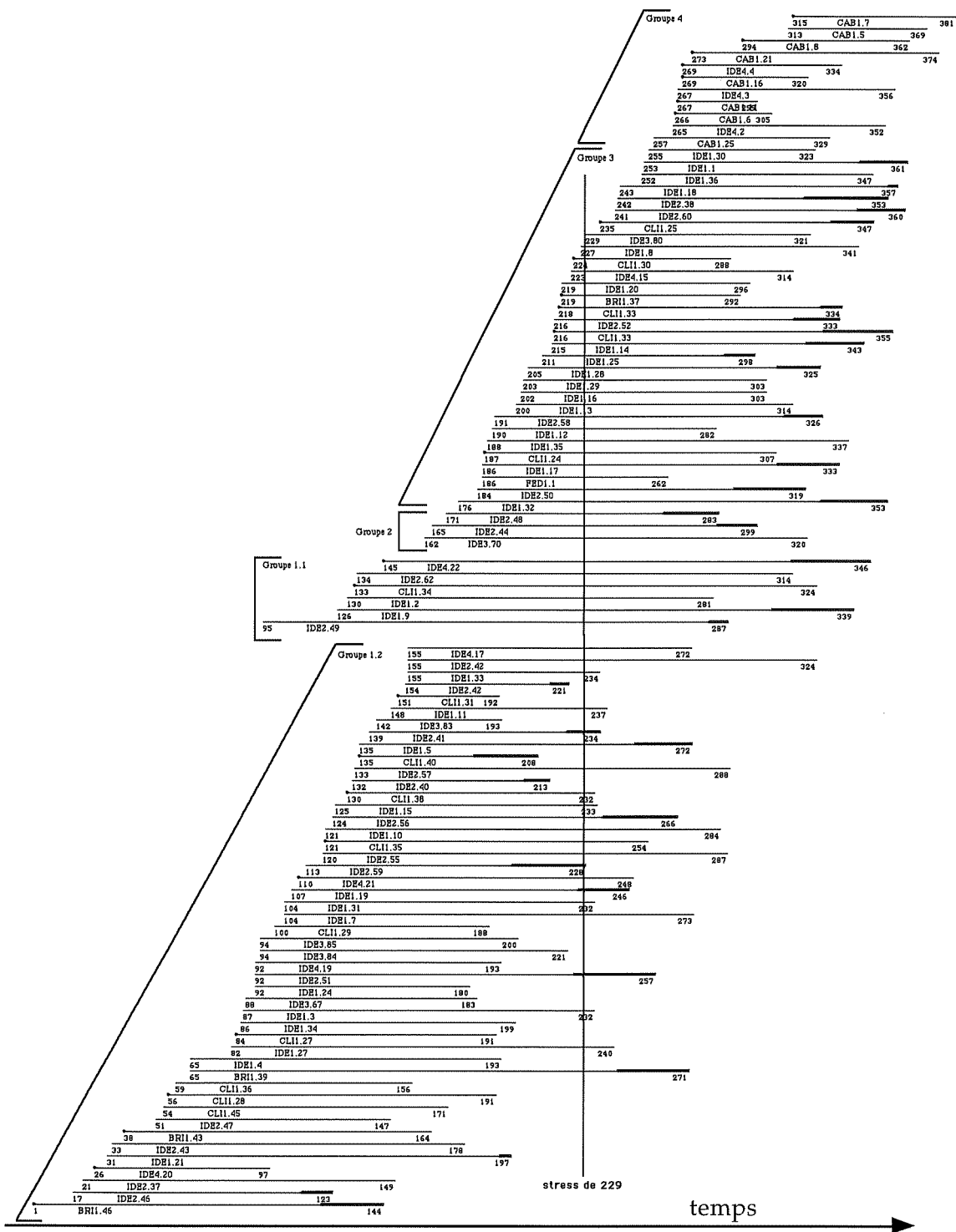


Figure 100 : bloc diagramme par groupe de corrélation et situation de l'année de stress 229

plus représenté que par un arbre. Celui-ci a une croissance singulière pendant environ 60 ans puis retrouve à la suite du stress de 294 une croissance plus conforme à celle de la population. La corrélation retrouve alors son niveau de départ.

Pour cette même période, la corrélation ne subit pas de perte de qualité dans les comparaisons qui engagent les séries du sous-groupe 1.1 (fig. 99). Elle se dégrade en lien avec la perte de représentativité après 275-305 et après 300-330 pour les groupes 2 et 3.

Une année ou une séquence de quelques années de croissance très faible, qui peut être interprétée comme une situation de stress pour la population (cf. partie 4), semble donc



---

induire une désorganisation de la croissance chez certains individus pendant la période consécutive. Ceci même si la population en général a une production assez forte sur cette période. En fonction des variations de la quantité de l'information, d'un possible effet direct de l'âge sur la corrélation (même sur les séries standardisées) et d'une interaction de l'âge de l'arbre au moment du stress, il est difficile de faire le lien entre la désorganisation de la croissance et le stress en lui-même. Au stade de la description de la qualité pour une datation de la chronologie de synthèse, il apparaît cependant des groupes de séries qui corrélaient plus ou moins en fonction de leur position dans la chronologie moyenne Brière-ref3 et du nombre de cernes qu'elles comportent. La figure 100 permet de mettre, en plus, en évidence un rôle important de la position dans la série de l'année 229 dans la formation des groupes. Selon les groupes, l'année correspondant à la chute de croissance est soit en fin, au centre ou au début des chronologies. L'observation de ces groupes de corrélation peut donc être rattachée, au moins en partie, à l'action de facteurs externes.

L'existence de ces groupes de corrélation peut avoir des répercussions sur la qualité du signal global porté par Brière-Ref3. Il est donc possible de justifier l'élimination des parties de séries très affectées consécutivement au stress de 229 pour obtenir une chronologie moyenne dont le synchronisme entre les composantes est le plus homogène sur l'ensemble de la chronologie.

### 3 Homogénéisation de Brière-Ref

#### 3.1 Méthode d'exclusion des composantes

Pour tester l'intégration de chaque composante à la référence, celle-ci est exclue de la chronologie moyenne. Une recherche de synchronisme est engagée entre la série exclue et la moyenne partielle standardisée en indices Except (cf. chap. 1). Dans 90 cas (sur 97), le synchronisme le plus élevé est obtenu à la position de la composante dans la référence. Le risque associé aux valeurs  $t$  de Student (tab. 45) est toujours très inférieur à 1%. Des séries comportant peu de cernes comme CAB1.6, CAB1.5, CLI1.30, CLI1.31 et CAB1.11 avec 31 cernes sont néanmoins synchronisées avec une sécurité suffisante

Dans les 7 cas restants, le coefficient de corrélation est élevé pour deux positions concurrentes sur la référence partielle. La position retenue dans la synthèse ne correspond pas au coefficient le plus élevé. Après vérification sur la table lumineuse, ces composantes sont maintenues dans leur position initiale. Le synchronisme présente plus d'accord visuel dans la position associée au deuxième coefficient dans l'ordre décroissant. Il faut remarquer que dans tous les cas, les deux résultats sont assez proches. Dans 4 de ces cas, le coefficient entre la moyenne partielle et la composante est inférieur à 0,5. Les composantes sont donc exclues de la référence homogénéisée par le critère de WIGLEY *et al.* (1984). La composante CAB1.16 est acceptée avec le risque d'erreur le plus élevé. Le coefficient  $r = 0,39$  correspond à une valeur  $t$  s'élevant à 2,81, pour 52 cernes. Le risque associé est inférieur à 3,5 %. Dans 3 cas pour 97 séries, les deux corrélations concurrentes sont supérieures à 0,5. Cependant, pour homogénéiser au mieux la référence, elles sont également retirées.

Les arbres particulièrement affectés par le stress survenu à l'année relative 229, constituant le groupe de corrélation 1.2, sont également testés après élimination des cernes très étroits consécutifs à cette année. A une exception près, le coefficient de corrélation entre la composante coupée et la référence partielle est supérieur à celui obtenu avec la composante intègre. Pour le bois CLI1.35, la coupure n'est pas justifiée. Les cernes sont étroits mais leurs variations restent concordantes avec celles de la population. Dans les autres cas, la période

affectée est retirée.

caractéristiques de la référence partielle					corrélation entre la série testée et la référence					caractéristiques de la référence partielle					corrélation série / réf						
nom ref. partielle	%75	%90	EPS(30)	rmo y	Nb c.	1er rang			2e rang		coupure	nom ref. partielle	%75	%90	EPS(30)	rmo y	Nb c.	1er rang			coupure
						r	t	r	t	r								t	r		
IDE3Cont.85	53	33	0,9995	0,4193	107	0,36	3,95	0,35	3,83		IDE1-2Cont.59	51	34	0,9995	0,4130	116	0,66	9,23			
IDE1-2Cont.51	51	34	0,9995	0,4185	166	0,39	5,39			0,47	CLIICont.43	52	32	0,9995	0,4134	127	0,66	9,66			
IDE3Cont.67	52	33	0,9995	0,4177	96	0,39	3,94	0,37	3,86		IDE1-2Cont.11	52	33	0,9995	0,4132	90	0,67	8,18			
CLIICont.46	52	36	0,9995	0,4155	128	0,39	4,65				IDE1-2Cont.25	51	33	0,9995	0,4136	88	0,67	7,88			
CAB1Cont.16	52	34	0,9995	0,4166	52	0,39	2,99	0,37	2,81		IDE1-2Cont.40	51	33	0,9995	0,4129	82	0,67	7,65			
IDE1-2Cont.55	52	32	0,9995	0,4190	168	0,40	5,57			0,52	IDE1-2Cont.5	52	33	0,9995	0,4133	138	0,67	10,21			0,69
IDE1-2Cont.17	52	33	0,9995	0,4164	148	0,43	5,61				Fed1Cont.1	51	33	0,9995	0,4133	77	0,67	7,40			
CAB1Cont.25	52	33	0,9995	0,4166	73	0,46	4,09	0,44	3,13		IDE1-2Cont.44	51	33	0,9995	0,4127	135	0,68	10,59			
IDE1-2Cont.3	52	34	0,9995	0,4155	146	0,49	6,60			0,49	IDE1-2Cont.52	51	33	0,9995	0,4134	118	0,68	9,83			
IDE1-2Cont.35	53	32	0,9995	0,4163	150	0,51	7,08			0,72	IDE3Cont.84	52	33	0,9995	0,4125	128	0,68	10,26			
CAB1Cont.8	52	34	0,9995	0,4159	69	0,51	4,62				IDE3Cont.70	53	33	0,9995	0,4127	159	0,68	11,33			
IDE1-2Cont.16	51	34	0,9995	0,4159	102	0,53	6,08				CLIICont.37	51	34	0,9995	0,4135	74	0,68	7,48			
IDE4Cont.2	51	33	0,9995	0,4156	82	0,53	5,37	0,46	4,63		IDE4Cont.15	51	33	0,9995	0,4132	92	0,68	8,48			
IDE1-2Cont.B34	53	32	0,9995	0,4148	114	0,53	6,43				CLIICont.38	52	33	0,9995	0,4134	103	0,68	8,99			
CAB1Cont.21	52	33	0,9995	0,4144	102	0,53	5,99				CLIICont.36	51	32	0,9995	0,4134	98	0,68	8,74			
IDE1-2Cont.47	51	33	0,9995	0,4152	97	0,54	6,09				CLIICont.25	51	34	0,9995	0,4134	113	0,68	9,41			
IDE1-2Cont.57	51	34	0,9995	0,4155	156	0,54	7,87			0,65	CLIICont.39	51	34	0,9995	0,4143	207	0,68	12,92			0,73
IDE4Cont.20	52	34	0,9995	0,4145	72	0,54	5,17	0,53	5,05		IDE1-2Cont.9	52	33	0,9995	0,4124	214	0,69	13,82			
IDE1-2Cont.31	52	32	0,9995	0,4152	129	0,55	7,16				CLIICont.27	51	33	0,9995	0,4131	108	0,69	9,56			
IDE1-2Cont.43	53	32	0,9995	0,4145	146	0,55	7,72				IDE1-2Cont.12	51	33	0,9995	0,4132	93	0,70	9,10			
IDE4Cont.4	51	33	0,9995	0,4132	66	0,55	5,06				IDE1-2Cont.27	51	32	0,9995	0,4123	159	0,71	12,55			
CAB1Cont.6	51	34	0,9995	0,4140	40	0,55	3,70				IDE3Cont.83	52	33	0,9995	0,4123	52	0,71	6,66			
CAB1Cont.5	51	33	0,9995	0,4146	57	0,55	4,58				IDE1-2Cont.1	52	33	0,9995	0,4126	109	0,72	10,31			
CAB1Cont.11	51	34	0,9995	0,4167	31	0,55	3,70				IDE1-2Cont.14	51	33	0,9995	0,4130	129	0,72	11,36			
IDE1-2Cont.19	51	34	0,9995	0,4147	140	0,56	7,73			0,6	IDE1-2Cont.37	52	33	0,9995	0,4129	129	0,72	11,28			
IDE1-2Cont.8	52	34	0,9995	0,4154	115	0,56	7,01				IDE1-2Cont.38	51	33	0,9995	0,4126	112	0,72	10,72			
IDE1-2Cont.50	52	33	0,9995	0,4149	136	0,57	7,83			0,79	IDE1-2Cont.48	52	33	0,9995	0,4123	113	0,72	10,65			
IDE1-2Cont.B15	52	33	0,9995	0,4145	109	0,57	7,05				IDE4Cont.19	51	34	0,9995	0,4123	102	0,72	9,99			
CLIICont.30	51	34	0,9995	0,4146	65	0,59	5,56				CLIICont.33	51	34	0,9995	0,4132	140	0,72	12,05			
CLIICont.34	53	33	0,9995	0,4151	192	0,59	9,86				IDE1-2Cont.29	51	34	0,9995	0,4122	101	0,73	10,25			
IDE1-2Cont.32	52	33	0,9995	0,4139	178	0,60	9,79				IDE1-2Cont.49	52	32	0,9995	0,4121	193	0,73	14,34			
IDE1-2Cont.56	52	33	0,9995	0,4147	143	0,60	8,65			0,69	CLIICont.31	51	33	0,9995	0,4120	42	0,73	6,20			
CLIICont.29	52	33	0,9995	0,4138	89	0,60	6,69				CLIICont.33?	51	33	0,9995	0,4130	117	0,73	11,18			
CAB1Cont.7	52	33	0,9995	0,4144	59	0,61	5,48	0,52	4,38		IDE1-2Cont.58	52	33	0,9995	0,4127	136	0,74	12,45			
IDE1-2Cont.21	52	34	0,9995	0,4130	167	0,62	9,92				IDE1-2Cont.36	52	33	0,9995	0,4127	96	0,74	10,19			
IDE1-2Cont.7	51	33	0,9995	0,4138	170	0,62	9,95			0,66	CLIICont.28	51	33	0,9995	0,4118	136	0,74	12,38			
CLIICont.35	51	34	0,9995	0,4146	134	0,62	8,89			0,62	IDE1-2Cont.18	51	33	0,9995	0,4124	115	0,75	11,51			
IDE1-2Cont.20	51	33	0,9995	0,4143	78	0,63	6,71				IDE4Cont.3	51	34	0,9995	0,4121	90	0,75	10,27			
IDE1-2Cont.42a	51	34	0,9995	0,4136	170	0,63	10,38				CLIICont.40	51	33	0,9995	0,4122	74	0,75	8,95			
IDE3Cont.41	52	33	0,9995	0,4139	96	0,63	7,65				CLIICont.24	52	33	0,9995	0,4121	121	0,75	11,86			
IDE4Cont.17	51	33	0,9995	0,4141	118	0,63	8,52				IDE1-2Cont.4	51	32	0,9995	0,4114	129	0,77	13,48			
IDE1-2Cont.B33	52	33	0,9995	0,4139	80	0,63	6,91				IDE1-2Cont.60	51	33	0,9995	0,4125	120	0,77	12,59			
IDE1-2Cont.10	51	33	0,9995	0,4131	164	0,64	10,51				IDE1-2Cont.62	51	33	0,9995	0,4106	181	0,77	15,96			
IDE1-2Cont.28	51	33	0,9995	0,4145	121	0,64	8,84				IDE1-2Cont.2	51	33	0,9995	0,4110	152	0,78	14,77			
IDE1-2Cont.30	52	33	0,9995	0,4131	69	0,64	6,58				IDE1-2Cont.13	52	33	0,9995	0,4118	115	0,79	13,42			
IDE3Cont.80	51	34	0,9995	0,4130	93	0,64	7,64				IDE1-2Cont.24	51	33	0,9995	0,4120	89	0,79	11,45			
IDE4Cont.21	51	33	0,9995	0,4142	139	0,64	9,53			0,69	IDE1-2Cont.42b	51	33	0,9995	0,4111	68	0,81	10,65			
IDE4Cont.22	51	34	0,9995	0,4144	202	0,64	11,52				Brière-Ref3	51	33	0,9995	0,4138						
											Brière-Ref4	57	41	0,9995	0,4802						

Tableau 45 : homogénéisation de Brière-Ref3

La corrélation des deux individus, IDE2.50 et IDE1.35 avec leur chronologie de contrôle respective augmente aussi fortement après la suppression de leur période de jeunesse particulière.

Après ces coupures, le critère de WIGLEY (*et al.* 1984) a pour conséquence l'exclure de 8 séries. Des 97 intégrées à la référence, 11 séries au total sont donc éliminées. Ce résultat nous semble le plus clairement démontrer que le synchronisme entre les croissances des mortas de Brière est de très bonne qualité.

La chronologie moyenne obtenue, Brière-Ref4, présente des caractéristiques d'homogénéité améliorées par rapport à celles de Brière-Ref3 pour une représentativité statistique identique. Par ailleurs, ces caractéristiques varient très peu entre les différentes chronologies moyennes de contrôle. L'exclusion d'une série a, en effet, peu de répercussion

---

sur ces paramètres calculés avec les 96 autres. On note toutefois une légère augmentation de la corrélation moyenne entre les composantes des chronologies partielles qui concorde avec la baisse de la corrélation individuelle entre la composante exclue et sa moyenne partielle. Cependant, cette variation intéressant la troisième décimale n'a aucune répercussion sur le calcul de l'EPS.

La stabilité de ces paramètres et la corrélation élevée entre une série isolée et la synthèse des 96 autres tend à démontrer que la moyenne est bien représentative de la croissance de tout le lot.

### 3.2 Méthode d'ordination de la matrice de corrélation

D'une façon générale, le principe de l'homogénéisation est de comparer une à une les séries à l'ensemble des autres. Un estimateur du lien entre l'individu et l'ensemble l'excluant permet de juger de son niveau de participation à la qualité du signal et sert de critère de sélection.

Dans la méthode qui consiste à exclure une composante de la chronologie moyenne pour la tester, le critère de choix repose sur le coefficient de corrélation. Il nous est apparu utile, dans le cas d'arbres jeunes, de tenir compte du nombre de cernes, car une corrélation élevée peut être peu significative si elle porte sur peu de cernes. Si la valeur de Student associée à la corrélation ne correspond pas à un risque d'erreur inférieur à 1%, la série est exclue.

La matrice des coefficients de corrélation entre séries individuelles permet également d'estimer le lien entre une série et toutes les autres. Une colonne, ou une ligne, de la matrice contient les corrélations significatives entre une série et toutes celles qui la chevauchent suffisamment. Les séries qui présentent le synchronisme le plus fort avec l'ensemble des autres peuvent être jugées comme porteuses d'une plus grande part du signal commun. Pour opérer une sélection, il est donc envisageable de classer les séries en fonction de cette estimation et de définir un seuil.

Dans ce cas, le coefficient de corrélation ne peut pas être utilisé directement dans le calcul de l'estimation. En effet, le calcul réalisé entre les séries individuelles implique que le nombre de cernes considérés est très variable. Le classement des séries en fonction de leur synchronisme avec toutes les autres avant de définir le seuil suppose également que cet ordre est le moins dépendant possible d'autres facteurs comme le nombre de cernes ou le nombre de valeurs dans une colonne. Dans un premier temps, nous avons utilisé comme estimation la moyenne des coefficients de corrélation et celle des valeurs de Fisher, préconisées pour réaliser des moyennes de corrélations (JANSMA 1996, THOMAS 1976), mais l'ordre s'est toujours avéré fonction du nombre de cernes. Une série qui comporte peu de cernes est souvent intégrée à une référence, car elle corrèle fortement avec quelques autres. Toutefois, ces quelques corrélations, même élevées, apportent peu d'information pour le groupe en général.

L'estimation du synchronisme entre une série et toutes les autres a donc été basée sur les valeurs  $t$  de Student qui tiennent compte du nombre de cernes de chevauchement. Nous avons observé que dans un cas général, la distribution des valeurs  $t$  peut être considérée asymétrique. La médiane, préconisée comme paramètre de position des distributions asymétriques (THOMAS 1976, ZAR 1996) a donc été préférée à la moyenne des valeurs  $t$  de

la colonne.

En fait, les deux paramètres sont très liés et l'ordre obtenu à partir de l'un ou l'autre est similaire (fig. 101). Ceci tend à montrer que, par colonne également, les distributions de valeurs t ne sont pas très asymétriques.

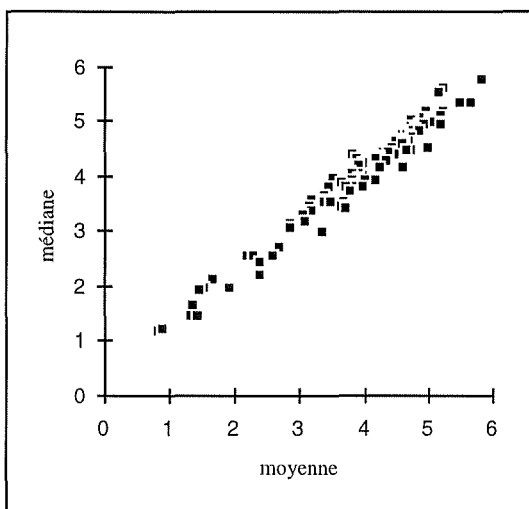


Figure 101 : relation entre médiane et moyenne par colonne de la matrice de valeurs t de Student obtenue avec les composantes de Brière-Ref3

La matrice de valeurs t obtenue entre les séries de Brière-Ref3 qui chevauchent d'au moins 30 cernes est donc ordonnée en fonction des valeurs décroissantes de la médiane par colonne et ligne. L'ordre obtenu ne dépend pas du nombre de valeurs t sur lequel porte le calcul de la médiane (fig. 102A). Il est également indépendant du nombre de cernes que comporte la série (fig. 102B).

La représentation de la matrice montre les valeurs t pour toutes les paires ordonnées (fig. 103). La qualité du synchronisme va en diminuant en suivant la diagonale. La répartition des valeurs présente cependant une discontinuité qui concerne les 8 jeunes arbres de Cabéno et 4 séries également pauvres en cernes d'Ile d'Errand. Ces séries sont intégrées à la référence mais leur valeur statistique par rapport au groupe est faible. La matrice ne présente pas d'autre discontinuité importante.

Si les séries sont effectivement triées en fonction de leurs relations avec toutes les autres, on peut penser que l'ordre permet de sélectionner celles qui portent le plus d'information commune au lot.

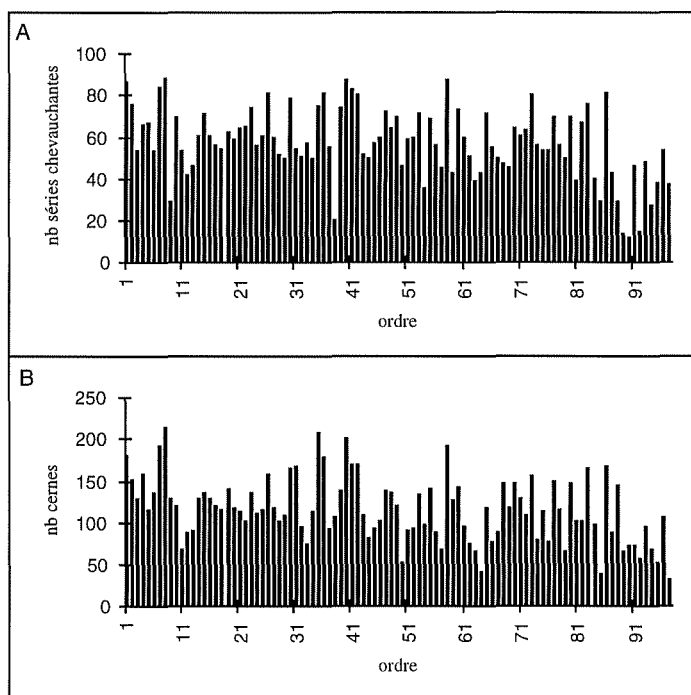


Figure 102 : relation entre l'ordre des séries et le nombre de valeurs dans la colonne de la matrice (A) et en fonction du nombre de cernes (B)

La corrélation moyenne entre les séries sert d'estimateur du signal commun aux arbres (BRIFFA et JONES 1990). Si les composantes de Brière-Ref3 sont intégrées une par une dans l'ordre défini précédemment, cette corrélation diminue progressivement. La référence est de plus en plus dispersée.

L'EPS permet de relativiser cette estimation du signal commun et le bruit en fonction du nombre d'échantillons (BRIFFA et JONES 1990) (cf. chap. 1). Elle permet ainsi d'estimer si l'échantillon de N arbres est statistiquement représentatif de la croissance de la population

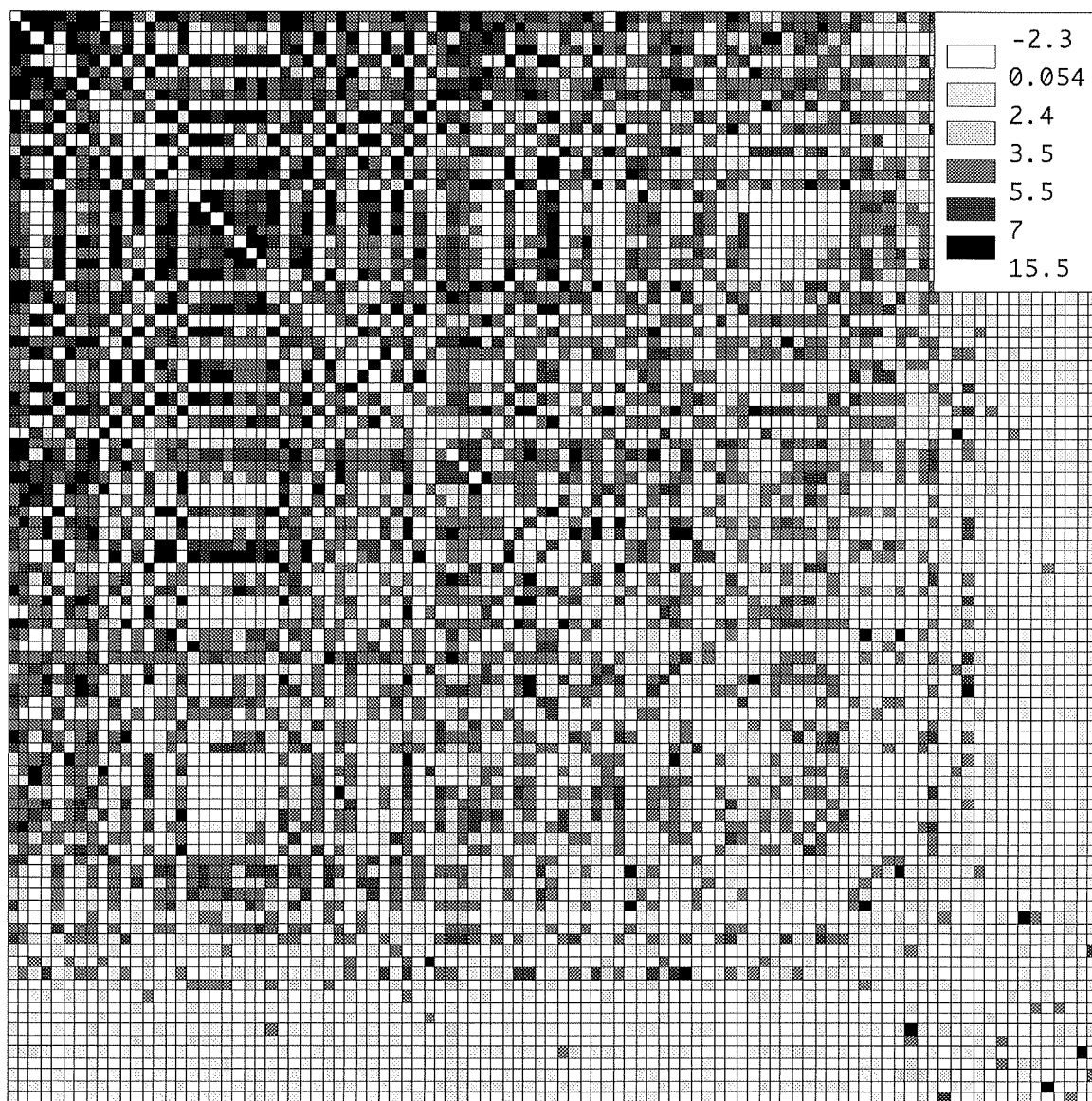


Figure 103 : matrice de valeurs *t* de Student entre les composantes de Brière-Ref3 ordonnée par la médiane des lignes et des colonnes

dont il est issu. La valeur de l'EPS tend rapidement vers 1 lorsque les séries sont intégrées dans l'ordre défini (fig. 104). Elle est supérieure à 0,85, valeur que WIGLEY *et al.* (1984) présentent comme un seuil, pour 4 arbres. A la 15ème composante, sa valeur est de 0,95. La première moitié environ des composantes permet d'obtenir une valeur de 0,98 pour une corrélation moyenne de 0,54 alors que la seconde moitié des séries ordonnées ne fait progresser l'EPS que de 0,01 et induit une perte de 0,14 de la corrélation. Même très faible après intégration des dernières composantes, l'EPS progresse tout au long de la constitution de la référence. La perte en corrélation moyenne est compensée par l'apport de l'individu supplémentaire. De ce fait, chaque composante permet d'améliorer la représentativité de la chronologie moyenne. Il faut noter que cette progression de l'EPS est fonction de l'homogénéité du lot et peut être un outil pour détecter les séries mal synchronisées. La progression est rapide lorsque les séries corrélaient fortement. Une régression de l'EPS signifie que la composante intégrée dégrade la représentativité de la chronologie moyenne.

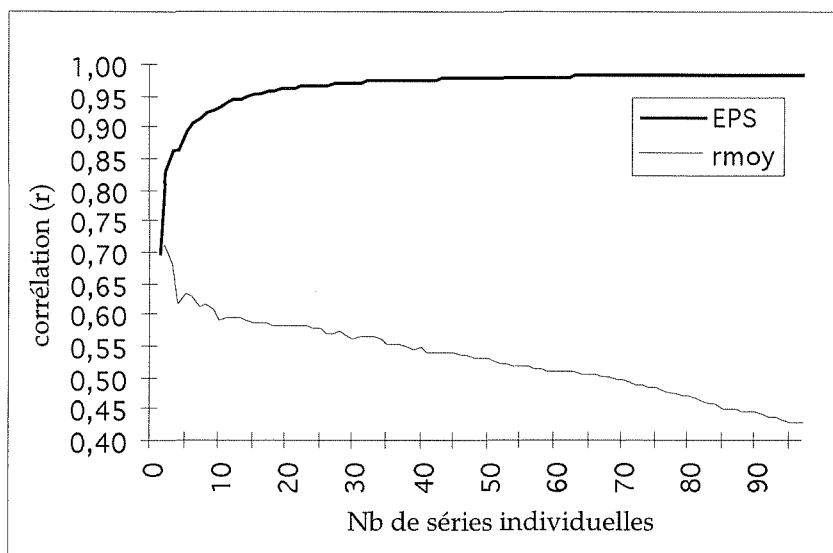


Figure 104 : évolution de la corrélation moyenne et de l'EPS en fonction du nombre de séries individuelles intégrées à Brière-Ref3

La référence Brière-Ref3 est donc statistiquement très représentative des conditions de croissance auxquelles les arbres ont été soumis. On remarque qu'une représentativité de très bonne qualité est obtenue avec environ la moitié des échantillons analysés. 15 arbres dont la croissance est très homogène et très synchrone avec celle de tous les autres constitueraient un groupe statistiquement suffisant. Les arbres ordonnés permettent d'obtenir la chronologie moyenne présentant les meilleures caractéristiques d'homogénéité pour une représentation donnée, et consécutivement de résumer au mieux l'ensemble analysé. Toutefois, cette représentativité est calculée ici pour toute la période d'étude. Le calcul de l'EPS en fonction du temps est nécessaire pour déterminer plus précisément si certaines périodes de la chronologie ne sont pas sous-échantillonnées (cf. 6.3).

La méthode de vérification de la constitution des chronologies moyennes et de sélection des séries développée ici relève donc d'un point de vue opposé à celle de l'exclusion des composantes utilisée par JANSMA (1996). Dans un cas, les éléments qui dispersent le groupe sont extraits alors que dans l'autre, le groupe le plus homogène possible pour une représentativité donnée est constitué. Dans les faits, l'intégration progressive des composantes permet d'obtenir des chronologies dont l'EPS va en augmentant vers 1. Plusieurs "stades" peuvent donc être testés par la datation et permettent de mesurer l'effet de la sélection des séries sur l'information régionale présente dans le signal.

## 4 Datation des chronologies brièronnes

### 4.1 Datation de la référence totale Brière-Ref3

#### 4.1.1 Résultats en valeurs brutes

La chronologie Brière-Ref3 est comparée aux référentiels déjà décrits. Le test de Eckstein est appliqué après transformation en suites de pentes des séries de valeurs brutes (cf. chap. 1). Dans toutes les positions de chevauchement où le pourcentage de concordance des pentes (Gleichläufigkeit) est supérieur à 50, le coefficient W est positif. Toutes ces valeurs pour la période entre -1500 et -700 sont représentées sur un graphique en fonction du temps pour chaque référentiel. Les étalons qui présentent une redondance parce que l'un est une composante de l'autre sont représentés associés. L'axe des ordonnées d'un des deux est inversé. Sur cette représentation la date est d'une qualité d'autant meilleure que les barres qui lui correspondent forment une ligne qui traverse le graphique. Les propositions concurrentes ainsi que la réplication sur les diverses références apparaissent également sans perte

d'information comme dans le cas de la figure en classes de résultats classiquement produite par notre laboratoire (cf. chap. 1). Il est possible de juger pleinement avec quelle qualité les valeurs retenues se singularisent des autres. La représentation des valeurs faibles montre également d'éventuelles influences sur la répartition dans le temps des valeurs liées aux méthodes de standardisation (YAMAGUCHI 1986).

Les graphiques de la datation de Brière-Ref3 ne présentent pas de valeurs qui se dégagent nettement des autres quel que soit l'étalon considéré (fig. 105). A la position de chevauchement correspondant à une date du dernier cerne mesuré de -978, des coefficients

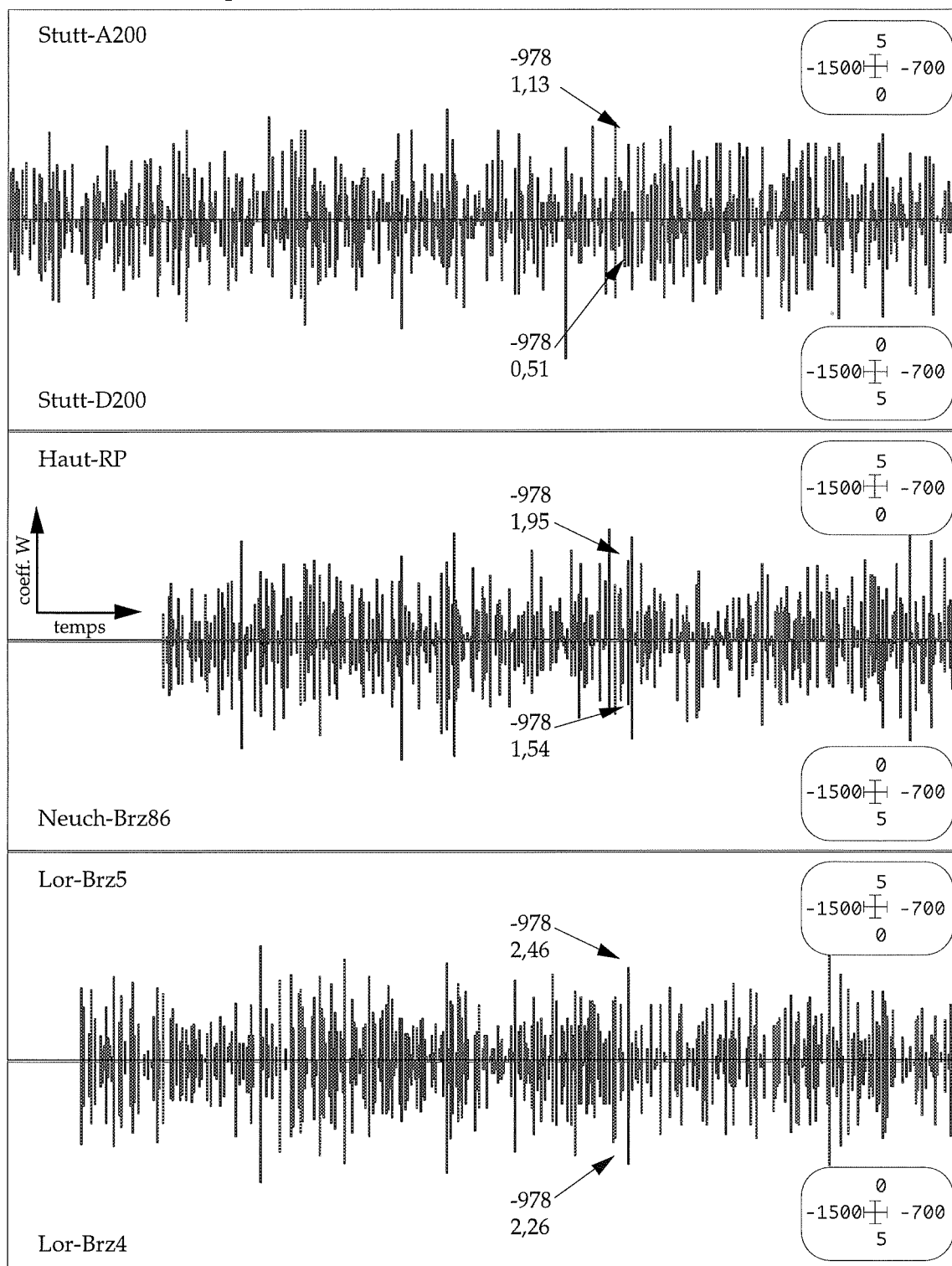


Figure 105 : résultats de datation (coefficient W, valeurs brutes) de Brière-Ref3 sur les références de Stuttgart, Neuchâtel et Lorraine

W parmi les plus élevés coïncident sur les différentes références. Sur les références de Lorraine, les coefficients considérés viennent en troisième position. Même s'il n'y a pas d'autre position où la réplique sur les références engage des valeurs aussi élevées, les coefficients retenus, compris entre 2,46 et 0,51 ne permettent pas de considérer la date acquise.

#### 4.1.2 Résultats en indices de Hollstein

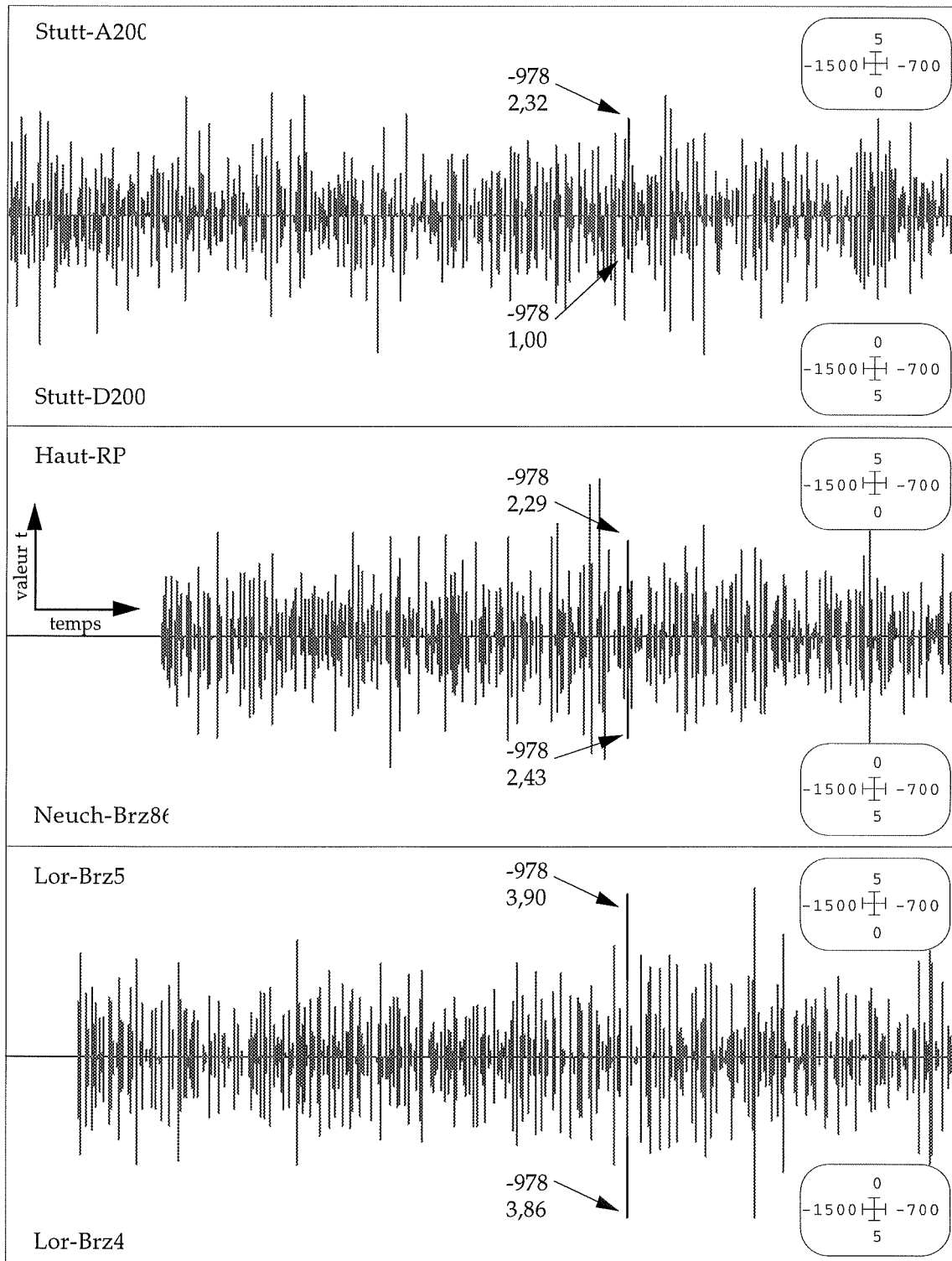


Figure 106 : résultats de datation (valeur t, indices H) Brière-Ref3 sur les références de Stuttgart, Neuchâtel et Lorraine

Les séries sont standardisées en indices de Hollstein (cf. chap. 1). Le coefficient de corrélation et sa valeur t de Student associée sont calculés entre la chronologie et les



référentiels pour toutes les positions de chevauchement possibles. Les résultats supérieurs à 0 sont présentés dans les mêmes conditions que précédemment.

Aucune valeur ne se dégage sans équivoque quelle que soit la référence (fig. 106). Les valeurs les plus élevées sont observées entre Brière-Ref3 et les références lorraines. Elles correspondent à la date du dernier cerne de -978. S'élevant à 3,90 et 3,86, elles sont fortement concurrencées par les secondes propositions respectives 3,88 et 3,84. A cette date, la

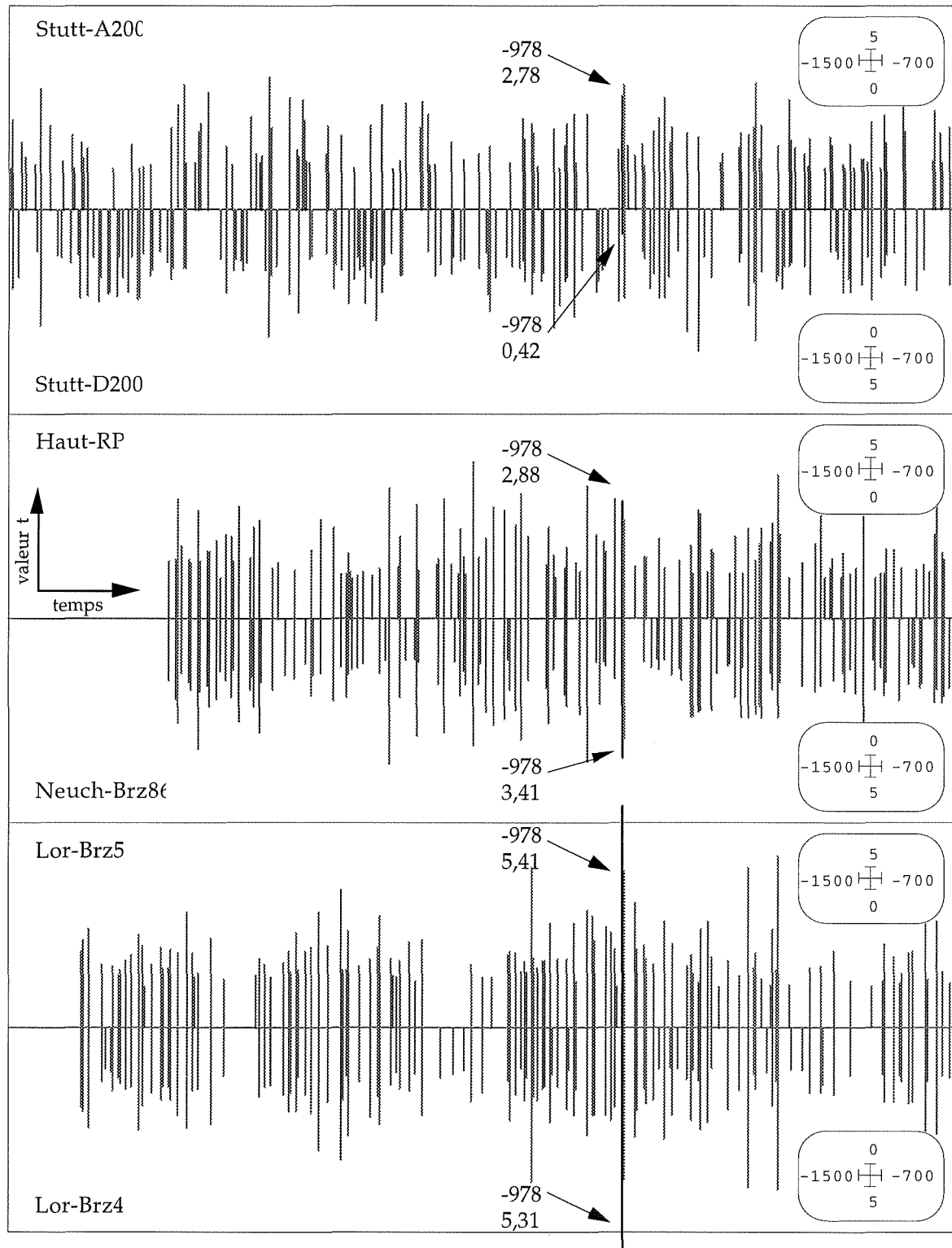


Figure 107 : résultats de datation (valeur t, indices E) Brière-Ref3 sur les références de Stuttgart, Neuchâtel et Lorraine

---

réplication met en jeu des valeurs de Student faibles, comprises entre 2,29 et 2,43 qui se dégagent très imparfaitement du reste des propositions. Le référentiel Stutt-D200 livre le coefficient le plus faible.

La standardisation permet, à la date correspondant à une hypothèse en données brutes, d'obtenir une qualité de synchronisme supérieure mais qui reste insuffisante pour considérer le résultat acquis.

#### 4.1.3 Résultats en indices Except

La série et les références sont utilisées standardisées en indices Except (cf. chap. 1). Le coefficient de corrélation et la valeur t de Student sont calculés dans toutes les positions possibles de chevauchement entre les étalons et la chronologie. Les valeurs t supérieures à 0 sont représentées graphiquement, comme précédemment, pour la période comprise entre -1500 et -700.

Ces valeurs sont supérieures à 5 et se dégagent des autres propositions sur les deux versions de la référence lorraine (fig. 107). La réplication sur les références de Neuchâtel et Stuttgart reste de qualité médiocre. La date du dernier cerne de la chronologie correspondant à cette position est toujours -978. Les valeurs mises en jeu sur les références suisses et allemandes sont faibles, comprises entre 2,28 et 3,41. Elles sont cependant, au mieux, au 3ème rang et au pire au 6ème rang des propositions. L'étalon Stutt-D200 fait exception avec une valeur t qui reste très faible (0,42).

La standardisation est plus profitable et permet d'obtenir des coefficients plus élevés. Le synchronisme entre Lor-Brz et Brière-Ref3 est significatif par rapport aux conditions de calculs (cf. *infra*). Il permet d'identifier sans équivoque la date de -978 et conforte l'hypothèse énoncée dans les autres procédures grâce à la coïncidence sur toutes les références (sauf Stutt-D200) de coefficients non significatifs mais parmi les plus élevés de la liste.

#### 4.1.4 Interprétations

La standardisation est nécessaire pour dégager une part de signal commune aux références et à la chronologie à dater. Le résultat n'est significatif que dans une seule procédure de calcul, avec la référence Lor-Brz. Cette référence est la plus proche sur le plan biogéographique. Malgré l'éloignement géographique, on peut supposer qu'elle est celle qui représente au mieux, en fonction de l'avancement de la construction des chronologies, les conditions régionales de croissance des arbres issus de la Brière. A l'inverse, les références représentatives de conditions de croissance plus éloignées de la zone atlantique ne sont pas suffisamment synchrones pour assurer que les cernes comparés sont contemporains. C'est particulièrement le cas de Stutt-D200, la plus continentale des références disponibles.

La chronologie datée présente des caractéristiques statistiques proches de celles utilisées par BECKER (*et al.* 1985) pour dater des séries issues de zones biogéographiques très différentes. Des séquences de 400 cernes du référentiel de Stuttgart dont la couverture moyenne par an est supérieure à 30 séries peuvent être significativement synchronisées avec des séquences équivalentes du référentiel d'irlandais de BAILLIE et PILCHER (PILCHER *et al.* 1984).

Cependant, le lien statistique entre les croissances des chênes des régions

biogéographiques atlantique et médio-continentale, dans notre expérience, n'est pas directement démontré. Le synchronisme entre les croissances suit le gradient principal de diversité biogéographique. Les sites "intermédiaires" de Lorraine permettent d'assurer le lien entre toutes les croissances régionales. Cette situation a déjà été observée dans l'établissement d'autres chronologies tel l'étalon historique de Bourgogne (LAMBERT et LAVIER 1992).

Ces résultats sont obtenus en utilisant tous les individus interdatés sur le site, ce qui est la démarche classique en dendrochronologie. Dans un second temps, on peut se demander si Brière-ref3 est bien la meilleure représentation de l'influence des facteurs régionaux de la zone biogéographique de la basse vallée de la Loire sur la croissance des chênes de la Brière. Cette référence présente, en effet, les meilleures caractéristiques en terme de quantité d'information mais elle peut être homogénéisée, donc améliorée.

Les chronologies Brière-Ref4, Brière-Ref9 et Brière-Ref10 sont obtenues en sélectionnant les séries les plus synchronisées avec l'ensemble des autres. Brière-ref4 est obtenue par exclusion, une à une, des composantes ; Brière-Ref9 et Ref10 correspondent à la sélection des composantes qui résument le mieux le lot avec une EPS respectivement égale à 0,97 et 0,95, soit 30 et 15 séries individuelles.

La qualité de la datation sur les références éloignées peut être jugée fonction de la part du signal attribuable aux facteurs régionaux et globaux. La qualité de la datation des moyennes homogénéisées permet donc de montrer l'effet de la sélection des séries sur l'information régionale et globale portée par les chronologies moyennes.

## 4.2 Datation des références homogénéisées Brière-Ref4, Ref9 et Ref10

### 4.2.1 Description des moyennes

	Brière-Ref3	Brière-Ref4	Brière-Ref9	BrièreRef10
origine	-1358	-1358	-1303	-1303
terme	-978	-985	-999	-999
Nb éch.	97	86	30	15
Nb cerne	381	358	305	305
âge moy	116	118	128	122
Nb c/an	30	28	13	6
C. moy	162	163	155	151
E. typ	76	68	78	85
r1	0,83	0,83	0,85	0,85
r2	0,68	0,67	0,72	0,72
%75	51	51	58	63
%90	33	41	45	54
rmoy	0,413	0,48	0,543	0,588
EPS	0,999	0,999	0,981	0,955

Tableau 46 : caractéristiques des chronologies moyennes homogénéisées

Les chronologies moyennes homogénéisées ont, par construction, des taux d'années caractéristiques, ainsi qu'une corrélation moyenne entre les composantes, plus élevés que la référence complète (tab. 46). Les séries sélectionnées pour Brière-Ref9 et Ref10 se répartissent bien dans la période couverte par la chronologie complète, la perte est limitée à 74 cernes.

La date du dernier cerne équivalente de celle de -978 pour Brière-Ref3 est -985 dans le cas de Brière-Ref4 et -999 pour Brière-Ref9 et Ref10. Ces décalages sont liés à la perte lors de l'homogénéisation des séries qui constituent l'extrémité de la chronologie complète.

L'homogénéisation se traduit pour Brière-Ref9 et Ref10 par une augmentation de la

---

variance ; cependant, l'autocorrélation reste identique. En valeurs brutes, la tendance explique une très grande part de cette variance.

#### 4.2.2 Résultats en valeurs brutes

Les figures respectives (fig. 108, 109, 110) montrent qu'aucun coefficient W entre ces chronologies et les références ne se dégage nettement des autres propositions. Aux dates équivalentes de -978 pour Brière-Ref3, les coefficients se répliquent sur toutes les références mais avec des valeurs qui sont faibles, comprises entre 1,55 et 3,71. Les datations ne sont pas significatives (cf. *infra*).

Les coefficients obtenus entre les moyennes homogénéisées et les références sont cependant légèrement supérieurs à ceux observés avec Brière-Ref3. Le coefficient est le plus élevé entre Haut-RP et Brière-Ref10. S'élevant à 3,71, il se dégage du reste des valeurs (fig. 110). Les coefficients sont en général plus élevés avec Brière-Ref10 qu'avec les 3 autres chronologies. Le rang de la proposition dans une liste décroissante est soit le premier, soit le deuxième. Stutt-D200 fait exception et, pour toutes les comparaisons, livre les valeurs les plus faibles. Le synchronisme entre Brière-Ref10 et les références est de meilleure qualité qu'avec les autres moyennes mais reste très insuffisant pour que la datation soit considérée acquise.

#### 4.2.3 Résultats en indices de Hollstein

Comme précédemment, en utilisant les séries standardisées en indices de Hollstein, aucune valeur t de Student exceptionnelle ne se dégage très nettement des autres calculs (fig.111 à 113).

Aux dates équivalentes de -978 pour la chronologie Brière-Ref3, les valeurs t observées entre les séries homogénéisées et les références, sauf Stutt-D200, sont parmi les 3 premières classées dans l'ordre décroissant. Toujours exception faite de la référence Stutt-D200, ces valeurs sont comprises entre 4,41 et 2,87. Certaines sont significatives vis-à-vis des conditions de calculs (tab. 48), mais la plupart restent associées à des risques supérieurs au seuil de 0,5% particulièrement si les caractéristiques de distribution sont prises en compte (cf. *infra*). Le synchronisme est significatif entre Haut-RP et Brière-Ref9 et Ref10 (fig. 112 -113). Entre Lor-Brz5 et Brière-Ref4, la valeur t s'élève à 3,92 et la proposition se dégage des autres positions de chevauchement avec un risque proche du seuil de 7% (fig. 111). Mais d'une façon plus générale la valeur t dans la position correspondant à la date de -978, est fortement concurrencée par quelques autres propositions. C'est le cas des datations sur Stutt-A200 (fig. 111 à 113). Cependant, la répllication sur les différentes références concerne des valeurs t assez élevées, placées dans les 3 premières valeurs, uniquement aux positions correspondantes à la date de -978.

La standardisation permet donc de dégager un synchronisme entre les chronologies à dater et les références de qualité supérieure à celle observée avec les valeurs brutes mais les valeurs t restent, d'une façon générale, trop faibles pour considérer la date acquise.

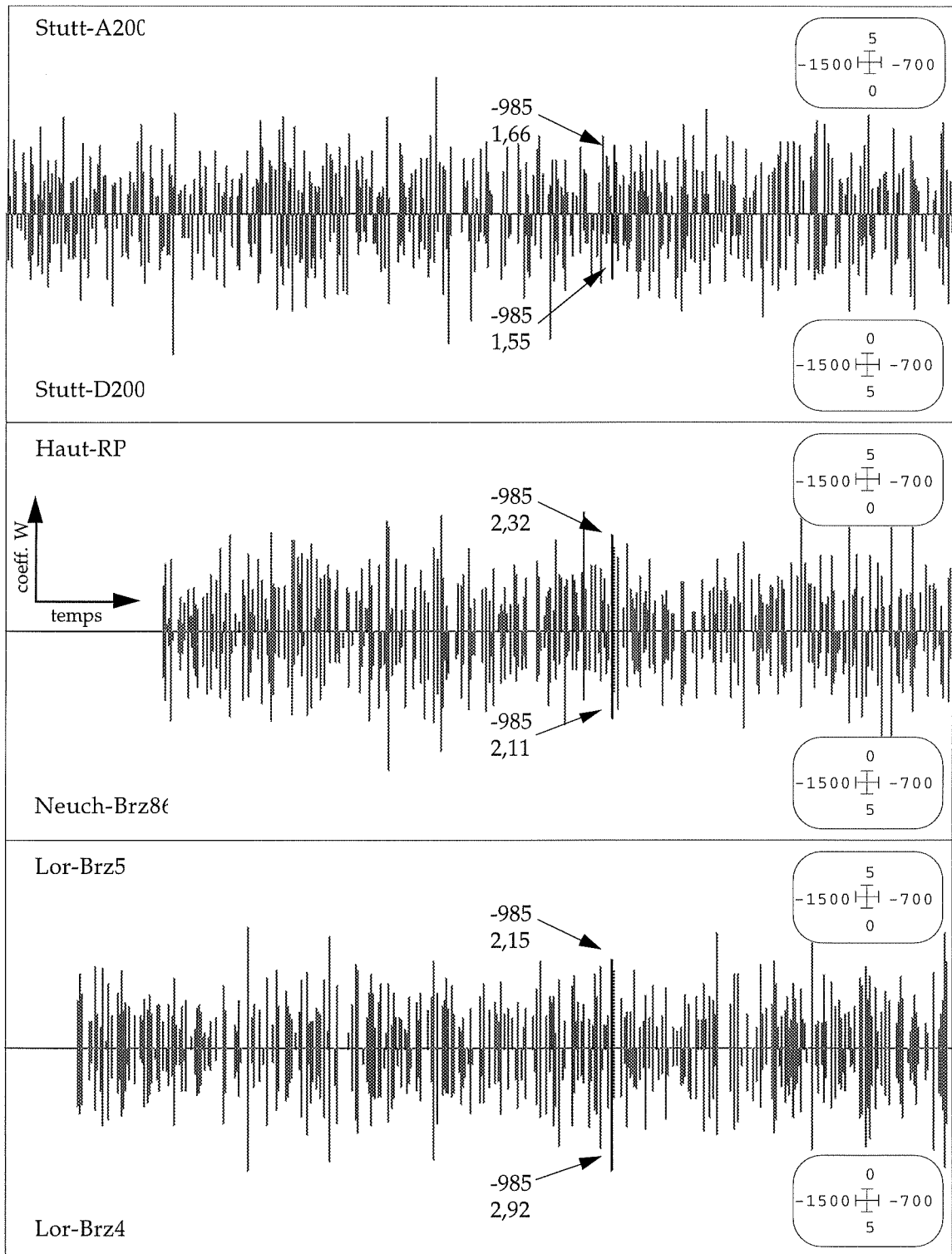


Figure 108 : résultats de datation (coefficient W, valeurs brutes) de Brière-Ref4 sur les références de Stuttgart, Neuchâtel et Lorraine

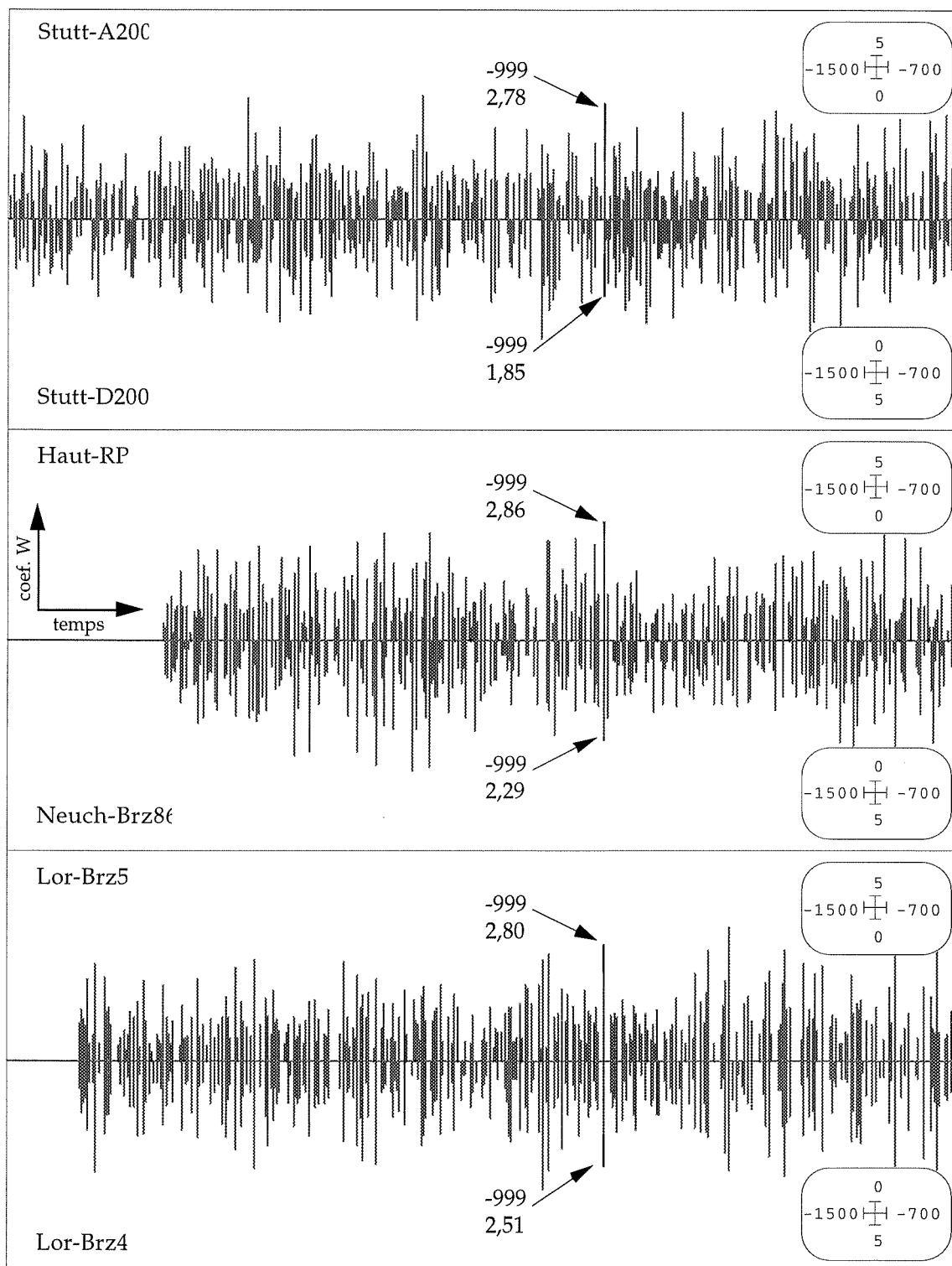


Figure 109 : résultats de datation (coefficient W, valeurs brutes) de Brière-Ref9 sur les références de Stuttgart, Neuchâtel et Lorraine

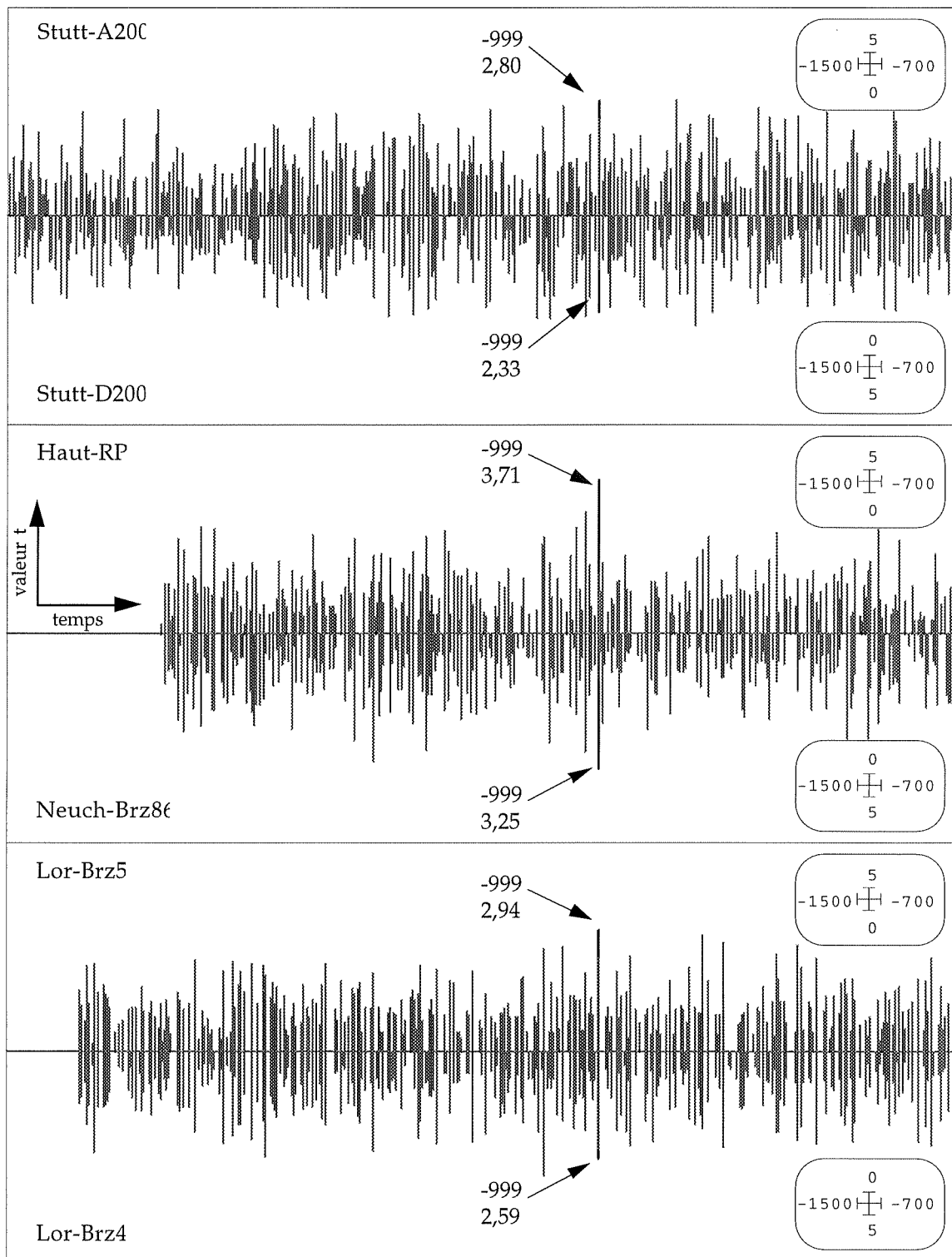


Figure 110 : résultats de datation (coefficient W, valeurs brutes) de Brière-Ref10 sur les références de Stuttgart, Neuchâtel et Lorraine

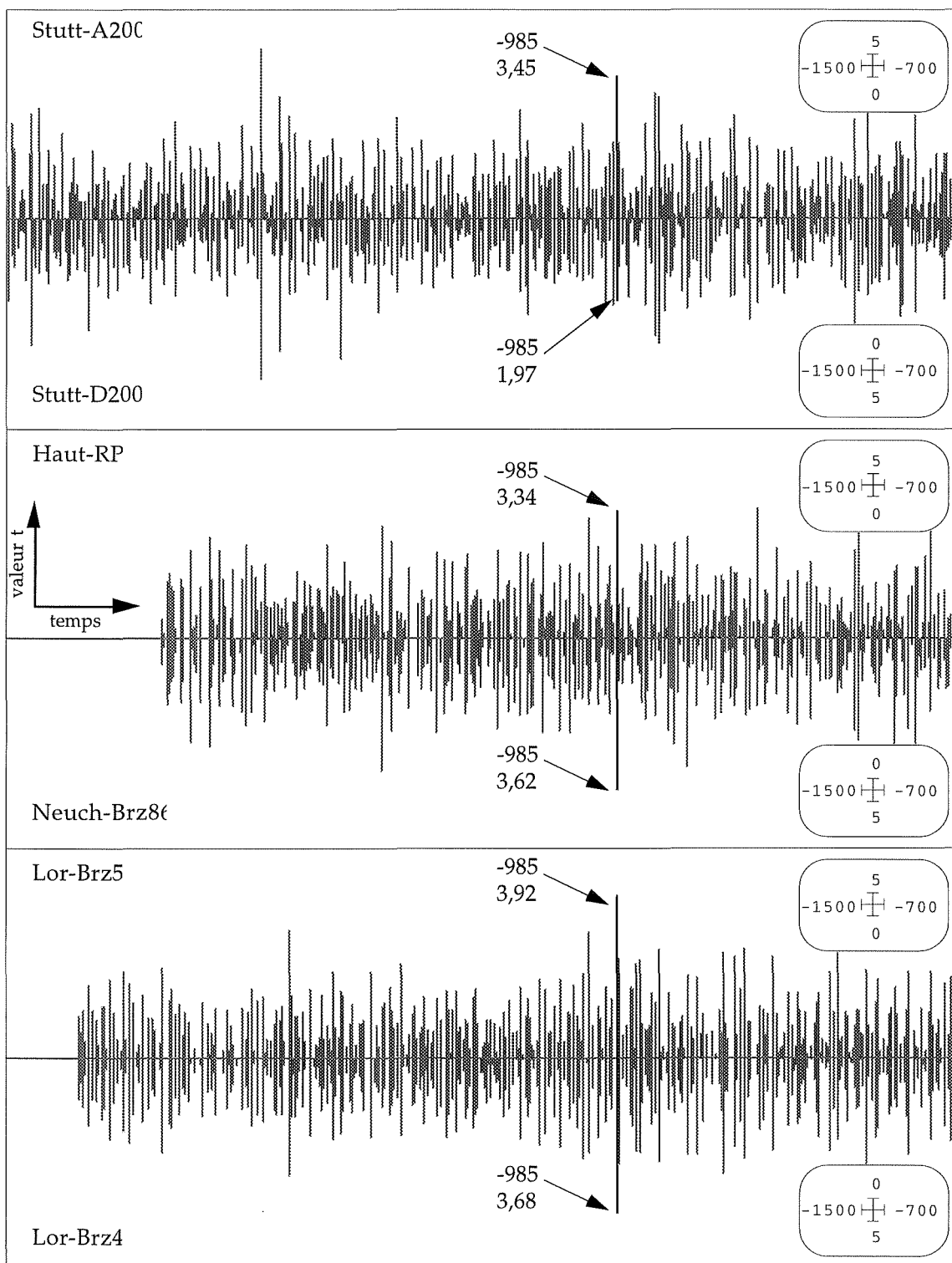


Figure 111 : résultats de datation (valeur t, indices H) de Brière-Ref4 sur les références de Stuttgart, Neuchâtel et Lorraine



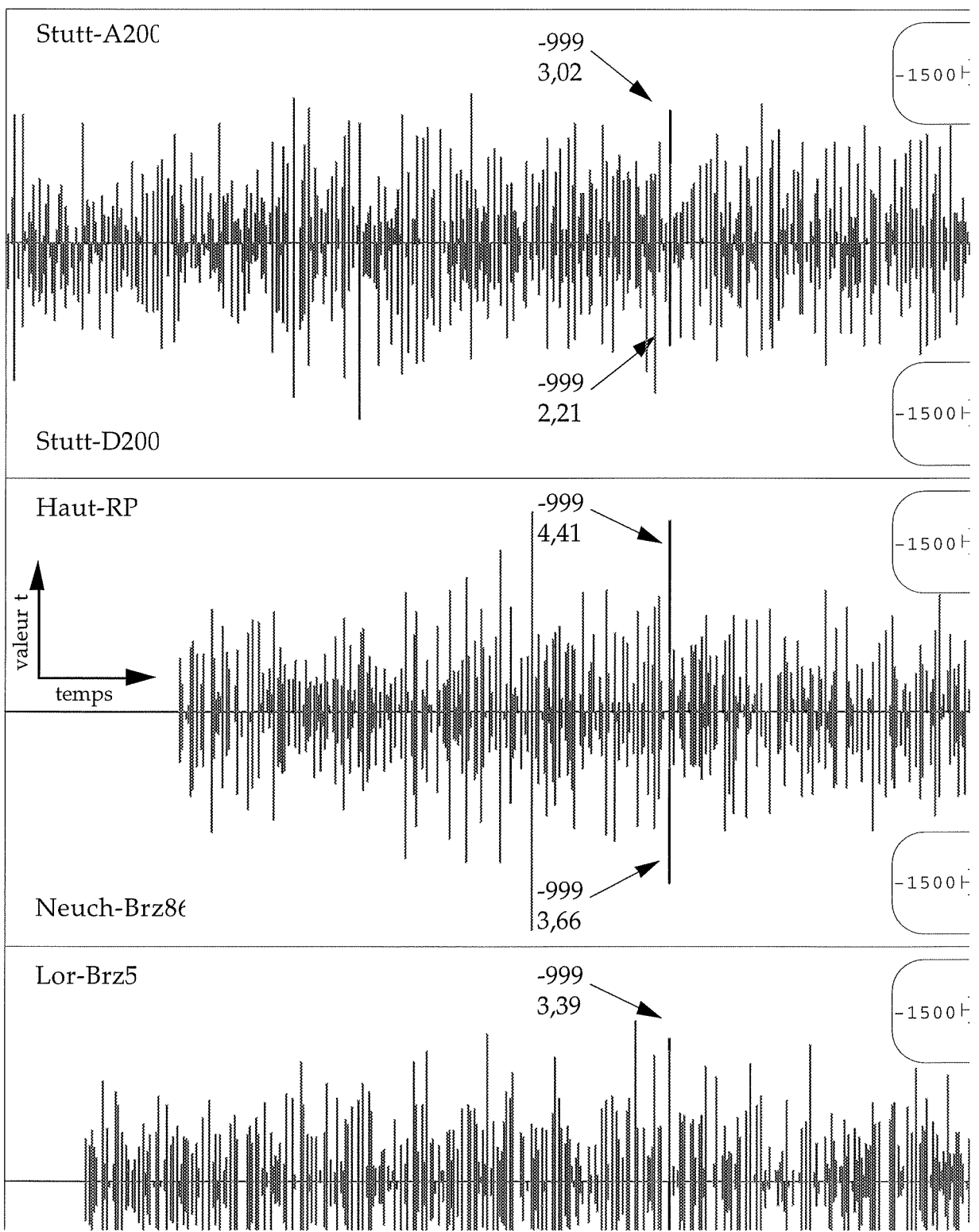


Figure 112 : résultats de datation (valeur t, indices H) de Brière-Ref9 sur les références de Stuttgart, Neuchâtel et Lorraine

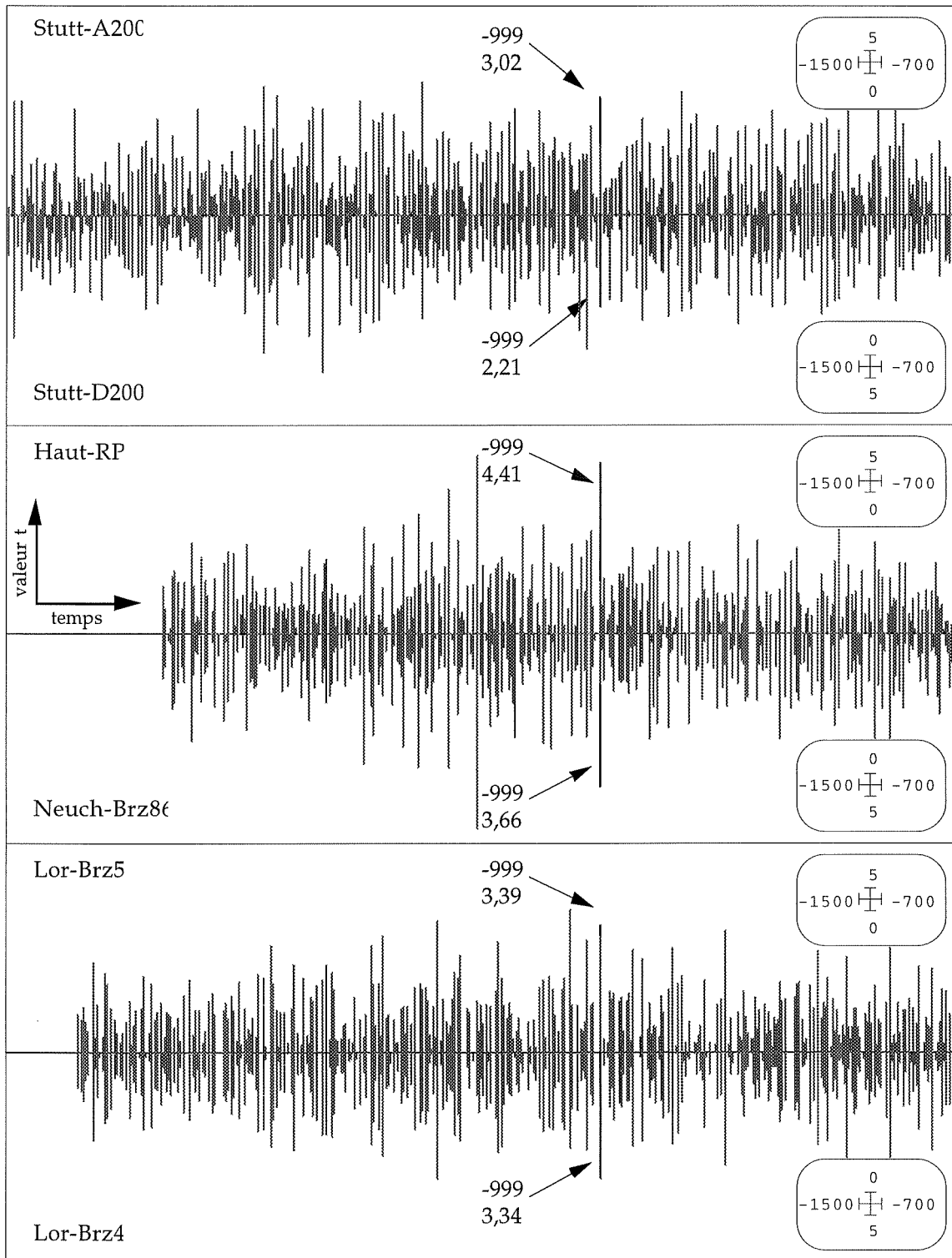


Figure 113 : résultats de datation (valeur  $t$ , indices  $H$ ) de Brière-Ref10 sur les références de Stuttgart, Neuchâtel et Lorraine

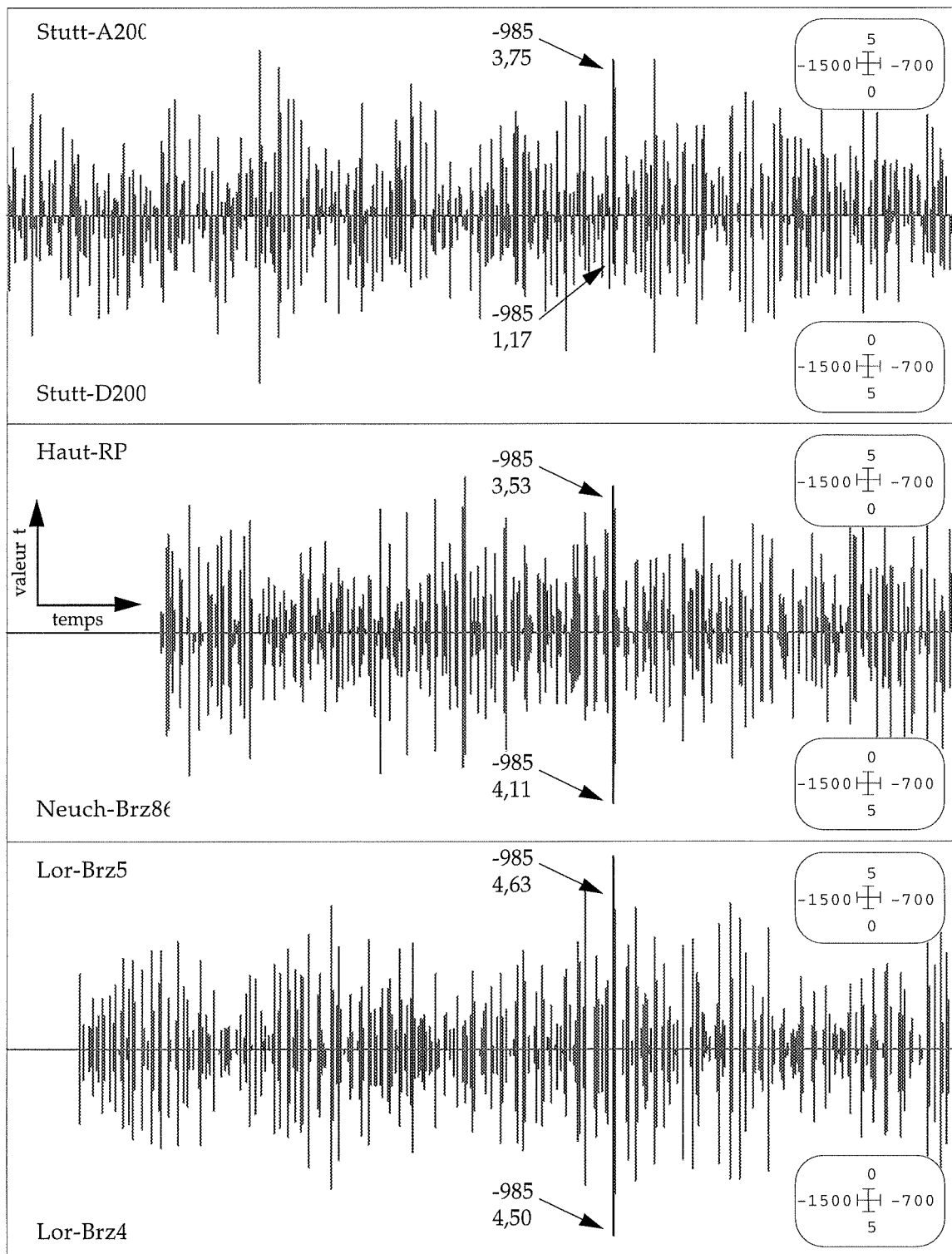


Figure 114 : résultats de datation (valeur t, indices E) de Brière-Ref4 sur les références de Stuttgart, Neuchâtel et Lorraine

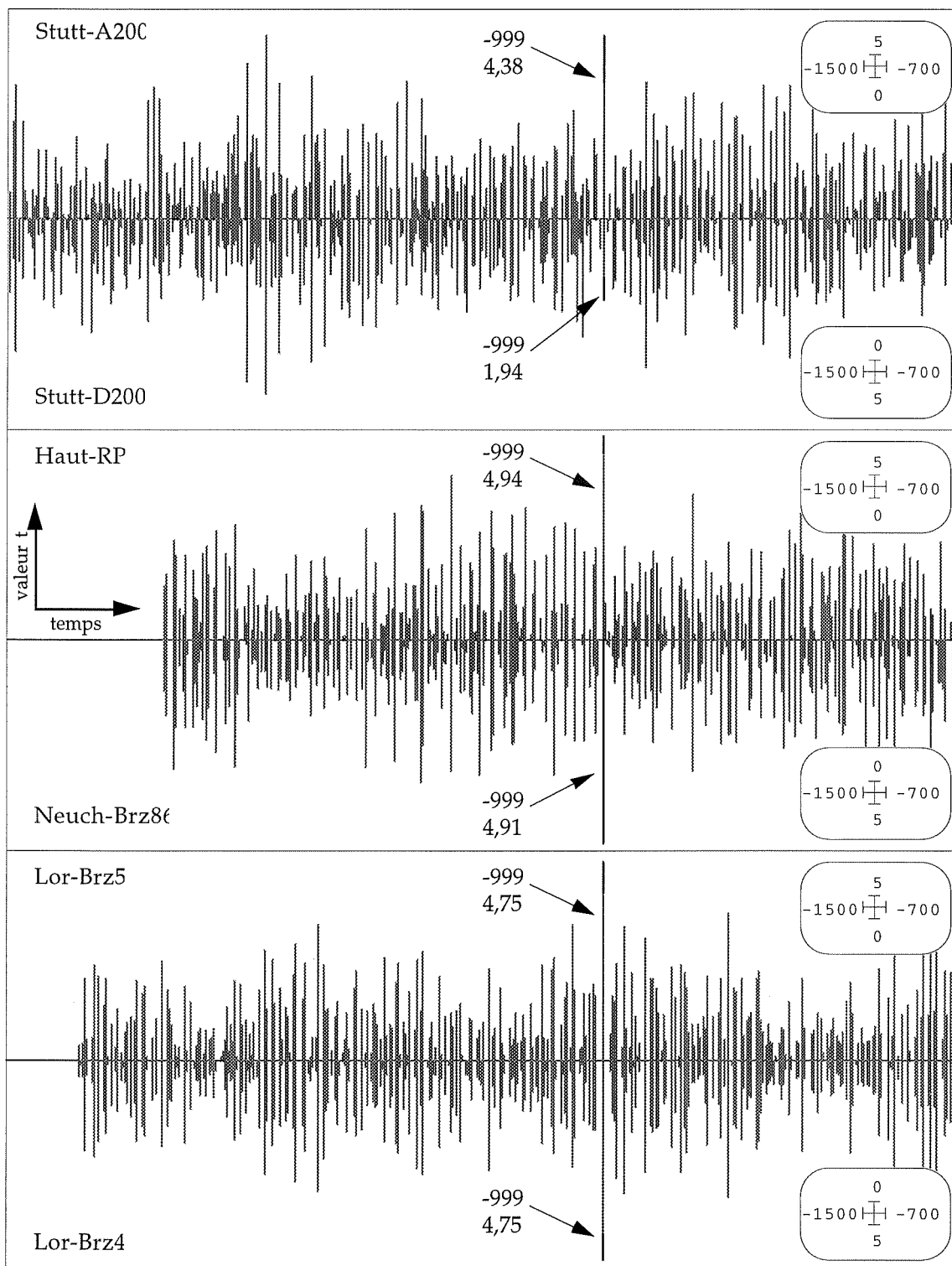


Figure 115 : résultats de datation (valeur t, indices E) de Brière-Ref9 sur les références de Stuttgart, Neuchâtel et Lorraine

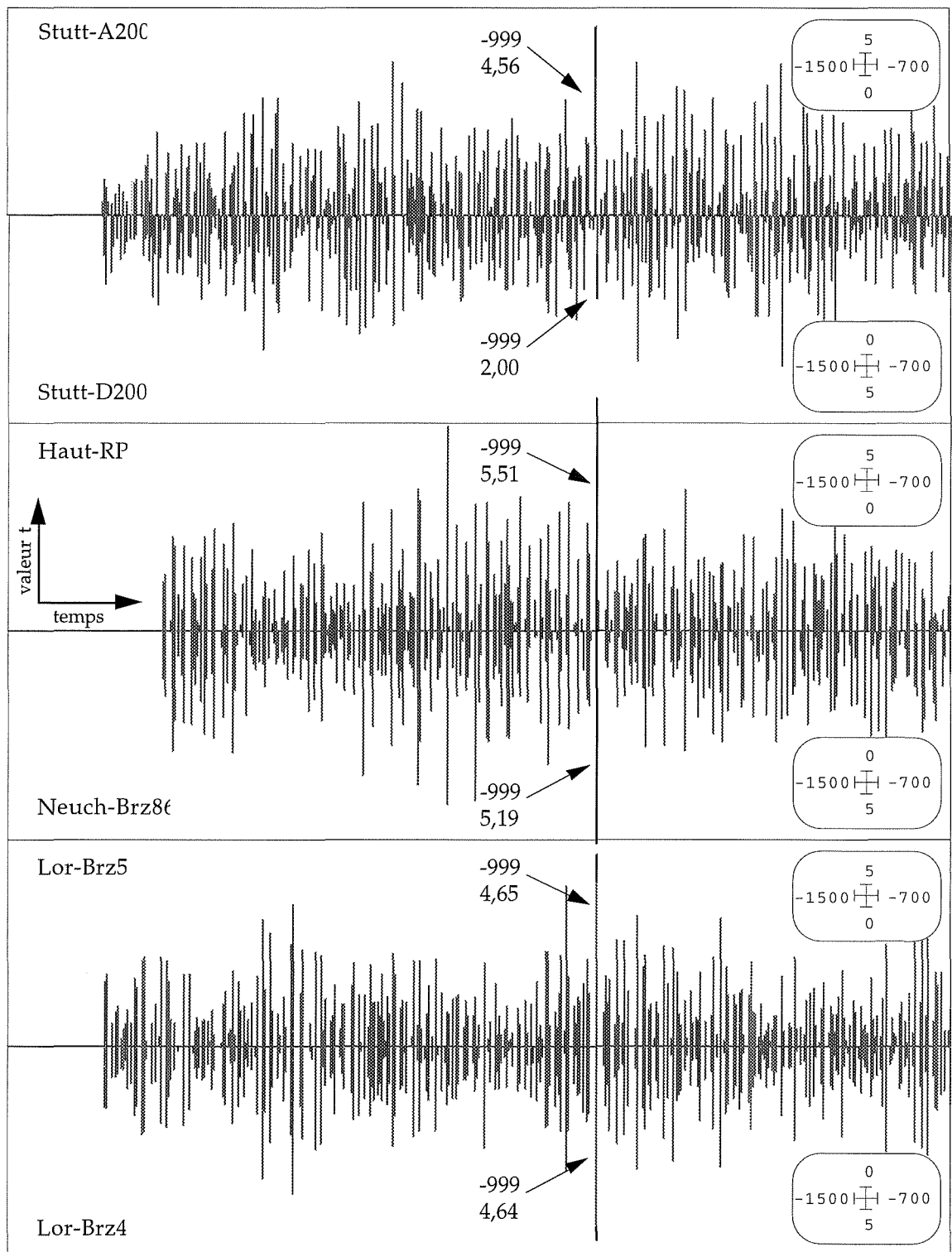


Figure 116 : résultats de datation (valeur t, indices E) de Brière-Ref10 sur les références de Stuttgart, Neuchâtel et Lorraine

#### 4.2.4 Résultats en indices Except

En utilisant les chronologies standardisées en indices Except, la valeur t de Student dépasse 5 entre les références de Neuchâtel et Brière-Ref10 (fig. 116). Elles sont très proches de cette valeur entre ces références et Brière-Ref9 (fig. 115). Les valeurs obtenues dans des positions équivalentes de la date de -978 pour Brière-Ref3 se dégagent également significativement des autres propositions entre les versions de la référence lorraine et les chronologies Brière-Ref9 et Ref10. Sur la référence Stutt-A200, la proposition retenue pour les chronologies Brière-Ref9 et Ref10 est la plus élevée pour la période testée. Les résultats sont significatifs si le nombre de calculs réalisés est considéré (ORTON 1983) mais le risque calculé en tenant compte de la distribution des valeurs t (MUNRO 1984) est supérieur à 5%. Les résultats obtenus avec la chronologie Brière-Ref4 sont inférieurs (fig. 114). Ils sont significatifs uniquement avec la référence lorraine et, selon ORTON, avec les références de Neuchâtel.

#### 4.3 Comparaison des résultats et estimation du risque d'erreur

Le risque d'erreur associé aux tests de synchronisation est estimé par trois calculs. Le premier considère le résultat indépendamment du fait que la recherche de synchronisme implique la répétition un grand nombre de fois du test. A la valeur t, suivant une distribution de Student, ou au coefficient W, suivant une loi Normale réduite, correspond un risque directement lu dans la table (tab. 47B) (cf. chap. 1). Dans le cas de valeurs t de Student, cette probabilité peut être relativisée par rapport au nombre de répétitions du test, c'est-à-dire environ par rapport à la durée de la période de recherche (ORTON 1983) (cf. chap. 1 et tab. 47B). Enfin, MUNRO (1984) propose également de tenir compte des caractéristiques de la distribution des N valeurs t (cf. chap. 1 et tab. 48C). Chacun de ces risques est calculé de façon indépendante, pour chaque paire de chronologies à dater et référence. Il est évident que pour une position de chevauchement donnée, si le résultat se répète sur plusieurs références, le risque d'erreur est de plus en plus faible avec le nombre de répliques. Cependant, les références ne peuvent être considérées totalement indépendantes. Le risque associé aux événements concordants tend vers le produit des risques individuels uniquement si les

	t/E				t/H			
	Briere-Ref3	Briere-Ref4	Briere-Ref9	Briere-Ref10	Briere-Ref3	Briere-Ref4	Briere-Ref9	Briere-Ref10
A : Haut-RP coef.	2,88	3,53	4,94	5,51	2,29	3,34	4,34	4,41
Neuch-Brz86	3,41	4,11	4,91	5,19	2,43	3,62	3,66	3,66
Stutt-A200	2,78	3,75	4,38	4,56	2,32	3,45	2,87	3,02
Stutt-D200	0,42	1,17	1,94	2,00	1,00	1,97	2,14	2,21
Lor-Brz5	5,41	4,63	4,75	4,65	3,90	3,92	3,01	3,39
Lor-Brz4	5,31	4,50	4,75	4,64	3,86	3,68	3,12	3,34
B : Haut-RP risque	2E-03	2E-04	6E-07	4E-08	1E-02	5E-04	1E-05	7E-06
Neuch-Brz86	4E-04	2E-05	7E-07	2E-07	8E-03	2E-04	1E-04	1E-04
Stutt-A200	3E-03	1E-04	8E-06	4E-06	1E-02	3E-04	2E-03	1E-03
Stutt-D200	3E-01	1E-01	3E-02	2E-02	2E-01	2E-02	2E-02	1E-02
Lor-Brz5	6E-08	3E-06	2E-06	2E-06	6E-05	5E-05	1E-03	4E-04
Lor-Brz4	9E-08	5E-06	2E-06	3E-06	7E-05	1E-04	1E-03	5E-04
	W/B							
	Briere-Ref3	Briere-Ref4	Briere-Ref9	Briere-Ref10				
A : Haut-RP coef.	1,95	2,32	2,86	3,71				
Neuch-Brz86	1,54	2,11	2,29	3,25				
Stutt-A200	1,13	1,66	2,78	2,80				
Stutt-D200	0,51	1,55	1,85	2,33				
Lor-Brz5	2,26	2,15	2,80	2,94				
Lor-Brz4	2,46	2,92	2,51	2,59				
B : Haut-RP risque	3E-02	1E-02	2E-03	1E-04				
Neuch-Brz86	6E-02	2E-02	1E-02	6E-04				
Stutt-A200	1E-01	5E-02	3E-03	3E-03				
Stutt-D200	3E-01	6E-02	3E-02	1E-02				
Lor-Brz5	1E-02	2E-02	3E-03	2E-03				
Lor-Brz4	7E-03	2E-03	6E-03	5E-03				

Tableau 47 : résultats de datation des chronologies brièronnes et risque associé

références ne comportent pas d'information commune. A notre connaissance, il n'existe pas de procédure de calcul publiée en dendrochronologie qui estime le risque en tenant compte des réplifications.

D'une façon générale, les résultats obtenus avec les valeurs brutes sont faibles. La

		Except				Hollstein			
		Briere-Ref3	Briere-Ref4	Briere-Ref9	Briere-Ref10	Briere-Ref3	Briere-Ref4	Briere-Ref9	Briere-Ref10
A : Haut-RP	N	793	770	717	717	793	770	717	717
	s	1,238	1,279	1,328	1,332	1,011	1,066	1,132	1,074
	tmoy	1,62E-03	3,57E-03	2,19E-03	1,81E-03	-1,75E-03	1,11E-03	4,56E-04	1,05E-03
Neuch-Brz86	N	803	780	727	727	803	780	727	727
	s	1,243	1,266	1,288	1,300	1,020	1,066	1,133	1,077
	tmoy	5,65E-03	3,76E-03	2,01E-03	1,33E-03	-8,72E-04	-6,78E-04	-2,13E-03	-2,26E-03
Stutt-A200	N	1133	1110	1057	1057	1133	1110	1057	1057
	s	1,137	1,218	1,311	1,318	0,971	1,042	1,154	1,104
	tmoy	-3,75E-03	-3,72E-03	-1,83E-03	-4,74E-04	-1,67E-04	-1,45E-03	1,17E-03	4,52E-04
Stutt-D200	N	1141	1118	1065	1065	1141	1118	1065	1065
	s	1,130	1,131	1,206	1,203	0,980	1,048	1,119	1,055
	tmoy	-7,95E-04	1,29E-03	9,15E-04	1,68E-03	-8,62E-04	7,40E-04	9,72E-04	6,70E-04
Lor-Brz5	N	859	836	783	783	859	836	783	783
	s	1,282	1,228	1,236	1,205	1,030	1,043	1,077	1,046
	tmoy	4,32E-03	1,20E-03	1,31E-03	2,25E-03	3,27E-03	-1,13E-03	-3,26E-03	-2,98E-03
Lor-Brz4	N	866	843	790	790	866	843	790	790
	s	1,248	1,201	1,219	1,191	1,022	1,037	1,069	1,044
	tmoy	3,05E-03	4,85E-03	2,80E-03	2,07E-03	1,61E-03	-7,18E-04	-2,59E-03	-1,40E-03
B : Haut-RP	1-(1-P(t))^N	-	-	5E-04	3E-05	-	-	7E-03	5E-03
Neuch-Brz86		-	2E-02	5E-04	1E-04	-	-	-	-
Stutt-A200		-	8E-02	9E-03	4E-03	-	-	-	-
Stutt-D200		-	-	-	-	-	-	-	-
Lor-Brz5		5E-05	3E-03	1E-03	2E-03	5E-02	4E-02	-	-
Lor-Brz4		8E-05	4E-03	1E-03	2E-03	6E-02	-	-	-
C : Haut-RP	NP(t)	-	-	7E-02	1E-02	-	-	4E-02	1E-02
Neuch-Brz86		-	-	5E-02	2E-02	-	-	-	-
Stutt-A200		-	-	-	-	-	-	-	-
Stutt-D200		-	-	-	-	-	-	-	-
Lor-Brz5		1E-02	6E-02	4E-02	4E-02	6E-02	7E-02	-	-
Lor-Brz4		1E-02	7E-02	4E-02	5E-02	7E-02	-	-	-

Tableau 48 : estimation du risque d'erreur en tenant compte des conditions de calcul

datation ne peut être jugée significative par rapport à une recherche sur une période d'environ 1000 ans quelle que soit la référence. Lors de la datation des séquences des longues références médo-continentale et atlantique, BECKER (*et al.* 1985) montre, pour la période comprise entre 2000 av. J.-C. et 500 ap. J.-C., que le pourcentage de pentes concordantes atteint au plus 61,6% en utilisant 400 cernes. Selon les séquences, ce pourcentage varie cependant de 54,4% à 61,6% autour de 58%. Les valeurs par séquences sont suffisamment différentes de 50 pour justifier le synchronisme entre les croissances. Pour la période comprise entre -1400 et -1000, la Gleichläufigkeit s'élève à 56,4 puis elle reste assez faible, 56,1% pour le tronçon de -1300 à -900.

Pour une période voisine, dans notre cas, le pourcentage de pentes concordantes, calculé pour environ 300 cernes, varie également autour de 58%. Avec Brière-Ref3, il est plus faible, entre 55 et 57%, selon les références médo-continentales. Il s'élève au maximum à 60% entre Haut-RP et Brière-Ref10. Ce résultat est alors proche de la limite de signification. Le coefficient W s'élève à 3,71 et le risque directement lu dans la table de Gauss est en effet de 0,4 ‰ pour 700 calculs réalisables sur cette référence. La concordance des pentes obtenue est donc similaire à celle présentée par BECKER *et al.* (1985). Cependant l'équivalent d'une seule séquences ne peut être daté significativement comme dans le cas des longues références car le nombre de cernes reste insuffisant.

---

La datation avec les valeurs brutes laisse la maîtrise du bruit uniquement à la répartition des séries dans la référence. La chronologie complète, ainsi que Brière-Ref4, peuvent être considérées comme suffisamment riches en séries bien réparties pour être comparées, en valeurs brutes, dans de bonnes conditions aux références. Cependant, la datation des différentes chronologies de Brière montre que les résultats sont légèrement améliorés par l'homogénéisation de la moyenne, c'est-à-dire par une perte de séries. Le résultat le plus élevé est obtenu avec la chronologie la plus pauvre en séries.

La standardisation en indices de Hollstein compare l'ampleur de la différence entre deux cernes consécutifs, à leur somme. Elle fait donc particulièrement ressortir les écarts interannuels atypiques. La datation des différentes moyennes en indices H est aussi, globalement, assez peu significative. La référence lorraine permet de dégager un synchronisme proche du seuil de signification, en tenant compte des conditions de calculs, avec les chronologies Brière-Ref3 et Ref4 (tab. 48B et C). Seule la comparaison Brière-Ref9 et Ref10 avec la référence partielle de Hauterive aboutit à un risque inférieur à 5%. La réplication est cependant observée sur toutes les références avec des valeurs parmi les premières de la liste de propositions.

La datation est de qualité plus élevée après standardisation en indices Except. La datation de la chronologie Brière-Ref10 est significative selon ORTON (1983) avec toutes les références, sauf Stutt-D200 (tab. 48B). En tenant compte de la distribution des valeurs  $t$ , le synchronisme avec Stutt-A200 ne se dégage pas suffisamment des autres valeurs. Les résultats sont aussi globalement significatifs avec Brière-Ref9. Ils sont plus médiocres avec Brière-Ref3 et Ref4 mais ils restent significatifs avec Lor-Brz et les valeurs correspondantes sur les autres références sont parmi les plus élevées.

D'une part, la standardisation en indices E permet donc de considérer la date acquise, d'autre part, les résultats sont beaucoup plus significatifs après homogénéisation.

L'indice E utilise également les écarts interannuels (cf. chap. 1). Pour déterminer si les cernes sont exceptionnels, atypiques, par rapport à un niveau moyen de croissance local (temporaire), ceux-ci sont divisés par une somme calculée à partir de 6 cernes qui encadrent le cerne standardisé. Le cerne le plus grand et le plus petit sont exclus de la somme. Cette exclusion a pour but de mieux déterminer le niveau moyen de la croissance pour la fenêtre. Ce procédé se rapproche d'un filtrage par moyenne mobile. Il a pour conséquence la prise en compte dans la série standardisée de l'information incluse dans la fenêtre, c'est-à-dire de période inférieure à 7 ans. Dans le cas de la transformation en pentes des valeurs brutes et de la standardisation en indices de Hollstein, l'information filtrée est de fréquence plus élevée puisque seuls deux cernes consécutifs sont considérés.

La datation de la chronologie moyenne de la Brière sur les références médio-continentales semble donc plus significative si une information, qui reste de haute fréquence, mais de terme supérieur à l'écart interannuel, est prise en compte. La prise en compte de cette information n'introduit pas d'ambiguïté dans le choix de la date. La standardisation en indices Except produit une autocorrélation. Cependant, le signal est suffisamment stationnaire pour qu'un seul parmi les coefficients de corrélation soit significativement différent des autres. La répartition dans le temps de toutes les valeurs  $t$  positives, y compris les faibles, ne montre pas d'organisation particulière comme dans le cas de standardisations basées sur des fonctions exponentielles (YAMAGUCHI 1986, MONSERUD 1986).

La chronologie moyenne Brière-Ref3 présente une tendance très marquée, observable sur le graphique en valeurs brutes (cf. fig. 123 ). La variance de cette chronologie



est élevée. L'écart-type de 76 /100 mm représente plus de la moitié de la largeur moyenne, 162 /100 mm. Les variations sont cependant expliquées en grande partie par une autocorrélation de 0,83 qui reflète la forte influence de la tendance. La chronologie moyenne Brière-Ref10 en valeurs brutes présente également ces caractéristiques. Cependant, après standardisation en indices E, l'écart-type de Brière-Ref10 (62) est supérieur à celui de Brière-Ref3 (52). L'homogénéisation de Brière-Ref3 conduit donc à une chronologie moyenne standardisée à plus forte variance interannuelle. Le signal de haute fréquence est amorti dans Brière-Ref3 par rapport à Brière-Ref10, ce qui peut expliquer une part de l'amélioration de la datation par l'homogénéisation.

De même que lors de la datation de Brière-Ref3, le synchronisme entre les chronologies homogénéisées et les références suit le gradient biogéographique principal. D'une façon globale, la datation est de meilleure qualité avec les versions de Lorraine-Brz. Les résultats sont également élevés avec les références du laboratoire de Neuchâtel en indices Except. Ils sont plus faibles sur Stutt-A200 et ils ne sont jamais significatifs avec Stutt-D200.

#### 4.4 Datation de moyennes d'EPS croissante

L'ordination de la matrice de valeurs t obtenues entre toutes les paires de composantes de Brière-Ref3 permet de constituer des chronologies moyennes de moins en moins homogènes mais dont l'EPS est toujours croissante (cf. 2.2). Brière-Ref9 et Ref10 sont deux "stades" de cette agglomération progressive.

Puisque l'EPS est croissante tout au long de l'agglomération, on peut penser que la moyenne représente de mieux en mieux la croissance de la population échantillonnée. Cependant, il n'existe pas de rapport direct entre cette qualité de la représentation et les facteurs qui sont responsables du lien entre les croissances individuelles (BRIFFA et JONES 1990). Notamment, la moyenne dont l'EPS est la plus élevée n'est pas nécessairement la meilleure représentation des influences régionales sur la croissance. La qualité de la datation sur les références médo-continentales est liée à une information très globale. La datation de chronologies moyennes progressivement plus riches en séries peut être utilisée pour estimer l'apport des séries ajoutées au signal dû à ces influences.

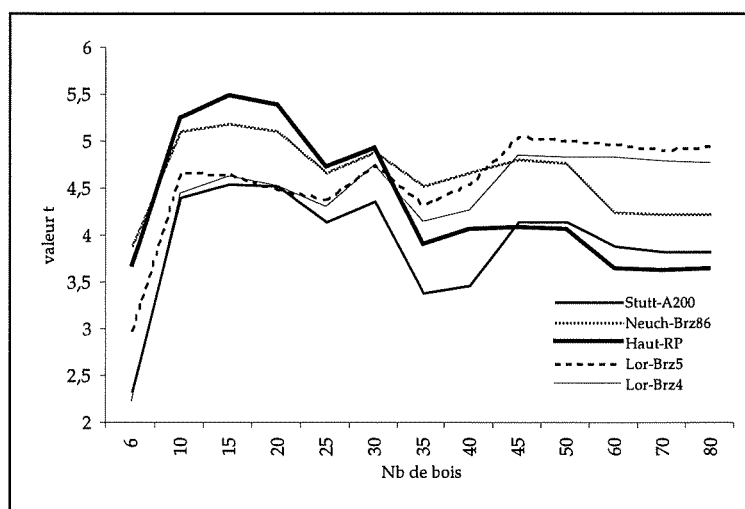


Figure 117 : valeur t de Student en fonction du nombre de séries agglomérées

La première chronologie est constituée des 6 arbres qui corréleront le plus avec tous les autres. De 10 à 45 individus, les séries sont agglomérées 5 par 5. A partir de 50 individus jusqu'à l'intégration complète, les chronologies sont construites de 10 séries en 10 séries. La longueur des moyennes varie en même temps que le nombre de bois considérés. La qualité de la datation doit donc être estimée par la valeur t de Student qui tient compte, au mieux, du nombre de cernes. Les chronologies sont comparées aux

références, sauf Stutt-D200, après standardisation en indices Except.

---

Les résultats sont synthétisés sur un graphique qui donne la valeur  $t$  sur les différentes références en fonction du nombre de bois constituant la chronologie datée (fig. 117). Le synchronisme avec toutes les références est le plus faible pour la première série. Les 6 individus ne sont pas représentatifs du signal régional. Les valeurs, d'une façon globale, sont les plus élevées pour la chronologie constituée de 15 individus, c'est-à-dire Brière-Ref10. L'agglomération de bois supplémentaires conduit à une baisse de la valeur  $t$  sur la plupart des références. Cependant, les versions de la référence lorraine corréleront mieux avec les chronologies riches en individus.

On peut conclure qu'environ 15 à 20 séries sélectionnées permettent de construire une chronologie moyenne qui représente mieux le signal régional que la synthèse complète de tous les échantillons mesurés.

L'homogénéisation ne conduit pas à un signal singularisé et, dans ce cas, la corrélation entre une composante et toutes les autres permet de dégager les arbres qui enregistrent le mieux les facteurs généraux utilisés pour les datations.

#### 4.5 Modélisation LOWESS

En suivant le modèle de GRAYBILL (1982), la standardisation revient à modéliser la part de la croissance que l'on pense non liée aux facteurs régionaux pour l'extraire du signal (cf. chap. 1). Le signal de haute fréquence, dont les variations ont une période limitée à quelques années est classiquement décrit comme permettant la synchronisation des croissances sur de longues distances (FRITTS 1976). Les facteurs climatiques, qui présentent les variations de plus haute fréquence, expliquent une grande part de ce synchronisme. Cependant, dans une fourchette de quelques années, on peut se demander quelle part du signal conserver pour obtenir le synchronisme le plus élevé entre les croissances de régions différentes. Tout en conservant un signal suffisamment stationnaire pour que l'autocorrélation induite ait peu de répercussions sur les résultats.

Le synchronisme entre les chronologies brièrannes et les références est, en effet, amélioré par la prise en compte de plus de deux cernes consécutifs pour déterminer le niveau moyen de croissance temporaire dans la standardisation en indices Except. La largeur de la fenêtre pour réaliser le calcul est de 7 ans. Il est possible de faire varier la taille de cette fenêtre et de considérer ainsi une information de période progressivement plus longue dans la synchronisation.

La programmatisation ADE du Laboratoire de biométrie-génétique et biologie des populations (UMR 5558 CNRS) de l'Université Claude Bernard Lyon-1 (disponible librement à l'adresse internet : <http://pbil.univ-lyon1.fr/ADE-4>) permet de modéliser une série de données par une procédure faisant appel à une régression linéaire (pondérée) localisée à une fenêtre (cf. chap. 1). La procédure est nommée LOWESS pour "robust locally weighted regression and smoothing scatterplots" à la suite de CLEVELAND (1985). En faisant varier la taille de la fenêtre, le modèle obtenu est plus ou moins ajusté aux données (fig. 118).

Les données brutes sont utilisées après une transformation logarithmique qui permet de rendre leur distribution plus symétrique (cf. chap. 1). Les résidus sont obtenus en soustrayant la valeur modélisée à la valeur observée. La procédure est décrite de façon générale, pour toute modélisation, par COOK et BRIFFA (1990). Ils conseillent, dans le cas d'une transformation logarithmique des données, de réaliser l'indice par soustraction de la valeur du modèle à la valeur observée. Nous avons obtenu des résultats très similaires en

utilisant le rapport valeur observée / valeur modélisée.

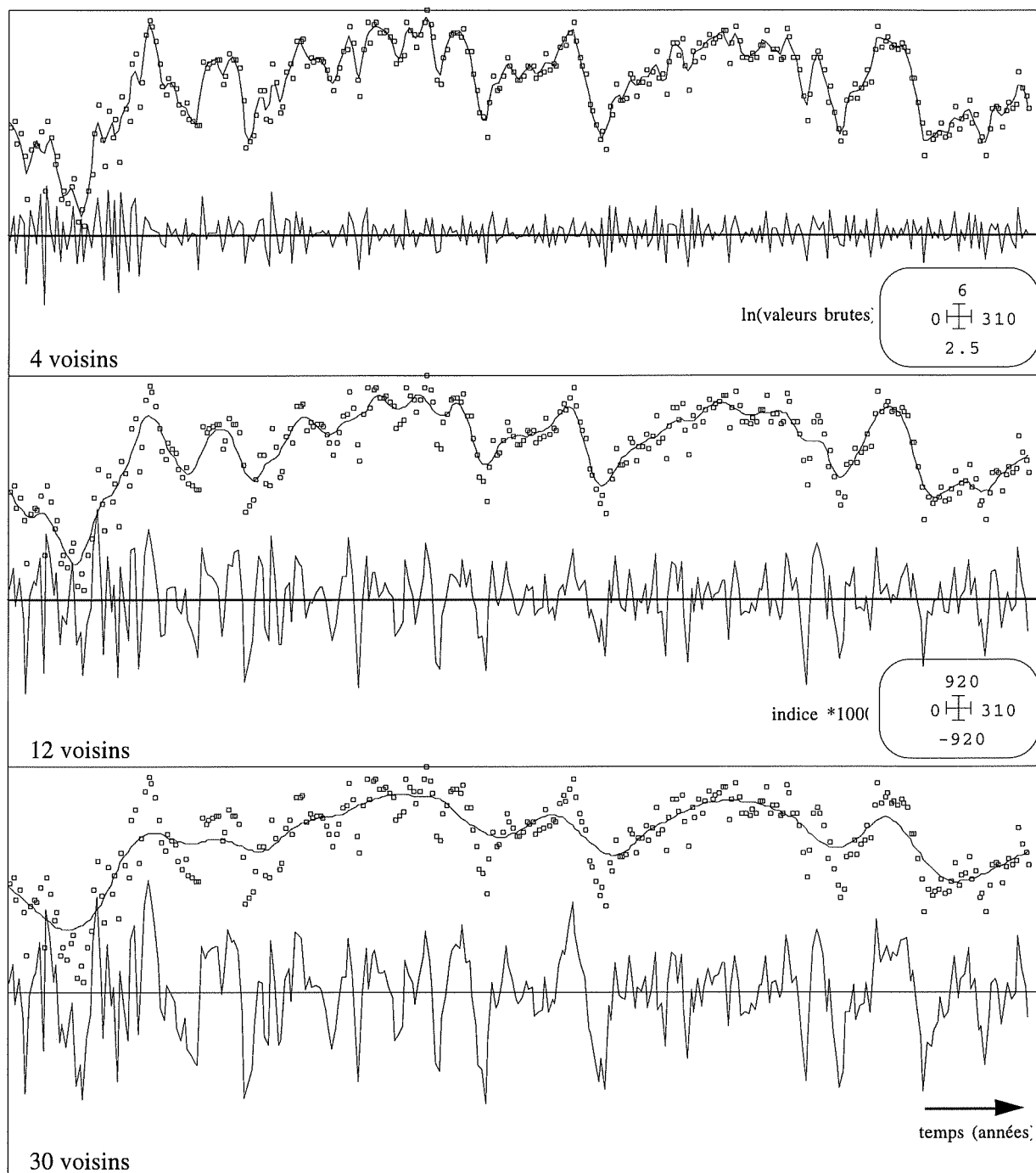


Figure 118 modélisation LOWESS de la chronologie Brière-Ref10. Données brutes, modèle et résidus calculés pour 4, 12 et 30 points voisins

Les résidus ne présentent plus de tendance à long terme ; seule l'information de haute fréquence subsiste (fig. 118). Les variations à l'intérieur de la fenêtre de calcul sont conservées. En augmentant le nombre de voisins utilisés pour réaliser l'ajustement, les résidus comportent donc une information de période de plus en plus longue (fig. 119). Les résidus ont une variance d'autant plus grande que le modèle est peu ajusté. Le rapport de la variance des résidus sur celle du modèle s'élève, selon les chronologies, à environ 4% en utilisant 4 voisins pour l'ajustement et à 15% avec 10 voisins. Pour toutes les séries, ce rapport est d'autant plus grand que le nombre de voisins augmente (fig. 119). L'évolution de ce rapport ne présente pas de palier qui indiquerait que les données présentent des signaux de

périodes bien distinctes. Le choix de la variance à conserver dans les résidus ne peut donc être déterminé à partir de la structure des données. Plus la variance conservée est importante, plus celle-ci peut être attribuée à la tendance, quelle que soit sa source.

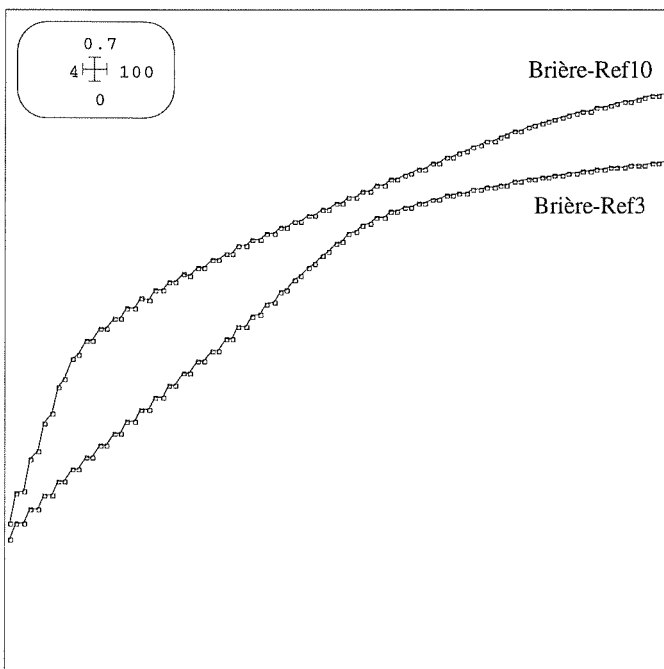


Figure 119 : rapport des variances des résidus et des modèles en fonction du nombre de voisins utilisés dans l'ajustement.

La référence Lor-Brz5 et les chronologies Brière-Ref3 et Ref10 sont modélisées en utilisant de 4 à 30 points voisins. Une recherche de synchronisme est ensuite engagée entre Lor-Brz5 et les chronologies à dater dans chaque modélisation. Les résultats sont synthétisés dans un graphique qui livre la valeur t de Student des différentes comparaisons en fonction du nombre de voisins utilisés pour ajuster le modèle (fig. 120).

La valeur t de Student est maximale pour un nombre de points utilisés lors de la réalisation de la régression locale compris entre 11 et 15 (fig. 120). Lorsque seule l'information de plus haute fréquence est retenue, le synchronisme est de moindre qualité. La valeur de Student est proche de 2,5 en utilisant 4 points alors qu'elle atteint 4,87 pour 13 voisins. La conservation de variations de plus long terme dans les résidus induit une perte de la qualité du synchronisme. Pour une fenêtre de 30 cernes, la valeur t est de 2,7 ou de 3,3 selon la

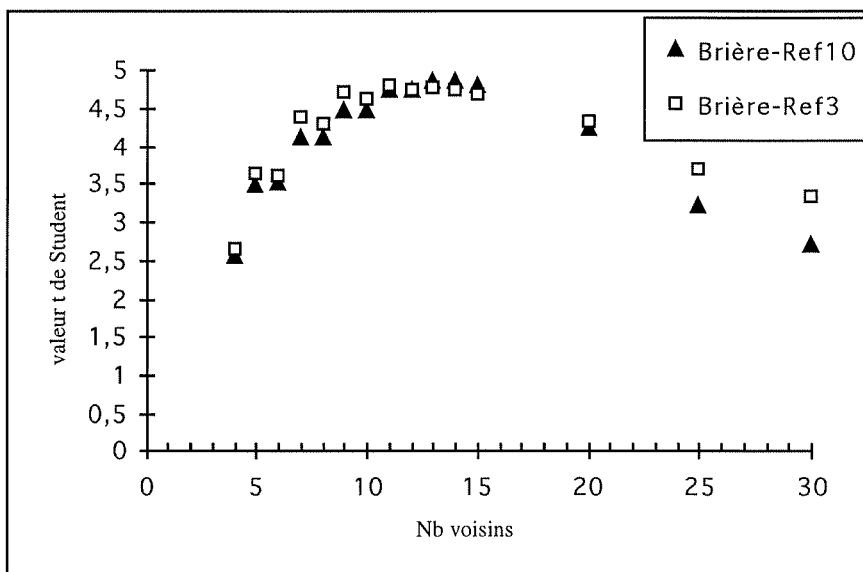


Figure 120 : valeurs t de Student calculées entre Lor-Brz5 et Brière-Ref3 et entre Lor-Brz5 et Brière-Ref10 en fonction du nombre de points utilisés dans la modélisation LOWESS des séries.

chronologie. On remarque, pour une fenêtre de 7 cernes, que les résultats sont déjà améliorés. Ceci est cohérent avec la différence de qualité de la datation observée entre les standardisations de Hollstein et Except. Lors de l'étude d'un lot de troncs subfossiles de la tourbière de Swan Carr en Irlande, MUNRO (1984) obtient également un nombre de séries individuelles interdatées plus important en utilisant un filtre portant sur 10 et 12 ans qu'avec la version ancienne du programme CROSS (BAILLIE et PILCHER 1973) dont la standardisation utilise 5 cernes.

La prise en compte d'une information de terme inférieur à 13 voisins n'introduit pas d'ambiguïté dans la détermination de la valeur de Student singulière parmi les N calculées

lors de la recherche de synchronisme. La représentation en fonction du temps des valeurs  $t$  positives ne montre pas de répartition particulière des valeurs, comme dans le cas de la standardisation en indices Except (fig. 121). Par contre, les résidus obtenus avec des modèles utilisant 20 points et plus ne sont pas suffisamment stationnaires. Les valeurs  $t$  de Student en fonction du temps sont organisées en groupes. La position de synchronisme ne peut donc être déterminée individuellement à l'année près.

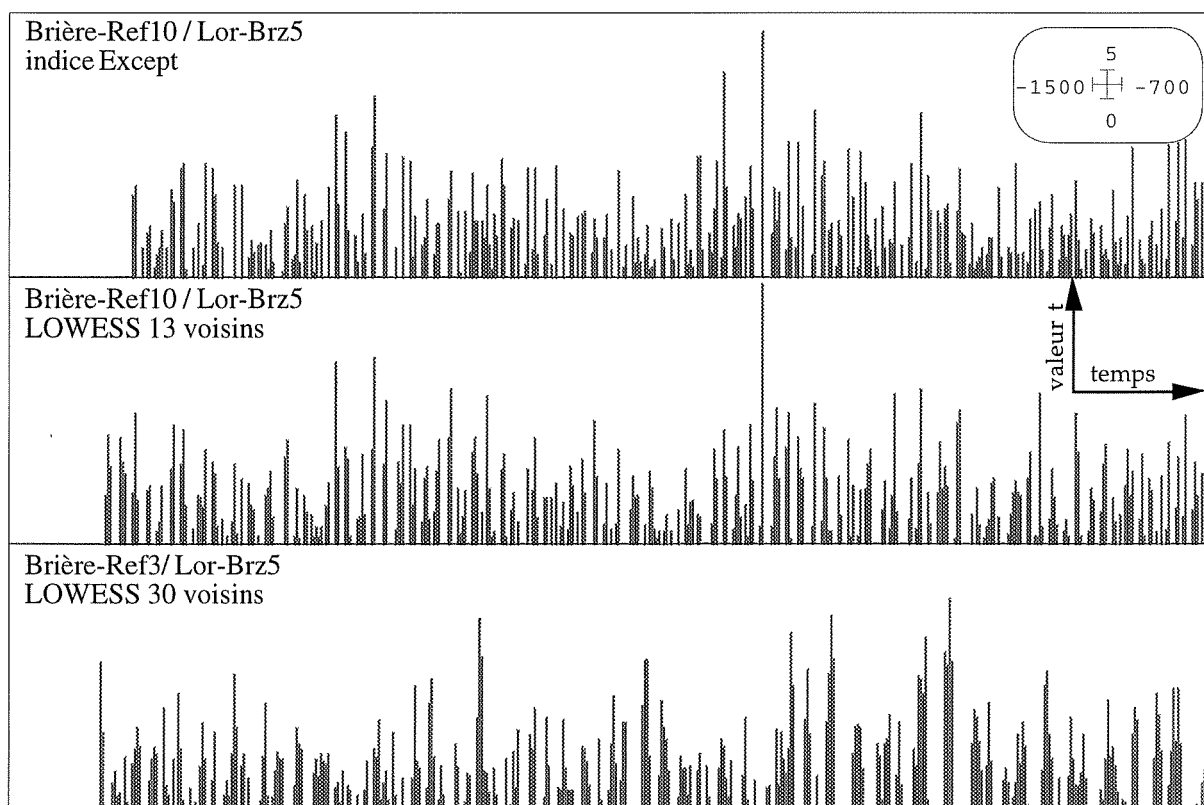


Figure 121 : résultats de datation en indices Except et pour des modèles LOWESS calculés avec 13 et 30 voisins

## 5 Constitution de chronologies en fonction de la topographie

### 5.1 Introduction

Les troncs analysés sont trouvés sur le lieu - même où ils ont poussé de leur vie. Après le retrait marin, vers 2500 av. J.-C., il est très improbable que la dynamique hydraulique dans le marécage de Brière ait pu permettre le déplacement de troncs. Les sédiments postérieurs à l'argile marine sont tourbeux sur toute leur hauteur et ont été déposés en milieu calme. Le lit de troncs datés est inclus dans cette tourbe (cf. partie 1).

Il est exceptionnel de trouver des bois datables en dendrochronologie qui n'ont pas été déplacés. Ceci constitue une originalité de l'étude des troncs subfossiles. Les bois utilisés dans les constructions sont collectés dans un bassin d'exploitation qui recouvre toujours une diversité de milieux et subit un impact anthropique plus fort qui implique une diversité de croissances qui ne peut être maîtrisée et qui est très difficilement restituée.

De plus, les études palynologiques concomitantes des troncs datés ne montrent pas d'actions anthropiques importantes (VISSET *et al.* 1994) (cf. partie 4). Il est très probable que la dynamique du peuplement observé soit alors essentiellement liée aux variations de facteurs environnementaux (cf. partie 4).

Des chronologies moyennes constituées en fonction de la topographie des troncs sont donc très probablement représentatives de groupes d'arbres soumis à des conditions locales très homogènes. La topographie, la sédimentation et les spectres polliniques permettent une description du milieu de développement des arbres. Ces variables sont, bien sûr, imparfaites mais restent exceptionnelles pour du matériel ancien.

Ces chronologies nous autorisent à évaluer de l'importance des influences locales sur la qualité de la datation à longue distance. En effet, la datation se fait sur la base d'une information d'échelle régionale enregistrée par les arbres. Nous avons montré que dans un lot assez vaste, 15 arbres choisis représentent mieux cette information que la totalité du lot. Les différences individuelles liées aux facteurs internes expliquent en partie qu'un arbre soit plus ou moins enregistreur des facteurs généraux. Cependant, il a également été souvent montré, sur du matériel vivant, que les facteurs locaux interfèrent fortement avec les facteurs globaux (FRITTS 1976, TESSIER 1984). La situation privilégiée de l'étude nous permet de le montrer pour du matériel ancien.

## 5.2 Description des sites

### 5.2.1 Localisation

Les chronologies sont construites par zone de prélèvement. Les troncs ont été tronçonnés in situ et ont été cartographiés sur les sites d'Ile Clidan et d'Ile d'Errand 1 et 2. La répartition du matériel analysé sur ces sites permet de réaliser 8 chronologies constituées de troncs découverts en groupes. Elles sont construites sur chaque site en tenant également compte de la distance des troncs par rapport au socle pyroclastique le plus proche. En effet, l'axe de diversité maximale du milieu part de l'île en direction du marais. Les facteurs principaux du milieu, dont le niveau de la nappe dans le sol, sont bien sûr liés à cet axe. Les chronologies, sur chaque site, sont constituées d'arbres découverts progressivement plus avancés dans le marais (fig. 122).

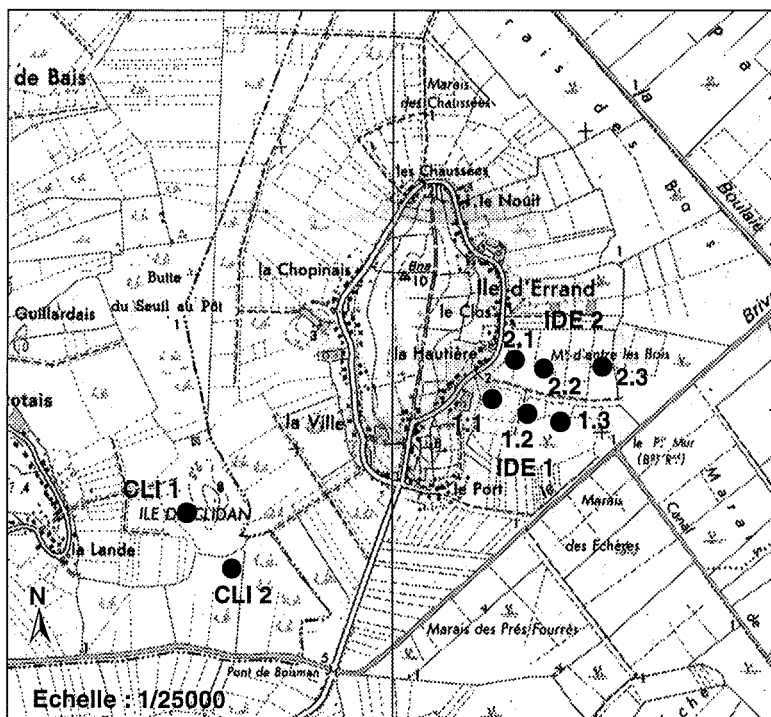


Figure 122 : localisation des chronologies moyennes constituées

L'Ile d'Errand est densément habitée. Dans les deux zones de prélèvement, la limite entre le socle et le marais est par conséquent difficilement observable. Elle est souvent cultivée, en friche ou en haies. Les troncs les plus proches découverts le long de l'île sont avancés dans le marais d'environ 50 à 80 m. Les plus éloignés du socle sont situés entre 400 et 450 m en direction du Brivet.

Inversement, l'Ile Clidan n'est pas habitée. Le contact entre le socle et la sédimentation tourbeuse, en prairie, n'a pas subi de modifications importantes. Nous avons

---

découvert des troncs conservés très proches de cette limite, entre 3 et 5 m. Les séries qui constituent la chronologie CLI1 proviennent d'arbres avancés dans le marais de 3 à 20 m. Un autre groupe d'arbres, très distinct du premier, a été échantillonné entre 80 et 150 m de l'île. Il a permis la construction de la chronologie CLI2. L'observation de ces groupes ne reflète probablement pas une distribution lacunaire des troncs. Ils sont davantage liés, entre autres, aux conditions d'accès, aux variations de la végétation permettant l'identification des troncs, à l'intensité des recherches aussi bien actuelles qu'anciennes pour l'exploitation au cours du XIXe siècle ...

### *5.2.2 Sédimentologie et conditions de développement des chênes*

Pour tous les sites, à l'exception de CLI1, la sédimentation observée est typique de cette partie de la dépression brièronne (cf. partie 1). Une tourbe noire pâteuse superpose une tourbe brune plus fibreuse. Une couche de vase organique noire de 5 à 10 cm, trouvée à une profondeur comprise entre 180 et 190 cm, s'intercale entre la tourbe et l'argile marine (cf. 1.3). Le sommet des troncs se situe entre 30 et 10 cm sous la surface. Dans la zone de contact entre le marais et le socle, à Ile Clidan, une sédimentation plus complexe est observée (cf. 1.3). La couche de tourbe reçoit un apport de surface terrigène graveleux. Des sables marins remplacent l'argile. Le dépôt de vase organique est absent. La profondeur du dépôt marin varie très rapidement en s'éloignant de l'île. A 3 m du contact entre la tourbe et le socle, il n'est pas observé de dépôt marin. La tourbe repose sur l'arène. A 10 m, il est situé à 32 cm de profondeur. Il est à 120 cm à 20 m et à 30 - 40 m de la limite, la sédimentation typique est retrouvée.

Les arbres de CLI1 sont les seuls analysés suffisamment proches de l'île pour que la nature du substrat qu'ils exploitent soit différente de la sédimentation typique. On peut penser que ce groupe d'arbres reçoit un enrichissement en éléments minéraux plus important que dans les autres sites à partir de l'île. La profondeur de tourbe à sa disposition est plus faible qu'ailleurs. Les retraits de la nappe annuelle affectent en premier ce site. Dans cette situation, la tourbe apparaît aujourd'hui plus structurée, formant des agrégats. De plus, les racines, au moins au plus proche de l'île, devaient pouvoir atteindre le dépôt marin. Sans être optimal, le sol apparaît donc plus favorable sur CLI1 au développement du Chêne que sur les autres sites.

Plus avant dans le marais, l'apport de surface en éléments minéraux est dépendant du niveau de nappe hivernal. Le niveau actuel permet un apport fin. Le niveau trophique de la tourbe est très variable en fonction de cet apport et des apports anciens. Les études pédologiques montrent des valeurs extrêmes du pH[eau], allant de 4,2 à 6,2 (ANONYME 1982). MAGNANON (1991) montre cependant que la végétation herbacée actuelle est plus dépendante des variations et du temps de séjour à une altitude élevée de la nappe que du niveau trophique de la tourbe. Il est difficile de transposer ces conditions de croissance dans le temps. La palynologie ne montre cependant pas de période d'acidification du milieu très importante (cf. partie 1). Et il est raisonnable de penser que les arbres analysés sont, en moyenne, d'autant plus dépendants des variations du niveau de nappe qu'ils sont avancés dans le marais quelle que soit l'époque, car l'altitude diminue faiblement dans cette direction et ne montre pas de variations importantes.

### *5.3 Description des chronologies moyennes*

Les chronologies comportent entre 5 et 13 individus (tab. 49). Ce nombre est peu élevé mais il est imposé par la topographie des troncs. Se limiter en échantillons par

chronologie permet aussi d'obtenir un nombre de groupes assez important pour décrire les sites. Pour chacun, une situation proche de l'île peut être comparée à une situation avancée dans le marais. Pour IDE 1 et 2, un groupe intermédiaire, également imposé par la topographie, permet ainsi d'équilibrer au mieux les effectifs. Le nombre de cernes obtenus avec ces arbres varie de 248 à 347. Il est le plus faible pour la chronologie IDE 2.3 qui comporte le moins de séries. Sans la considérer, il varie de 81 ans. Les résultats sont donc exprimés par la valeur t de Student qui compense au mieux la différence de nombre de cernes utilisés. Les périodes couvertes se terminent toutes vers -1000. Elles débutent plus ou moins tardivement entre -1358 et -1246. En excluant IDE 2.3, le décalage atteint 90 ans. Ce décalage ne présente pas de lien avec les résultats exposés. Nous avons testé des chronologies qui couvraient toutes, sauf IDE 2.3, la période entre -1267 et -1026. Les résultats sont apparus globalement diminués, suite à la perte de représentativité, et ne s'avéraient pas plus clairs. Ces biais d'échantillonnage sont dû à la nature particulière du matériel, ils doivent cependant être considérés pour IDE 2.3 qui est sous-représentée. L'EPS de chaque chronologie est supérieure au seuil de 0,85 défini par WIGLEY (*et al.* 1984). Elle est inférieure à 0,90 uniquement pour la chronologie IDE 2.1. IDE 2.3 présente une EPS s'élevant à 0,90 car les 5 arbres ont une croissance très synchrone ( $r=0,5$ ). Selon ce critère, il est donc possible de considérer les chronologies moyennes représentatives des sous-populations constituées.

#### 5.4 Datation des chronologies

La recherche de synchronisme est engagée entre les séries et les références

	CLI 1	CLI 2	IDE 1.1	IDE 1.2	IDE 1.3	IDE 2.1	IDE 2.2	IDE 2.3
Nb indiv.	8	11	7	13	10	7	9	5
Origine	-1303	-1358	-1277	-1267	-1328	-1338	-1342	-1246
Terme	-1004	-1012	-1006	-1002	-998	-1006	-1026	-999
Nb cernes	300	347	272	266	331	333	317	248
r moy	0,498	0,47	0,443	0,462	0,457	0,443	0,346	0,501
EPS	0,941	0,966	0,912	0,982	0,957	0,897	0,928	0,902

Tableau 49 : statistiques descriptives des chronologies en fonction de la topographie

standardisées en indices Except. La date retenue par construction en accord avec la référence Brière-Ref3 est très souvent dans les deux meilleures positions de synchronisme pour la période de recherche comprise entre -1700 et -700. Les résultats sont globalement positifs. Il ne semble pas y avoir de lien entre les différences de qualité de la représentation des chronologies et ceux-ci, à part peut-être pour IDE 2.3. Cette observation permet de justifier le choix de réaliser plus de groupes très localisés mais comportant peu d'individus.

En considérant toutes les références, les résultats sont nettement plus élevés pour la chronologie CLI 1 que pour les autres. Les valeurs t sont significatives à des risques près

	CLI 1	CLI 2	IDE 1.1	IDE 1.2	IDE 1.3	IDE 2.1	IDE 2.2	IDE 2.3
Stutt-A200	1	10	1	4	6	1	12	13
Neuch-Brz86	1	1	1	2	1	1	4	3
Haut-RP	1	5	1	2	1	2	10	3
Lor-Brz5	1	1	1	1	2	1	1	3
Stutt-A200	4,80	2,51	4,31	2,95	3,47	3,99	2,73	2,92
Neuch-Brz86	5,85	3,42	3,92	4,03	4,33	4,18	3,02	3,02
Haut-RP	6,17	3,11	4,16	4,06	3,68	3,45	2,51	3,17
Lor-Brz5	4,76	5,27	4,18	4,68	3,92	4,68	4,05	3,32

Tableau 50 : résultats de datation des chronologies moyennes par secteurs topographiques. Rang de la proposition dans une liste décroissante et valeur t de Student



---

inférieurs à 5% si l'on tient compte des conditions de calculs. D'autres résultats sont également élevés mais uniquement sur la référence Lor-Brz5. Ils concernent les chronologies CLI 2, IDE 2.1, IDE 1.2. Les résultats les plus faibles en tenant compte de toutes les références sont obtenus avec les séries IDE 2.2, IDE 2.3 et dans une moindre mesure avec CLI 2 et IDE 1.3. (tab. 50)

Les résultats présentent bien des différences que l'on peut, au moins en partie, attribuer à la position topographique des troncs donc très probablement aux conditions de milieu dans lesquelles les arbres se sont développés. Les chênes issus du sol le moins tourbeux où la contrainte de la nappe est la plus faible livrent une série de cernes qui contient une information globale plus directe. Pour les arbres qui prospectent des sols probablement entièrement tourbeux, la chronologie représente mieux l'information régionale lorsque ceux-ci sont le moins avancés dans le marais, c'est-à-dire le moins dépendant de la variation de nappe.

Cette influence n'est pas directe, car des facteurs internes font que, pour chaque milieu, des arbres sont de plus ou moins bons enregistreurs des influences régionales. De plus, il faut envisager que d'autres facteurs locaux, comme la dynamique du peuplement, peuvent interférer avec les facteurs pédologiques.

Les valeurs t de Student observées entre CLI 1 et les références sont du même ordre, voire supérieures à celles observées avec Brière-Ref10. Cette chronologie comporte les 15 arbres qui corréleront le mieux avec tous les autres. Les chronologies dérivées de l'homogénéisation de Brière-Ref3 ont été construites sans tenir compte de la provenance des bois. Cette démarche aurait été imposée dans le cas d'un lot de séries archéologiques. L'utilisation de la hiérarchisation de la matrice de synchronisme paire par paire de composantes nous permet d'obtenir une bonne représentation de l'information globale. Cependant, pour cette analyse, l'ordre obtenu n'est pas lié aux différents milieux de développement des arbres mais plutôt à des facteurs individuels. En effet, Brière-Ref10 contient au moins une série issue de chaque groupe topographique. Elle est constituée, en plus, de 3 séries provenant des groupes IDE 1.1 et IDE 1.2 et de 2 séries dont les arbres sont situés dans les groupes CLI 1.1 et IDE 2.3. Dans chaque milieu, il existe donc des arbres qui permettent la datation à longue distance.

La même méthode appliquée à des forêts actuelles de la vallée de la Loire, n'aboutit pas à ce résultat. La hiérarchisation de la matrice de valeurs t s'opère en fonction des différents milieux. La répartition de l'information dans la matrice est en réalité très différente. Un lot d'arbres vivants livre des séries qui se chevauchent presque toutes parfaitement dans le temps. La période commune à tous les individus, où les cernes sont mesurés sur tous les échantillons, représente une grande part de la période d'étude. Dans le cas du lot protohistorique de la Brière, les arbres de CLI 1 se répartissent sur toute la période d'étude et chevauchent très peu. Il n'y a pas de période commune à tous les individus d'un milieu donné. Ceci est valable pour tous les groupes topographiques et a permis la réalisation de chronologies d'environ 300 ans avec environ 10 arbres. La corrélation entre les arbres provenant d'un même milieu est donc très mal représentée dans la matrice. L'ordre n'a pas de lien avec les différents milieux de provenance des séries car cette information est sous-représentée dans la matrice.

La différence de milieu de développement et les facteurs individuels apparaissent cependant comme des axes majeurs de la perturbation de l'influence générale sur la croissance. Homogénéiser une chronologie peut permettre de mieux dégager cette information globale mais dans le cas de lot historique, la répartition de l'information dans le temps est très complexe et il est difficile d'attribuer cette amélioration à la maîtrise de l'un ou

l'autre de ces ensembles de facteurs.

## 6 Statistiques en fonction du temps

### 6.1 Chronologies en valeurs brutes

Dans sa partie ancienne, la chronologie complète Brière-Ref3 comporte progressivement d'avantage de séries. Le nombre se stabilise vers 50 individus entre -1200 et -1070 puis diminue progressivement dans la partie récente (fig. 123). Les valeurs extrêmes de la chronologie en valeurs brutes sont 602 /100 mm et 11 /100 mm. Ces valeurs, observées aux

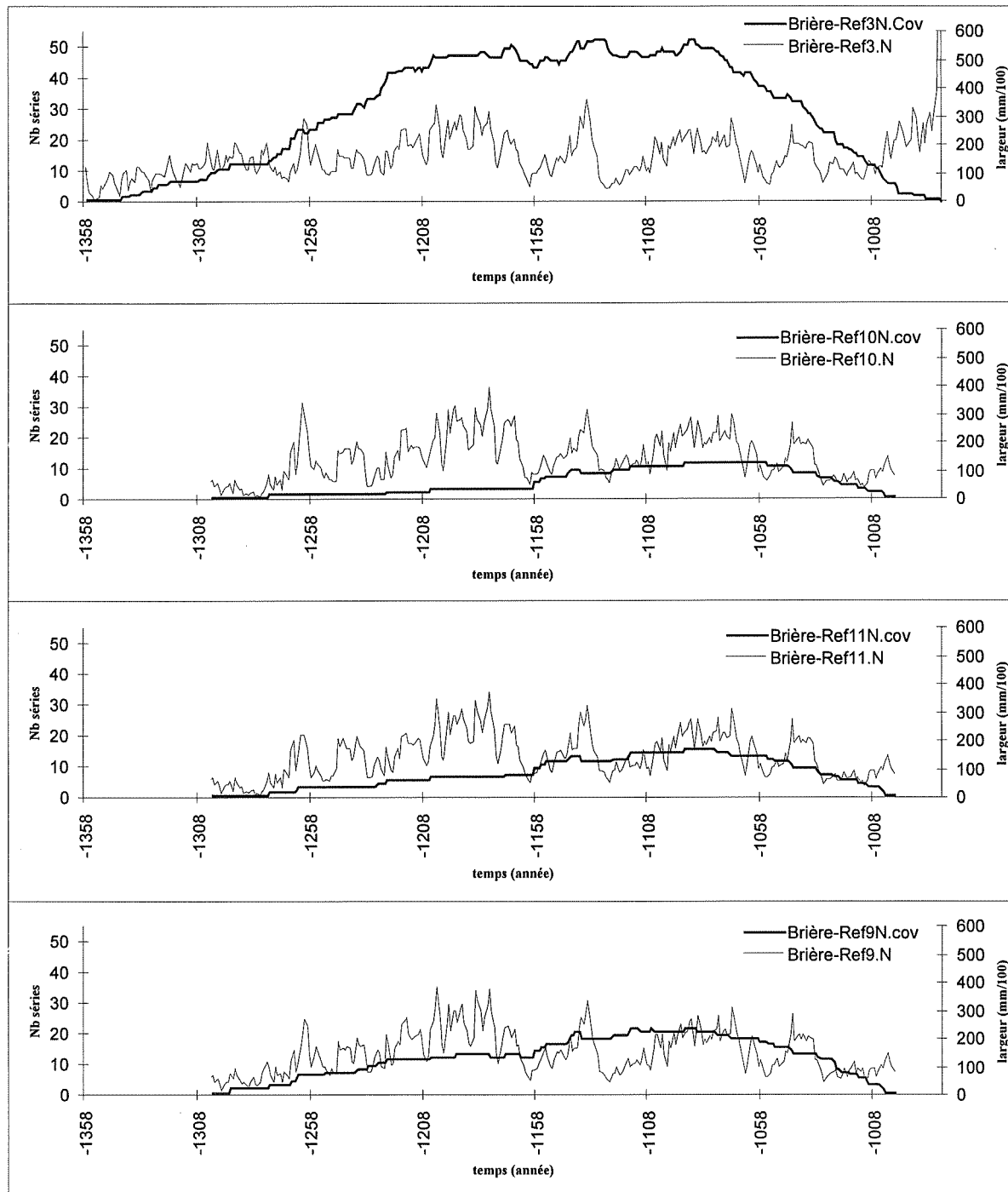


Figure 123 : chronologies brièronnes en valeurs brutes et couverture

extrémités de la chronologie, sont à rapprocher du faible nombre d'échantillons. Pour toutes les chronologies construites, les premiers cernes sont particulièrement étroits. Ces cernes ont été élaborés durant la phase juvénile des arbres les plus anciens. La variation de la croissance en fonction de la sénescence pour la population étudiée est particulière. Les 40 à 50 premiers cernes sont étroits (cf. partie 5). Le niveau moyen des chronologies dans leur partie ancienne est donc affecté par cet effet d'âge particulier.

La partie la plus récente de Brière-Ref3 est principalement constituée des jeunes arbres de Cabéno qui présentent par contre une croissance moyenne très forte sur toute leur chronologie. La dérive vers des valeurs très élevées de la fin de la série n'est pas observée dans les moyennes homogénéisées car ces arbres ne sont pas retenus.

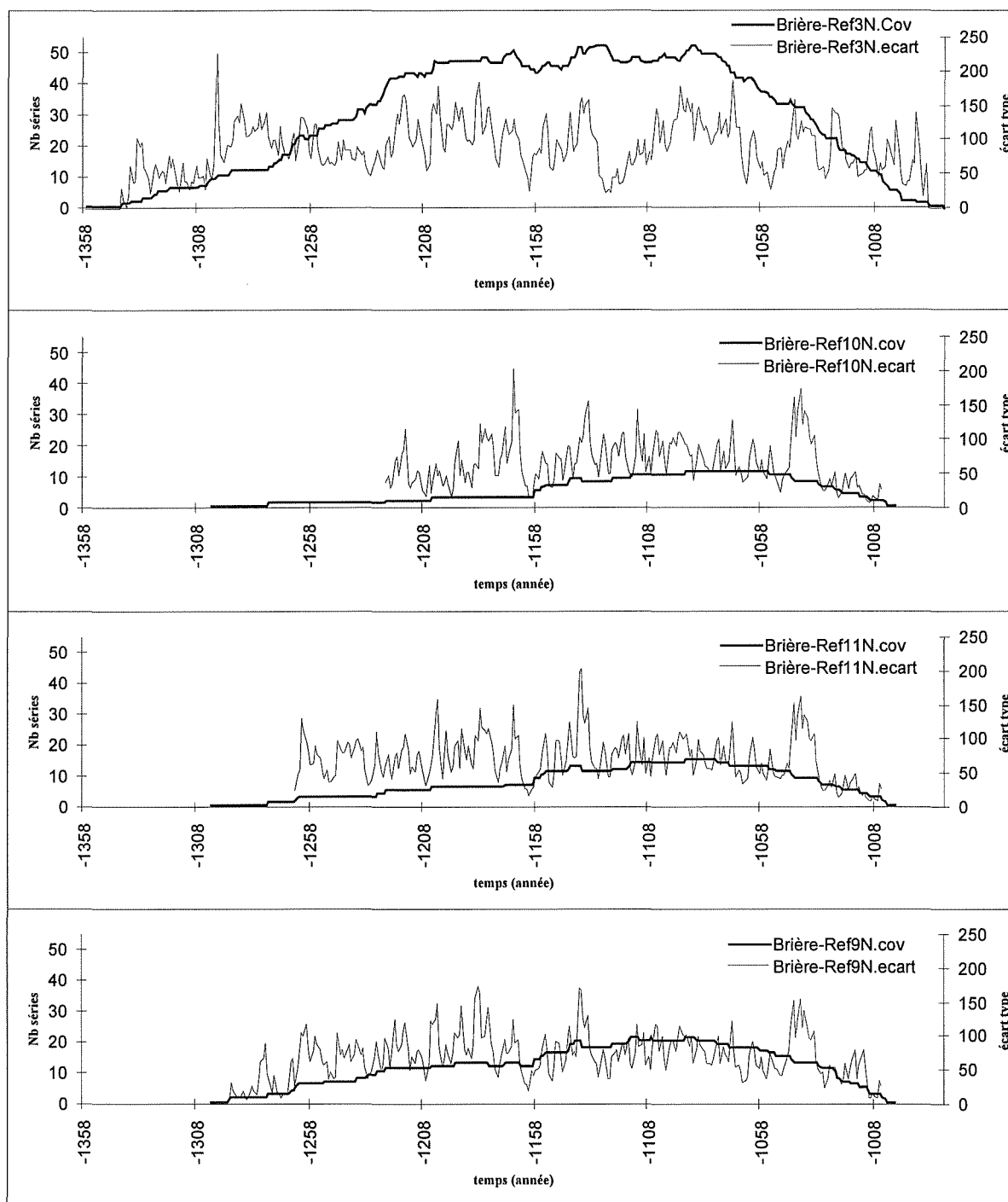


Figure 124 : écart-type des réalisations des chronologies brièronnes en valeurs brutes

---

En dehors de ces périodes, les chronologies présentent une forte variation du niveau moyen qui n'est pas liée au nombre d'échantillons. Cette tendance est en effet très similaire entre la chronologie complète comportant 97 individus et les chronologies homogénéisées, constituées de 15, 20 et 30 séries. Les valeurs extrêmes observées pour cette partie de la chronologie sont 395 /100 mm et 46 /100 mm. La largeur, pour environ 50 arbres, est inférieure à 0,5 mm entre les années -1127 et -1125. La tendance est la principale source de variance. Les résidus de la modélisation LOWESS réalisés avec 4 voisins représentant le signal de haute fréquence ont une variance qui atteint 4 à 5% de celle du modèle correspondant à la tendance. De plus, l'autocorrélation des séries est très forte. Elle est supérieure à 0,8 à l'ordre 1 et reste de 0,14 et de 0,10 pour Brière-Ref3 et Brière-Ref10 à l'ordre 20 (fig. 128).

L'écart-type de chaque réalisation subit également de fortes variations le long de la chronologie (fig. 124). Il existe un lien fort entre l'écart-type et le niveau moyen, ce qui met toujours en évidence le rôle principal de la tendance. La dépendance est la plus forte pour la référence Brière-Ref3. Les chronologies homogénéisées ont un écart-type plus stable en fonction du temps. Il reste cependant dépendant du niveau moyen pour Brière-Ref10, par exemple.

## 6.2 Chronologies standardisées

Les chronologies standardisées en indices Except sont plus stationnaires (fig. 125). Par construction, il n'existe plus de tendance à long terme. Cependant, aux extrémités des chronologies, en fonction du nombre d'échantillons intégrés, une augmentation de la variance peut être observée. Elle se traduit dans le temps par de plus grands écarts de l'indice moyen (fig. 125) et par des écart-types plus élevés par réalisation (fig. 126). Il n'existe toutefois plus de dépendance entre le niveau moyen de l'indice et l'écart-type (fig. 127).

Les chronologies homogénéisées comportent un signal de plus grande variance dans le temps. Celui-ci n'est pas totalement stable. Comme précédemment, la variance est fonction du nombre de séries. Il n'existe pas de dépendance entre le niveau moyen de l'indice et l'écart-type (fig. 127).

La dépendance sérielle, mise en évidence par la fonction d'autocorrélation des chronologies en valeurs brutes, est éliminée par la standardisation (fig. 128). Il existe toutefois une autocorrélation induite par les méthodes de standardisation. Elle est négative pour les ordres 2 et 3 et montre des oscillations cycliques de période 7 ans de faible amplitude autour de 0.

Le signal standardisé n'est pas un bruit blanc, dont la structure serait purement aléatoire, mais il peut être jugé suffisamment stationnaire pour que sa structure influe peu sur le calcul du coefficient de corrélation.

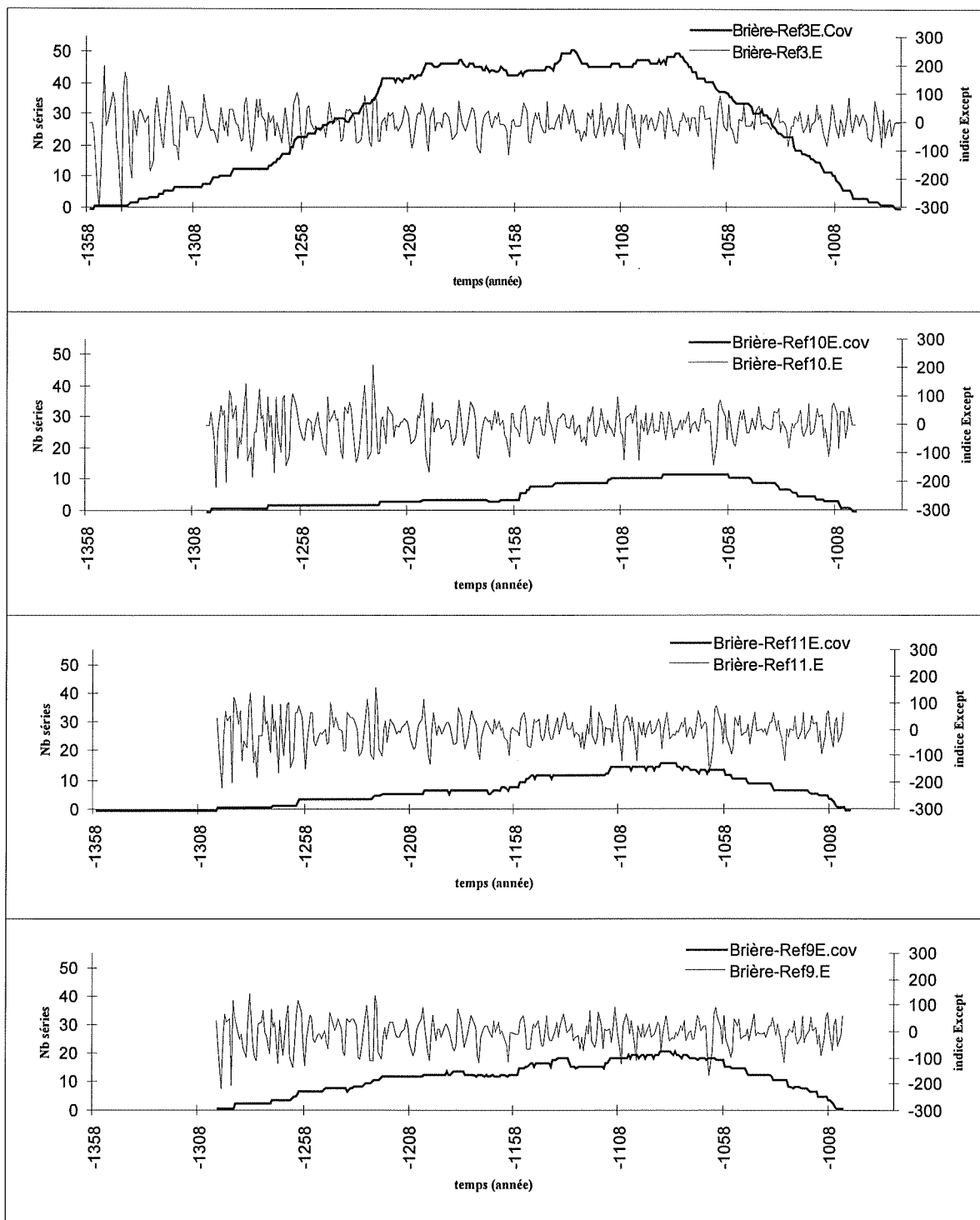


Figure 125 : chronologies brièronnes standardisées en indices Except

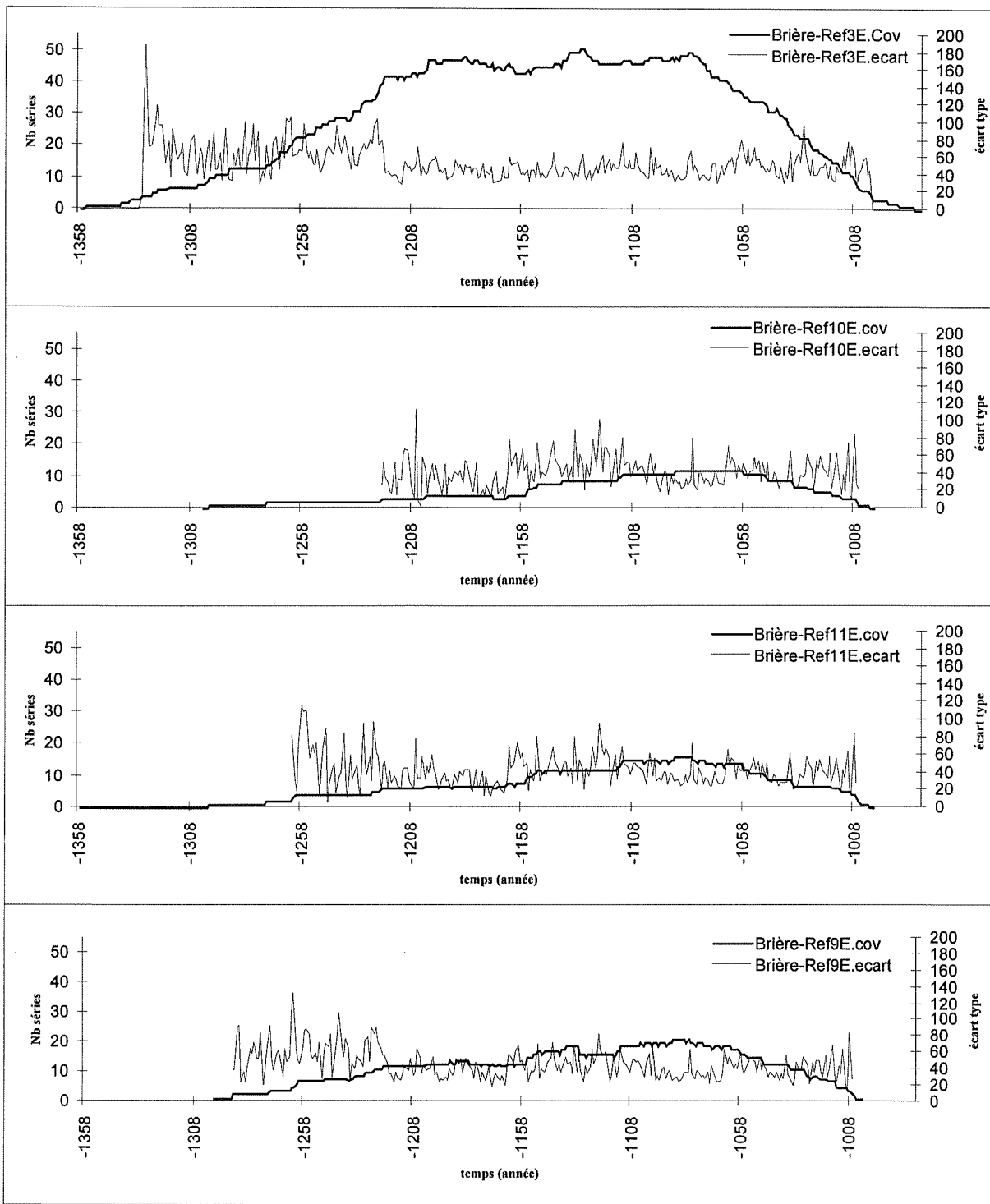


Figure 126 : écart-type des réalisations des chronologies brièronnes en indices Except

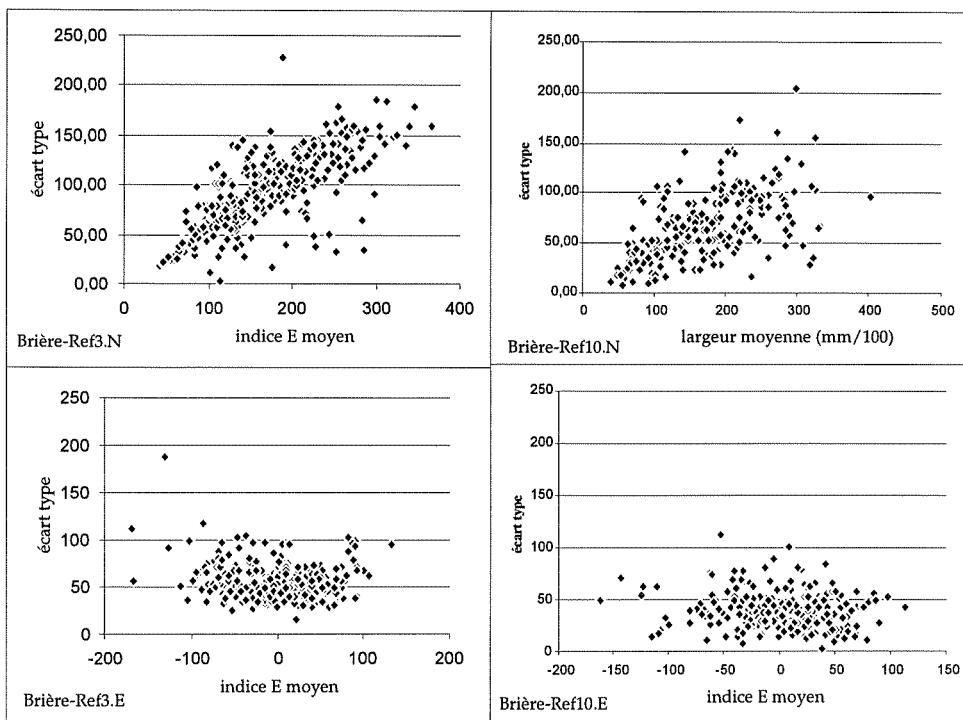


Figure 127 : relation entre niveau moyen et écart-type des chronologies Brière-Ref3 et Brière-Ref10 en valeurs brutes et en indices Except

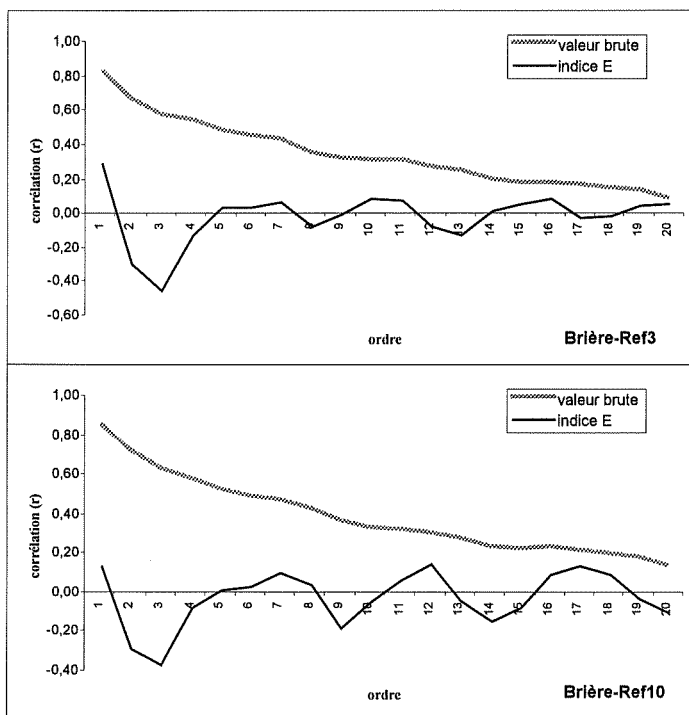


Figure 128 : fonction d'autocorrélation des chronologies Brière-Ref3 et Ref10

### 6.3 Qualité du signal en fonction du temps

Les statistiques descriptives des chronologies calculées avec la totalité des observations peuvent cacher des variations en fonction des périodes. Les paramètres sont donc calculés à l'intérieur de fenêtres progressivement décalées pour produire une fonction du temps (cf. chap. 2 4.4). Les calculs sont réalisés sur 30 observations décalées de 10 ans pour obtenir des résultats portant sur des périodes courtes.

---

Le nombre de séries chevauchant d'au moins 30 ans augmente de la partie la plus ancienne des chronologies homogénéisées jusque vers -1163 (fig. 129). A partir de cette date, les séries sont plus nombreuses dans chaque chronologie. La sélection des composantes permet de construire des moyennes couvrant une période de plus de 300 ans avec 15 à 30 bois. Cette sélection basée sur la corrélation montre donc que la qualité du synchronisme est assez forte, quelle que soit la période. Cependant, des groupes de corrélation peuvent être observés (cf. 1.2). Le groupe 3, dont les séries sont à la fin de la chronologie, offre les caractéristiques de synchronisme les plus élevées. Les séries de ce groupe sont donc favorisées lors de la sélection.

La corrélation moyenne entre les séries sélectionnées varie de 0,70 à 0,30 (fig. 129). Elle prend cette valeur minimale à la fin des chronologies et pendant la période comprise entre -1153 et -1113. La corrélation entre les séries est de moindre qualité durant cette période. L'année relative 229, marquée par un changement brusque de croissance, correspond à l'année absolue -1130. La baisse de corrélation peut donc refléter, comme les groupes, le rôle particulier de cette année.

Lorsque la corrélation entre les séries est élevée, le nombre minimal d'individus pour obtenir une valeur d'EPS supérieure au seuil de WIGLEY (*et al.* 1984) est faible. Les séquences les mieux couvertes de Brière-Ref10 ont une EPS supérieure à ce seuil. Cependant, malgré une valeur calculée pour toutes les observations de 0,95, on remarque que la chronologie présente des périodes de représentativité insuffisante. Celles-ci sont pratiquement comblées avec l'ajout de 5 bois supplémentaires pour constituer Brière-Ref11. Seule la période encadrant le stress de -1130 reste déficitaire. Enfin, avec 30 composantes et une EPS, calculée sur tous les cernes, égale à 0,97, la chronologie Brière-Ref9 ne comporte plus de lacune de représentativité qu'à ses extrémités.

Le nombre total de séries suffisantes pour obtenir une valeur d'EPS justifiant la représentativité de la chronologie sur toutes les périodes est donc égale à 30. Il ne faut pas perdre de vue que ces séries ont été sélectionnées parmi les autres sur la qualité de leur synchronisme. Ceci augmente nettement leur représentativité. Lors de la constitution de chronologies en fonction des échantillonnages, 54 séries intégrées à BrièreM28 permettaient d'obtenir ce résultat mais pas celui de la datation (VISSET *et al.* 1994).

La chronologie complète comporte une information de quantité beaucoup plus importante. Le nombre de séries chevauchantes de 30 ans au moins atteint progressivement la valeur de 45 vers -1298. La corrélation moyenne localement inférieure à 0,30, concordante avec le faible nombre de séries, se traduit par une période de représentativité insuffisante de la chronologie jusqu'en -1298. Pour les mêmes raisons, à partir de -1008, l'EPS est inférieure à 0,85.

En dehors de ces périodes, la corrélation moyenne oscille faiblement autour de 0,4. La péjoration du synchronisme autour du stress de -1130 observée pour les chronologies homogénéisées n'est plus remarquable. La corrélation entre les séries sur cette période n'est donc pas plus faible si elle est comparée à celle entre toutes les séries dans les autres périodes. La chronologie est très représentative de la croissance de la population dont sont issus les arbres entre -1298 et -1008.



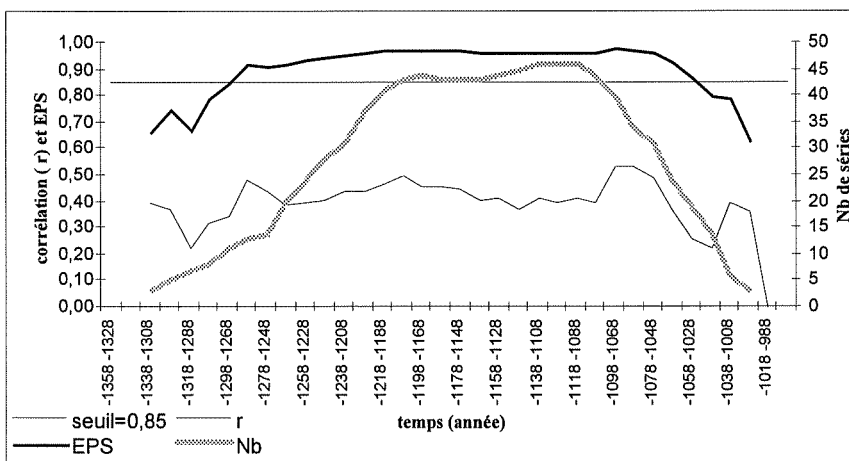
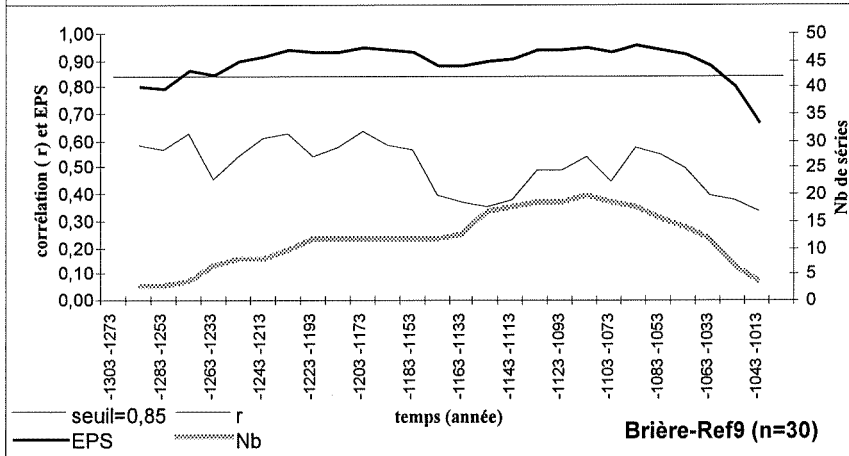
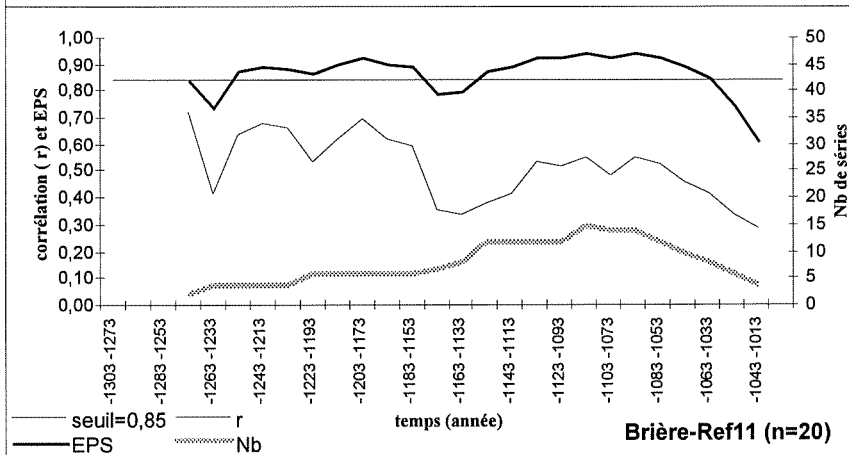
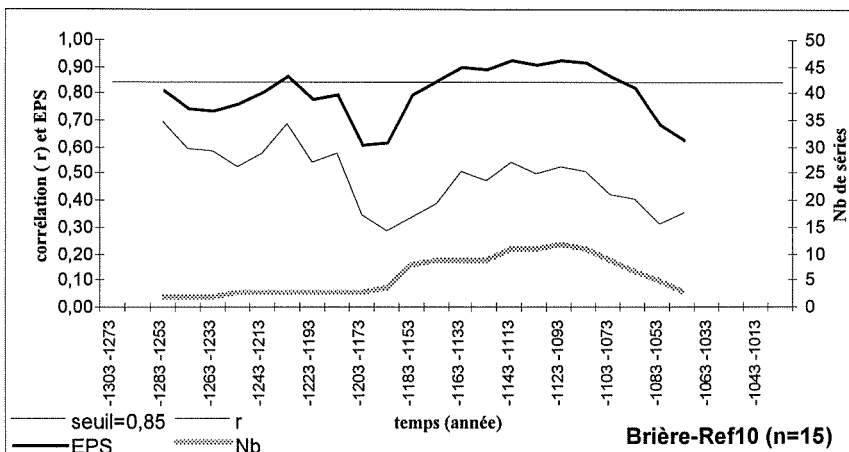


Figure 129 : corrélation moyenne, nombre de séries chevauchantes et EPS en fonction du temps des chronologies brièronnes. Fenêtres de 30 ans décalées de 10 ans, nombre minimum de cernes 30.

## 6.4 Représentativité régionale en fonction du temps

Du fait de l'éloignement des sites à dater et des différences biogéographiques entre les zones d'où proviennent les arbres, les références ne sont qu'imparfaitement représentatives du signal régional présent dans les chronologies brièronnes. La qualité de la datation à longue distance révèle l'influence de facteurs très généraux sur la croissance. Ces facteurs ont une influence suffisante pour que le synchronisme entre les croissances soit assuré en utilisant toutes les observations disponibles. Le coefficient de corrélation est calculé entre les chronologies brièronnes et les références en position synchrone pour une fenêtre de 80 ans décalée d'année en année. Les fonctions obtenues montrent que, selon les périodes, le synchronisme varie fortement. Les valeurs extrêmes observées sont 0,48 et 0,05 (fig. 130).

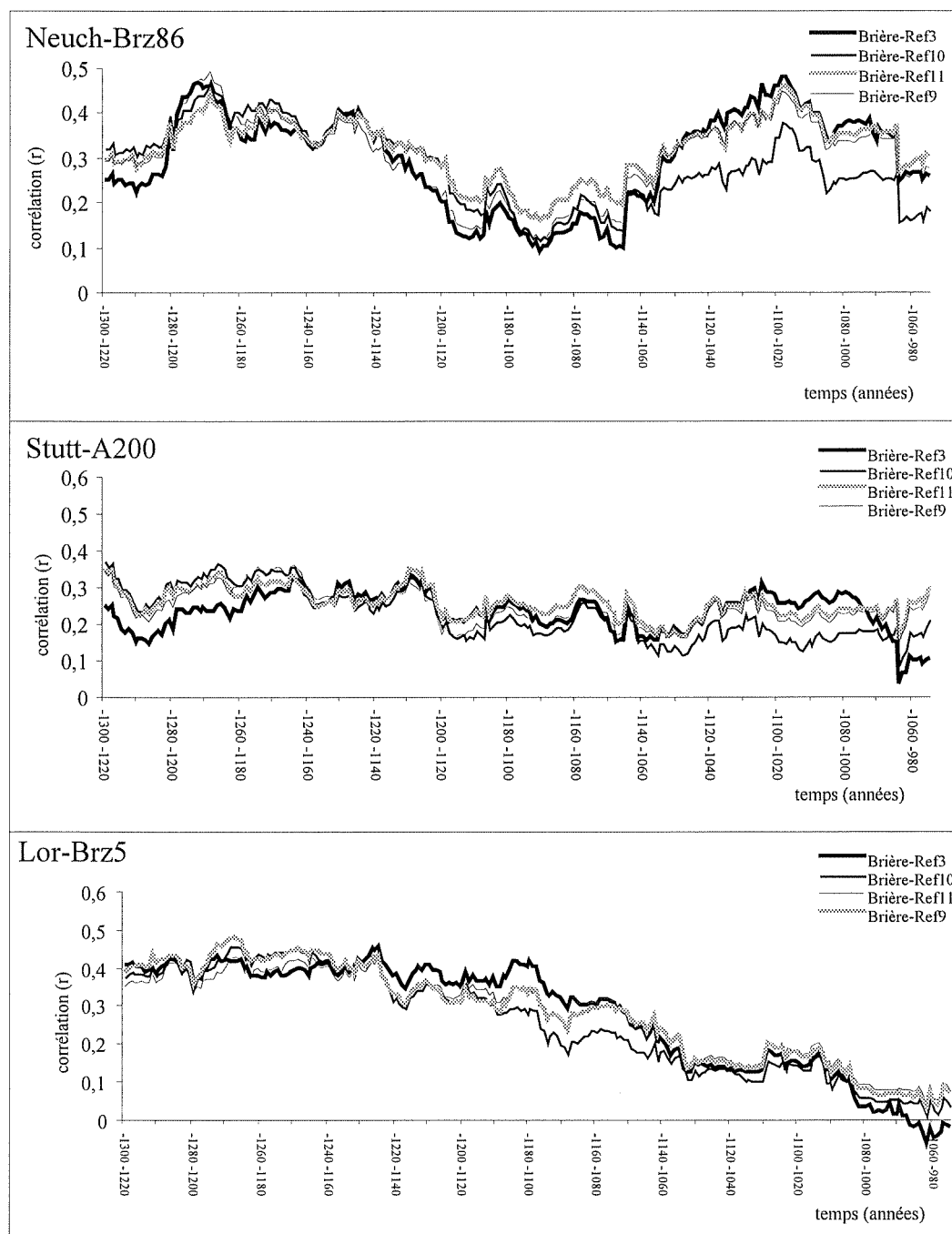


Figure 130 : corrélation entre les chronologies brièronnes et les références en fonction du temps (fenêtre de 80 ans décalée d'année en année)

---

La référence Lor-Brz5 livre les résultats de synchronisme les plus élevés en considérant tous les cernes. En fonction du temps, la corrélation est très voisine quelle que soit la chronologie brièronne et oscille autour de 0,4 depuis -1300 jusque vers -1100. A cette date, Brière-Ref3 corrèle plus fortement avec la référence. Ensuite le coefficient se dégrade pour atteindre des valeurs très faibles à la fin de la chronologie, vers -1000. Il faut mettre en rapport cette forte diminution avec la composition de Lor-Brz5. La référence est insuffisamment représentative à partir de -1159 jusqu'en -1039 (cf. chap.2 4.4). L'apport en séries du site de Bréban à partir de -1039 ne se traduit pas par une amélioration de la corrélation.

Pendant la période -1300 -1100, où représentation et qualité du signal sont satisfaisantes pour les chronologies brièronnes et lorraines, le synchronisme est le plus élevé et le plus stable observé.

Les références de Neuchâtel, Haut-RP et Neuch-Brz86, livrent des résultats similaires. Entre les chronologies brièronnes et Neuch-Brz86, la corrélation est comprise entre 0,3 et 0,45 de -1300 à -1120. A cette date, le synchronisme entre Brière-Ref3 et cette référence se dégrade fortement jusque vers -1060. Les chronologies homogénéisées, Brière-Ref10 et Ref11, permettent d'améliorer les coefficients mais les valeurs restent inférieures à 0,3 jusqu'à la fenêtre -1140 -1060. Celle-ci exclut le stress de -1130. Il est possible d'attribuer une part de la péjoration de la corrélation à cette année et à un cerne étroit observé en -1161 sur les chronologies brièronnes mais pas sur les références de Neuchâtel. Les périodes de recouvrement qu'induisent ces stresses participent aussi à la baisse de la corrélation. La fin de la chronologie est caractérisée par un synchronisme retrouvant des valeurs du coefficient entre 0,3 et 0,45. L'homogénéisation de Brière-Ref3 conduit cette fois à une perte de synchronisme.

La référence Stutt-A200 livre des résultats en moyenne plus faible, compris entre 0,2 et 0,35. Pendant la période où les chronologies se singularisent de Neuch-Brz86, les coefficients évoluent peu.

L'homogénéisation permet d'améliorer localement le synchronisme entre les chronologies à dater et les références. Cependant, pour certaines périodes, elle induit une perte d'information globale dans la série. En utilisant tous les cernes, le gain est, d'une façon générale, positif. Un effet identique est observé lors de la construction de Lor-Brz5 (cf. chap.2 4.4).

La perte des échantillons est importante : il y a donc des périodes pour lesquelles le bruit se trouve moins maîtrisé. De plus, la sélection des composantes repose sur toute la série mesurée. Or il est probable que la capacité d'enregistreur des facteurs généraux par l'arbre varie dans le temps, soit sous l'influence de l'âge soit après un stress particulier. Nous avons retiré une part de cette influence après le stress de -1130 mais d'une façon plus générale, la sélection devrait pouvoir être réalisée en tenant compte du temps. JANSMA (1995) propose pour y parvenir, d'extraire des chronologies des séquences de séries de 50 ans qui ne corrèleraient pas avec le reste de la population avec un coefficient au moins égal à 0,32.

La corrélation entre les références médio-continentales et la chronologie brièronne sous influence atlantique marquée peut être dégagée. Elle subit des variations en fonction du temps qui ne sont pas observées sur toutes les références. Certaines sont explicables par le manque d'information. Les autres trouvent leur source dans la grande diversité du matériel. Toutefois, il reste possible, ici également, de montrer que le synchronisme entre les croissances suit l'axe principal de diversité biogéographique.

---

## 7 Conclusion du chapitre

En France, dans les périodes préhistoriques et protohistoriques, les découvertes de matériel datable par dendrochronologie sont très dispersées. En dehors des zones alpines (EDOUARD *et al.* 1992), les sites de basse altitude sont mis au jour dans trois situations : en contextes lacustres, alluviaux et littoraux. Les premières chronologies préhistoriques rattachées à la croissance actuelle, qui ont permis le développement de la dendrochronologie en dehors des périodes historiques en France, sont issues de sites localisés sur les berges des lacs péri-alpins du Jura (LAMBERT et LAVIER 1989) et de Savoie (BECKER *et al.* 1985). Ces berges sont densément habitées à la fin du Néolithique. Dans le Jura, les éléments de construction permettent d'établir une chronologie qui s'étend aujourd'hui de -3659 à -2916 avec une lacune de 174 cernes (LAVIER 1996, VIELLET 1997). L'occupation des berges des lacs à l'âge du Bronze final est plus brève. Dans le Jura, les lacs français n'ont pas livré suffisamment de matériel pour élaborer une référence. Un potentiel en bois est probablement encore non exploité. La pirogue Chalain-Marigny 1904/F-10, en serait un témoin. Par contre, les lacs suisses ont livré du matériel permettant au Laboratoire de Neuchâtel de construire des chronologies très riches en échantillons s'étendant de -1450 à -850 (EGGER *et al.* 1985). 7 sites de l'est de la France sont datés individuellement sur ces références et celles d'Allemagne du sud.

5 d'entre eux sont issus de contextes alluviaux des vallées de la Saône, de la Meuse, de la Meurthe et de la Moselle. Les dépôts de bois alluviaux constituent probablement un potentiel de bois préhistoriques et protohistoriques également sous-exploité. Le dépôt des bois dans ce contexte peut avoir une origine anthropique ou naturelle. Les sites archéologiques sont assez nombreux mais quelques uns seulement présentent des fosses ou des puits cuvelés assez profonds pour que le bois reste immergé dans la nappe et se conserve, comme à Vandières (54) ou Bréban (10). Sur ce matériel, la pression d'aménagement est assez forte dans des régions comme l'Ile-de-France et sur les tracés d'autoroutes. Les études sont engagées, mais les restes découverts sont souvent trop erratiques pour être datés. Une chronologie Néolithique s'étendant de -3228 à 2708 a toutefois récemment pu être constituée à partir de matériel provenant du site d'habitat de Paris-Bercy (75) et de bois des vallées de la Seine et de l'Oise (BERNARD 1997). La pression d'aménagement est également très forte sur le matériel en dépôt naturel via l'exploitation des granulats, mais la prise en charge de ce matériel ne fait l'objet d'aucune législation et on peut penser qu'une part importante est perdue.

Les marais littoraux ayant été, un temps, dépendants du niveau marin, constituent la troisième source de bois préhistoriques et protohistoriques. Ces milieux subissent une pression d'aménagement moindre. Certains, comme les marais de Brière, sont gérés en concertation par plusieurs entités (Syndicat Mixte pour l'Aménagement Hydraulique du Bassin du Brivet et Parc Naturel Régional de Brière). La plupart sont à vocation agricole. Les dépôts de bois sont principalement naturels. Très peu de structures archéologiques ont livré des bois antérieurs à la période gallo-romaine sur le littoral. Toutefois, une étude ancienne, menée en 1880 par KERVILER, lors de l'aménagement de bassins dans le port de Saint Nazaire, indique une pirogue associée à du matériel de l'âge du Bronze (DEVALS 1995). Les études menées actuellement à la suite du dragage du cours du haut Brivet (DEVALS 1995, 1997) mettent également en évidence une grande quantité de matériel de l'âge du Bronze (MARTINEAU 1997). Deux pirogues datées, par 14C, de [1595-1307] BC (A-9242) et [1311-1002] BC (A-9253) peuvent y être associées. Il faut également noter la présence d'artefacts du Néolithique dont des bois travaillés datés de [4760-4465] BC (A-9250). La croissance de ceux-ci peut être synchronisée à celle des arbres en dépôt naturel du marais du Haut Brivet. Plus de 30 pirogues de périodes historiques sont également identifiées. L'étude

---

dendrochronologique de ce matériel est en cours (GIRARDCLOS *et al.* 1997).

Les dépôts naturels de troncs dans les marais littoraux contrastent très nettement avec tous les autres contextes de conservation des bois préhistoriques et protohistoriques car ils représentent un potentiel en nombre de pièces localement très élevé. Sauf exceptions, les sites archéologiques et les bois naturels en contextes alluviaux livrent au plus 30 pièces par période. En plusieurs localisations dans les marais de Brière, plus d'une centaine de troncs ont été observés. Une prospection dans le marais de Pontorson (50), jouxtant la baie du Mont Saint Michel, révèle également la présence de plus de 50 troncs. Ces découvertes ne sont pas isolées, plusieurs "forêts submergées", dont l'extension exacte mérite toutefois vérification, sont signalées dès la fin du XIXe siècle (PRIGENT 1977).

L'étude des bois découverts en faible quantité n'a pu aboutir à une chronologie que dans l'est de la France. La référence, dans un premier temps, a été construite avec du matériel très dispersé (EF-Brz1 LAVIER non publié, EF-Brz2 GIRARDCLOS *et al.* 1996). La mise en commun des données acquises en Lorraine par les laboratoires de Bohlingen et Besançon nous a permis ensuite de construire Lor-Brz4 et Lor-Brz5. La corrélation entre les deux versions de la référence et les étalons des lacs suisses et du sud de l'Allemagne est significative à un risque d'erreur près extrêmement faible.

Les sites localisés plus à l'ouest (fig. 3) restent non datés car les chronologies obtenues ne comportent pas assez d'échantillons ni de cernes pour être représentatives de l'influence de facteurs régionaux. La seule alternative pour obtenir cette information est d'analyser un lot d'arbres contemporains assez important, sans que de nombre minimal puisse être défini.

La possibilité de constituer un ensemble assez vaste d'individus pouvant être supposés contemporains existe en Brière dans les secteurs d'Ile d'Errand et d'Ile Clidan. En effet, les études palynologiques et les datations 14C permettent de rattacher les troncs en Brière à deux générations (VISSET 1982). La première génération est difficilement accessible dans la stratigraphie. Elle s'étend sur une période que l'on peut estimer assez brève. En Brière même, elle est située entre -2800 et -2200 (cf. partie 1) (VISSET 1979, 1982). Trois dates 14C : [4759-4349] BC (A-9365), [4544-4153] BC (A-9366) et [3691-3341] BC (A-9367) montrent que la période est beaucoup plus longue et plus ancienne dans le marais du Haut Brivet où les arbres de cette génération ont été atteints par les dragages. La datation dendrochronologique de ce matériel est restée négative car pour une période donnée nous ne pouvons réunir suffisamment de séries. La seconde génération est accessible en grande quantité à Ile d'Errand et à Ile Clidan, car les arbres sont repérables grâce aux variations de l'état de la végétation en septembre. De plus, cette génération a un développement limité dans le temps qui permet d'espérer obtenir des séries contemporaines. 5 datations 14C, réalisées après le montage dendrochronologique, dont la fourchette la plus grande après calibration est [1410-840] BC (cf. partie 1), ont permis de le montrer. La disponibilité du matériel à Ile d'Errand et Ile Clidan répond donc particulièrement bien aux contraintes imposées par la datation sur des références très éloignées. L'intérêt de l'analyse dendrochronologique de ces mortas réside, bien entendu, en partie dans ces possibilités. L'intérêt principal reste cependant la possibilité de répondre aux interrogations posées par les analyses palynologiques en Brière et d'une façon plus générale par l'apport paléo-écologique de la datation dendrochronologique d'un épisode régressif dans le marais (partie 4).

La nécessité de disposer de beaucoup de séries pour une période donnée a une conséquence sur la longueur de la chronologie construite. Les longues chronologies des laboratoires de Stuttgart (BECKER 1985) ou Belfast (BROWN *et al.* 1986) ont été construites en parallèle avec l'établissement des courbes de calibration des dates 14C. En effet, un usage

---

intensif des datations 14C permet de limiter le nombre de bois analysés par période. La construction des chronologies n'était alors pas totalement indépendante, mais ensuite, grâce au synchronisme entre les étalons construits dans des zones biogéographiques différentes, l'indépendance des résultats a été assurée (LEUSCHNER 1992). Ce développement extensif des chronologies du Chêne dans la préhistoire a pu être réalisé dans les régions où les études des bois subfossiles sont les plus développées. La construction de la référence brièronne, montrent que les marais littoraux français représentent un potentiel en nombre d'individus suffisant pour que la datation soit engagée à longue distance. De plus, la répartition dans le temps des restes peut être soutenue par plusieurs datations 14C. Le matériel subfossile littoral semble donc constituer un potentiel de premier ordre pour la construction d'une longue référence du Chêne.

L'éloignement du site à dater par rapport aux références utilisées ainsi que les caractéristiques biogéographiques très différentes des zones de provenance des bois impliquent que le synchronisme dégagé est lié à l'influence de facteurs généraux sur la croissance. Cette situation doit être considérée très défavorable. La plupart des développements de chronologies sont réalisés dans les zones limitrophes de celles qui sont déjà étalonnées. Ceci explique que le développement, en France, ait débuté dans l'est, par la construction de références comme Bourgogne29 (LAMBERT et LAVIER 1992a). Pour les périodes historiques, l'extension des chronologies vers l'ouest (LAMBERT *et al.* 1996) est abouti dans le Bassin Parisien (BERNARD 1997) et dans la moyenne et basse vallée de la Loire (DOUCERAIN et GIRARDCLOS 1998) ainsi qu'en Aquitaine par SZEPERTISKI (LAMBERT *et al.* 1996). La distribution très lacunaire du matériel protohistorique et préhistorique ne permet pas de se rattacher directement à ces références.

La situation défavorable de datation nous a incité à développer la méthode employée pour rechercher les synchronismes au delà des routines utilisées de façon intensive dans les zones biogéographiques étalonnées. Classiquement, dans notre laboratoire, les meilleurs résultats des estimateurs du synchronisme sont transformés en classes. Une figure qui montre la qualité de la datation sur les étalons utilisés est construite avec ces classes (cf. fig. 61). Le procédé permet de montrer d'éventuelles propositions de dates concurrentes. Les étalons utilisés sont référencés, ce qui indique les collaborations engagées avec les autres laboratoires. Les différences de "réponse" de ces étalons ou de chronologies moyennes plus locales peuvent être comparées. Nous avons proposé de représenter tous les résultats de synchronisme positifs de façon à mieux montrer comment la position de chevauchement choisie se dégage de tous les calculs. Cette représentation permet également d'observer les effets de l'autocorrélation induite par la standardisation sur la répartition dans le temps des coefficients. La représentation est probablement moins apte à décrire le résultat pour un utilisateur de la dendrochronologie mais elle est plus apte à montrer à l'opérateur l'ampleur relative des coefficients choisis.

Les classes de coefficients présentées sont représentatives de risques d'erreur croissants. Le calcul du risque n'entre pas directement en jeu dans la sélection des résultats. Le choix repose sur des seuils empiriques établis directement avec les valeurs des coefficients. L'expérience de l'opérateur est basée sur l'ordre de grandeur de ces coefficients et de nombreuses informations qui ne peuvent être prises en compte dans le calcul. Il considère l'effet de jeunesse, une déformation individuelle, un décalage de représentativité entre une série et un groupe, l'existence de valeurs extrêmes... La décision de la position de synchronisme comporte une part de subjectivité dont la comparaison des croissances sur la table lumineuse est le support principal. Certaines positions sont ainsi retenues alors que le coefficient correspondant n'est pas le plus élevé. Cependant, la mesure de la qualité du

---

synchronisme retenu peut, dans un second temps, ne plus souffrir de subjectivité. 3 procédures permettent une estimation du risque d'erreur. Nous pouvons montrer, en utilisant celle décrite par ORTON (1984), que les seuils empiriques des coefficients reviennent à admettre comme acquise une date dont le risque directement lu dans la table est inférieur à l'inverse de la période de recherche, ce qui est très souvent le cas. MUNRO (1984) propose, en plus, de tenir compte de la distribution des N coefficients calculés, ce qu'exprime graphiquement la représentation de tous les coefficients positifs. Ce risque estimé en tenant compte des conditions de calcul semble, face aux expériences de datation menées, utilisable à un seuil de 5%. Les valeurs ainsi produites ne souffrent plus de difficultés d'appréciation comme dans le cas des valeurs très faibles directement lues dans les tables. De ce fait, elles peuvent être associées à la publication du résultat.

Les expériences de datation réalisées en fonction de la distance géographique montrent que la qualité des coefficients se dégrade progressivement le long d'un gradient biogéographique (FRITTS 1976, HOLLSTEIN 1980). La cohésion de l'influence de facteurs généraux sur la croissance des chênes reste toutefois suffisante pour que des chronologies provenant des zones biogéographiques atlantiques et médio-continentales de l'Europe némorale, soient synchronisées. KELLY *et al.* (1989) montrent que des signatures se retrouvent dans la croissance de 39 populations réparties entre 10° ouest et 10° est de longitude et 45° nord et 55° nord de latitude. Pour une période d'étude de 120 ans, comprise entre 1851 et 1970, ils dénombrent 20 années caractéristiques. Dans 10 cas, la variation entre une année et sa suivante est positive pour 80% au moins des séries. Dans 10 cas également, les variations négatives sont concordantes. La cohésion de l'influence des facteurs généraux sur la croissance a également permis de vérifier la continuité des longues références (PILCHER *et al.* 1984). Le synchronisme peut être dégagé entre des séquences de 400 ans des références médio-continentales et atlantiques (BECKER *et al.* 1985). Pour obtenir une représentation régionale, environ 30 cernes par an et 400 cernes semblent nécessaires. La première approche que nous avons eue pour dater les mortas de Brière est donc de constituer, pour un groupe d'arbres relativement contemporains, par agglomération progressive, un segment de référence répondant aux critères pour être synchronisée à longue distance.

Brière-Ref3 est longue de 385 cernes. Elle est constituée en moyenne de 30 cernes par an. La datation de cette chronologie est significative sur la référence Lor-Brz5, elle-même fortement corrélée à Stutt-A200. Ce résultat montre qu'une chronologie soumise à une influence semi-continentale, intermédiaire dans le gradient principal de diversité biogéographique est nécessaire pour réaliser la synchronisation dans ces conditions.

Il apparaît que pour les synchroniser à longue distance, il est nécessaire d'optimiser dans les chronologies le signal lié à l'influence des facteurs généraux.

Plus le nombre de séries intégrées à une chronologie est grand, plus la moyenne est représentative de la croissance de la population dont sont issus les arbres mais plus elle intègre des séries qui présentent des variations qui leur sont propres. L'Express Population Signal (BRIFFA et JONES 1990) permet de juger, pour chaque intégration, de l'évolution de la corrélation entre les composantes par rapport au nombre de séries. Ce paramètre exprime ainsi la qualité avec laquelle la chronologie représente la croissance de la population échantillonnée. Optimiser l'EPS revient à obtenir la chronologie la plus représentative de la population. Cependant il n'y a pas de lien entre la qualité de la représentation et les facteurs qui sont responsables du lien entre les croissances.

Le signal produit par l'influence des facteurs régionaux et locaux peut être jugé commun aux arbres analysés. La matrice de corrélation entre toutes les composantes permet d'ordonner les séries en fonction de leur lien avec toutes les autres. La sélection des

---

croissances les plus synchrones permet d'obtenir, pour une représentation donnée, des chronologies moyennes dont les paramètres, taux d'années caractéristiques et corrélation moyenne entre les séries individuelles sont plus élevés que pour la moyenne complète. La moyenne est homogénéisée. Selon le nombre de séries intégrées, plus ou moins de signal commun est considéré. Les datations, réalisées ici, des chronologies homogénéisées sont au moins de qualité équivalente à celles des séries complètes. Dans le cas des chronologies Brièronnes, le résultat est nettement amélioré. L'homogénéisation ne se traduit pas par un signal singularisé. Ceci tend à montrer que, pour ces exemples, les chronologies homogénéisées sont une meilleure représentation de l'influence régionale sur la croissance que la chronologie moyenne complète.

La relation entre la croissance et les facteurs est ainsi plus considérée sous l'angle de la population. Certains arbres, suite aux influences particulières des facteurs individuels, internes ou des facteurs locaux, apportent, à la chronologie synthétique une information liée à l'influence de facteur qui leur sont propres. La procédure proposée permettrait de sélectionner les arbres dont la croissance est la plus directement représentative de ce type d'influence. Les résultats montrent, de plus, que l'influence des facteurs sur la croissance n'est pas constante dans le temps. La procédure d'homogénéisation devra donc intégrer cette dimension.

Le synchronisme entre les chronologies brièronnes homogénéisées et les références de Stuttgart et Neuchâtel est significatif. La corrélation est plus élevée avec la référence de Lorraine. L'information utilisée pour synchroniser les séries à longue distance est de haute fréquence. Toutefois les résultats sont de qualité supérieure si la standardisation permet de conserver une information de période inférieure à au moins 7 ans. La conservation du signal dont la période atteint 13 ans induit même une augmentation du synchronisme avec la référence lorraine. On peut donc supposer que le signal conservé est commun à des arbres qui proviennent d'une vaste surface. Le modèle de la croissance proposé par GRAYBILL intègre ce signal dans le terme  $\partial D2t$ . Cependant lorsque le nombre d'observations sur lequel porte la standardisation est augmenté, de la tendance est conservée quelle que soit sa source. Le choix de ce nombre ne peut donc être considéré fixe. Moins ajuster le modèle peut revenir à introduire de la tendance propre aux individus ( $\partial D1t$  dans le modèle de GRAYBILL) pour d'autres lots. Il apparaît donc important d'utiliser des standardisations plus "adaptatives" dont l'intérêt est testé par l'augmentation de la qualité du synchronisme.

La qualité du synchronisme suit le gradient principal de diversité biogéographique mais l'optimisation du signal lié à l'influence des facteurs globaux permet de dater une chronologie représentative de la croissance des chênes de la basse vallée de la Loire sur des références très éloignées représentatives de conditions médio-continentales. Ce résultat est déjà exposé pour les périodes historiques (DOUCERAIN et GIRARDCLOS 1998).

Les résultats obtenus ici sont, en partie, liés aux conditions de développement particulières des chênes. Des chronologies réalisées en fonction de la localisation des troncs montrent, en effet, que selon les milieux de développement, la datation à longue distance est de plus ou moins bonne qualité. Cependant, ces procédures peuvent aider à mieux exploiter le potentiel de bois protohistoriques et préhistoriques que représentent les mortas et d'une façon plus générale à construire des références dont la composition est plus dynamique, dont les séries et les standardisations utilisées sont plus facilement modifiées qu'à l'heure actuelle.





## Partie 3



---

## Introduction

Les arbres qui ont été datés sont découverts dans des conditions de milieu qui sont particulières pour des chênes. Les observations sédimentologiques et palynologiques permettent de montrer que ceux-ci se sont développés sur des sols tourbeux épais de 1,5 à 2 m. Les représentations polliniques montrent que le niveau de la nappe phréatique subit des variations qui conditionnent l'évolution des peuplements de la cuvette (VISSET *et al.* 1994). Les auteurs qui ont analysés du matériel analogue, dans les îles britanniques et en Basse Saxe, indiquent que la croissance est caractérisée par des séquences de cernes minces contemporains sur la quasi totalité des individus (PILCHER *et al.* 1996, LEUSCHNER 1992). Les conditions édaphiques sont fortement dépendantes de l'hydromorphie et sur la base de données palynologiques et sédimentaires, ces auteurs proposent d'expliquer ces séquences de cernes minces par des montées de la nappe dans le sol qui induiraient une asphyxie racinaire.

Dans les îles britanniques et en Basse Saxe, les marais qui ont fourni les troncs subfossiles ne sont plus boisés en Chêne. Il n'existe donc plus de peuplements analogues de ceux dont témoignent les mortas et leurs équivalents. En Brière, le boisement est également très faible, cependant de jeunes chênes pédonculés se développent sur des sols tourbeux épais. Ces arbres forment, à partir d'anciennes haies, des unités encore immatures très dynamiques. Toutefois, les séries de cernes qu'ils ont fourni peuvent être synchronisées avec celles provenant d'arbres inclus dans des formations forestières plus stables et présentent un lien avec des facteurs climatiques. De plus, ces séries peuvent être comparées à l'enregistrement de la variation du niveau d'eau réalisé en Grande Brière. Les chronologies doivent être testées et homogénéisées ce qui permet d'utiliser les méthodes développées précédemment pour le matériel ancien dans des conditions où la recherche de synchronisme n'est pas nécessaire.

L'étude dendroécologique a pour objectif de décrire les conditions de développement des chênes dans des zones où l'hydromorphie du sol est une contrainte d'intensité variable. Le rapport entre ces conditions et les séries de cernes est ensuite testé, puis la relation entre la croissance et le niveau d'eau en Grande Brière ainsi que les variables climatiques est analysée.



---

# Chapitre 1

## DONNÉES CLIMATIQUES ET DE VARIATIONS DU NIVEAU D'EAU

### I Climat

Les données climatiques mensuelles utilisées (température moyenne, précipitations et évapotranspiration de Penman) ont été gracieusement communiquées par la station météorologique Météo France de Nantes-Bouguenais.

Les marais de Brière sont situés dans la zone agroclimatique 9 (CHOISNEL et PAYEN 1989) qui regroupe la Bretagne orientale et méridionale, le pays nantais et la Vendée (cf. fig. 12 partie 1). Ce climat régional est caractérisé par des précipitations estivales faibles et une bonne insolation.

#### 1 Précipitations

Les données des postes météorologiques suivants sont utilisées pour caractériser le climat dont dépendent les arbres analysés en Brière. La station de Saint Nazaire (Chemoulin) est localisée sur le littoral à l'extrémité de l'embouchure de l'estuaire. Montoir-de-Bretagne se

situé sur le bourrelet alluvial séparant la Brière de la Loire. Campbon, proche du sillon de Bretagne, est la station la plus élevée en altitude (60 m) et Bouguenais, proche de Nantes, est la plus éloignée du littoral.

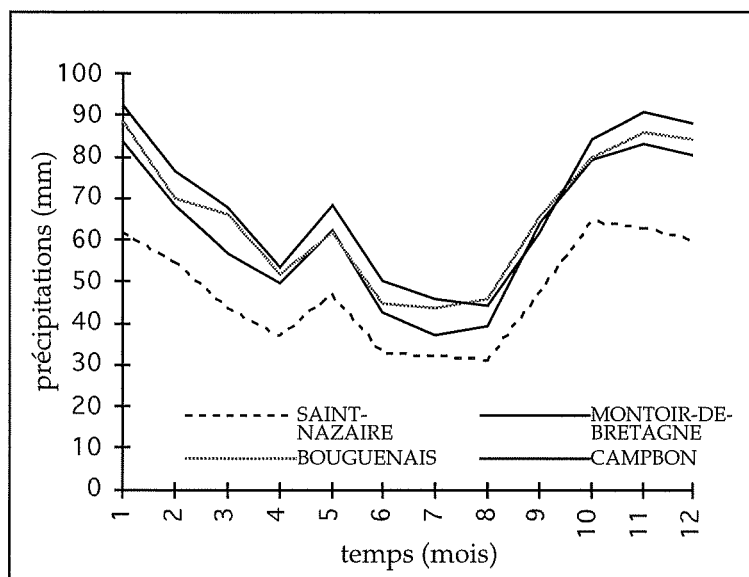


Figure 131 : répartition annuelle des précipitations. Moyenne sur la période 1961-1995, sauf Campbon : 1961-1990. Données Météo France Bouguenais.

La répartition des précipitations au cours de l'année montre nettement un minimum au mois de juillet et un maximum au mois de novembre typique des climats océaniques (cf. partie 1) (fig. 131). Un maximum secondaire est observé au mois de mai. La répartition des précipitations est très similaire pour les 4 stations, du littoral à Nantes ou à Campbon sur les premiers reliefs. Par contre, la hauteur des précipitations est assez variable entre les postes. Les quantités les plus faibles sont observées sur le littoral et les plus élevées sur les hauteurs de l'arrière-pays. Le total annuel est en moyenne de 575 mm à Saint Nazaire, de 747 et 788 mm à Montoir et Bouguenais et 824 mm à Campbon. Les précipitations en Brière apparaissent intermédiaires dans ce gradient, les relevés à Saint Joachim, sur la période de 1976 à 1995, indiquant un cumul annuel moyen de 786 mm. Toutefois, le bassin versant du Brivet inclut une part des reliefs du sillon de Bretagne au delà même de Campbon et se trouve assez inégalement arrosé.

La variabilité interannuelle des précipitations est assez importante. L'écart-type du cumul sur l'année pour la période 1961-1995 (sauf Campbon : 1961-1990) est compris entre 154 mm à Campbon et 106 mm à Saint Nazaire. Il représente entre 16 % à Bouguenais et 18% à Campbon de la moyenne. La variabilité n'est pas significativement différente entre les stations.

Les variations interannuelles des précipitations mensuelles sont homogènes entre les 4 stations précédentes ainsi qu'avec celle de Pontchâteau. Pour tous les mois sauf juin, juillet, août, le coefficient de corrélation entre les séries est en moyenne supérieur à 0,9 (tab. 51). Le climat régional présente donc une grande cohésion dans la variation entre les années. Les coefficients inter-station de juillet et août indiquent que les effets locaux sont cependant plus marqués en été. La baisse de la corrélation affecte les relations entre toutes les stations. La cohésion est donc plus faible sans qu'une station n'apparaisse particulière.

Bouguenais Montoir Pontchâteau St Nazaire Savenais					Bouguenais Montoir Pontchâteau St Nazaire Savenais						
janvier	0,93				février	0,98					
Bou1		0,98	0,95	0,94	0,91	Bou2		0,98	0,98	0,99	0,97
Mont1	0,98		0,97	0,92	0,92	Mont2	0,98		0,99	0,99	0,99
Pont1	0,95	0,97		0,91	0,95	Pont2	0,98	0,99		0,99	0,98
Naz1	0,94	0,92	0,91		0,86	Naz2	0,99	0,99	0,99		0,97
Sav1	0,91	0,92	0,95	0,86		Sav2	0,97	0,99	0,98	0,97	
mars	0,89				avril	0,94					
Bou3		0,84	0,86	0,85	0,82	Bou4		0,93	0,94	0,94	0,93
Mont3	0,84		0,96	0,95	0,88	Mont4	0,93		0,96	0,95	0,91
Pont3	0,86	0,96		0,92	0,92	Pont4	0,94	0,96		0,96	0,94
Naz3	0,85	0,95	0,92		0,88	Naz4	0,94	0,95	0,96		0,92
Sav3	0,82	0,88	0,92	0,88		Sav4	0,93	0,91	0,94	0,92	
mai	0,91				juin	0,84					
Bou5		0,92	0,90	0,83	0,92	Bou6		0,76	0,76	0,79	0,68
Mont5	0,92		0,95	0,90	0,92	Mont6	0,76		0,94	0,91	0,86
Pont5	0,90	0,95		0,92	0,96	Pont6	0,76	0,94		0,91	0,91
Naz5	0,83	0,90	0,92		0,89	Naz6	0,79	0,91	0,91		0,89
Sav5	0,92	0,92	0,96	0,89		Sav6	0,68	0,86	0,91	0,89	
juillet	0,77				août	0,74					
Bou7		0,74	0,65	0,73	0,87	Bou8		0,84	0,63	0,62	0,78
Mont7	0,74		0,87	0,76	0,73	Mont8	0,84		0,80	0,63	0,86
Pont7	0,65	0,87		0,80	0,72	Pont8	0,63	0,80		0,73	0,81
Naz7	0,73	0,76	0,80		0,80	Naz8	0,62	0,63	0,73		0,75
Sav7	0,87	0,73	0,72	0,80		Sav8	0,78	0,86	0,81	0,75	
septembre	0,90				octobre	0,94					
Bou9		0,87	0,80	0,84	0,82	Bou10		0,94	0,94	0,91	0,92
Mont9	0,87		0,94	0,95	0,94	Mont10	0,94		0,97	0,97	0,92
Pont9	0,80	0,94		0,92	0,93	Pont10	0,94	0,97		0,95	0,90
Naz9	0,84	0,95	0,92		0,93	Naz10	0,91	0,97	0,95		0,93
Sav9	0,82	0,94	0,93	0,93		Sav10	0,92	0,92	0,90	0,93	
novembre	0,89				décembre	0,91					
Bou11		0,86	0,85	0,85	0,88	Bou12		0,92	0,92	0,91	0,89
Mont11	0,86		0,96	0,92	0,90	Mont12	0,92		0,94	0,93	0,88
Pont11	0,85	0,96		0,90	0,93	Pont12	0,92	0,94		0,89	0,94
Naz11	0,85	0,92	0,90		0,88	Naz12	0,91	0,93	0,89		0,85
Sav11	0,88	0,90	0,93	0,88		Sav12	0,89	0,88	0,94	0,85	

Tableau 51 : coefficients de corrélation entre les précipitations mensuelles de 4 stations proches de la Brière. Gras : corrélation moyenne pour un mois. (période de calcul 1961-1995 sauf Campbon : 1961-1990)

## 2 Températures

Les températures moyennes mensuelles sont disponibles pour les postes de Bouguenais, Montoir et Saint Nazaire sur la période de 1961 à 1995. L'évolution au cours de l'année de la moyenne calculée pour cette période est très similaire entre les postes (fig. 132). La température moyenne annuelle est de 12,1°C à Saint Nazaire, de 12°C à Bouguenais et 11,8°C à Montoir. Ces valeurs douces reflètent l'influence de l'océan. Cet effet est également perceptible dans la différence entre les températures maximales, observées en juillet, et le minimum thermique de janvier. L'écart est le plus grand à Bouguenais, 13,7°C, de 12,9°C à Montoir et minimal sur le littoral à Saint Nazaire (12,2°C).

L'amplitude thermique journalière est aussi affectée par les vents marins. Elle est inférieure dans la zone côtière (MAGNANON 1991). Les températures minimales et maximales journalières relevées à Saint Joachim, au centre de la Brière, ont une amplitude encore plus faible que celle des stations côtières. La masse d'eau du marais induit une régulation mésoclimatique liée à son inertie thermique (MAGNANON 1991).



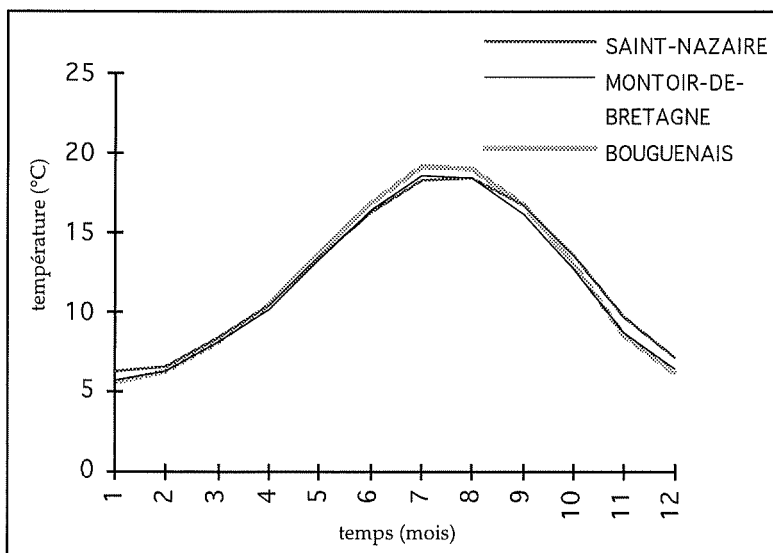


Figure 132 : évolution des températures moyennes mensuelles pour 3 stations proches de la Brière. Période de calcul 1961-1995

La variabilité interannuelle de la température est inférieure à celle des précipitations. Sur la période 1961-1995, l'écart-type de la température moyenne annuelle est proche de 0,7°C pour toutes les stations. Il représente entre 5,6 et 6,3% de la valeur moyenne. La variabilité est supérieure en hiver. L'écart-type atteint 10% de la moyenne entre octobre et mars. La régulation thermique de l'océan ou du marais n'induit pas une baisse de cette variabilité. L'écart-type représente la même part de la moyenne à Saint Joachim et à Saint Nazaire qu'à Montoir et Bouguenais. Cette observation peut être faite quelle que soit la saison, y compris pendant les périodes où le rôle régulateur de l'océan est le plus marqué, en été et en hiver.

Bouguenais Montoir St Nazaire				Bouguenais Montoir St Nazaire			
<b>janvier 0,98</b>				<b>février 0,98</b>			
Bou1		0,99	0,98	Bou2		0,98	0,98
Mont1	0,99		0,98	Mont2	0,98		0,98
Naz1	0,98	0,98		Naz2	0,98	0,98	
<b>mars 0,92</b>				<b>avril 0,92</b>			
Bou3		0,95	0,90	Bou4		0,92	0,91
Mont3	0,95		0,92	Mont4	0,92		0,93
Naz3	0,90	0,92		Naz4	0,91	0,93	
<b>mai 0,95</b>				<b>juin 0,92</b>			
Bou5		0,96	0,94	Bou6		0,93	0,90
Mont5	0,96		0,97	Mont6	0,93		0,93
Naz5	0,94	0,97		Naz6	0,90	0,93	
<b>juillet 0,94</b>				<b>août 0,95</b>			
Bou7		0,95	0,91	Bou8		0,95	0,93
Mont7	0,95		0,97	Mont8	0,95		0,97
Naz7	0,91	0,97		Naz8	0,93	0,97	
<b>septembre 0,95</b>				<b>octobre 0,95</b>			
Bou9		0,96	0,92	Bou10		0,94	0,95
Mont9	0,96		0,96	Mont10	0,94		0,95
Naz9	0,92	0,96		Naz10	0,95	0,95	
<b>novembre 0,95</b>				<b>décembre 0,98</b>			
Bou11		0,96	0,94	Bou12		0,98	0,96
Mont11	0,96		0,97	Mont12	0,98		0,98
Naz11	0,94	0,97		Naz12	0,96	0,98	

Tableau 52 : coefficients de corrélation entre les températures mensuelles de 3 stations proches de la Brière. Gras : corrélation moyenne pour un mois. (période de calcul 1961-1995)

Les variations interannuelles des températures mensuelles des trois postes sont très homogènes pour la période 1961-1995. Quel que soit le mois, le coefficient de corrélation entre les séries est toujours supérieur à 0,9 (tab. 52). Egalement, les températures relevées à Saint Joachim, pour la période 1976-1995, corrélaient fortement avec celles de ces postes.

Les températures et les précipitations corrélaient directement entre elles pendant les mois froids. Les coefficients moyens obtenus entre les séries des postes cités précédemment sont significatifs pour les mois de janvier, février, novembre et décembre (tab. 53). La relation est inverse pour les mois chauds. Les températures et précipitations des mois de mai et août sont significativement opposées. Il n'apparaît pas de différences importantes entre les stations.

	Bouguenais Montoir Saint Nazaire			Bouguenais Montoir Saint Nazaire			
janvier	0,42 t = 0,01			février	0,39 t = 0,01		
Cam1	0,44	0,49	0,42	Cam2	0,43	0,46	0,42
Bou1	0,44	0,49	0,43	Bou2	0,36	0,39	0,35
Mont1	0,41	0,45	0,38	Mont2	0,40	0,43	0,38
Pont1	0,37	0,41	0,34	Pont2	0,40	0,43	0,39
Naz1	0,43	0,48	0,40	Naz2	0,33	0,35	0,32
mars	-0,06			avril	0,03		
Cam3	-0,02	0,05	-0,21	Cam4	0,08	0,12	0,01
Bou3	-0,05	0,02	-0,17	Bou4	0,02	0,08	-0,03
Mont3	0,01	0,04	-0,22	Mont4	0,05	0,04	-0,07
Pont3	0,04	0,09	-0,18	Pont4	0,03	0,06	-0,05
Naz3	-0,03	0,01	-0,25	Naz4	0,03	0,07	-0,02
mai	-0,35 t = 0,04			juin	-0,22		
Cam5	-0,28	-0,34	-0,42	Cam6	-0,18	-0,19	-0,30
Bou5	-0,39	-0,45	-0,50	Bou6	-0,25	-0,25	-0,34
Mont5	-0,34	-0,41	-0,46	Mont6	-0,24	-0,24	-0,37
Pont5	-0,22	-0,29	-0,35	Pont6	-0,13	-0,14	-0,24
Naz5	-0,18	-0,25	-0,33	Naz6	-0,12	-0,13	-0,24
juillet	-0,11			août	-0,41 t = 0,01		
Cam7	-0,20	-0,15	-0,17	Cam8	-0,56	-0,56	-0,54
Bou7	-0,18	-0,09	-0,03	Bou8	-0,28	-0,29	-0,30
Mont7	-0,16	-0,14	-0,13	Mont8	-0,48	-0,53	-0,50
Pont7	-0,21	-0,19	-0,21	Pont8	-0,39	-0,38	-0,38
Naz7	-0,01	0,09	0,09	Naz8	-0,34	-0,29	-0,29
septembre	-0,28			octobre	0,05		
Cam9	-0,29	-0,29	-0,33	Cam10	0,00	0,22	0,02
Bou9	-0,24	-0,21	-0,29	Bou10	-0,04	0,19	0,02
Mont9	-0,25	-0,25	-0,31	Mont10	-0,04	0,17	-0,03
Pont9	-0,25	-0,24	-0,28	Pont10	-0,01	0,21	0,00
Naz9	-0,32	-0,30	-0,37	Naz10	-0,08	0,15	-0,06
novembre	0,40 t = 0,02			décembre	0,40 t = 0,02		
Cam11	0,45	0,50	0,39	Cam12	0,48	0,51	0,40
Bou11	0,35	0,39	0,31	Bou12	0,44	0,44	0,34
Mont11	0,45	0,46	0,36	Mont12	0,38	0,39	0,28
Pont11	0,46	0,49	0,40	Pont12	0,47	0,49	0,39
Naz11	0,31	0,38	0,26	Naz12	0,34	0,35	0,25

Tableau 53 : coefficients de corrélation entre les températures mensuelles de Bouguenais, Montoir, Saint Nazaire et les précipitations mensuelles des ces trois postes et ceux de Campbon et Pontchâteau. Gras : corrélation moyenne pour un mois (période de calcul 1961-1995). t : risque associé à un test de Student.

D'une façon générale, il apparaît donc que la position par rapport au littoral influence nettement les valeurs absolues des précipitations et des températures. De même le marais induit une régulation thermique. Ces différences dans la répartition spatiale des variables climatiques ne se retrouvent pas dans les variations en fonction du temps. L'importance de la variabilité interannuelle est similaire et le synchronisme des variables est très élevé pour toutes les stations.

L'étude de la relation entre les variables climatiques et la croissance des chênes est basée sur l'évolution dans le temps des variables. Les stations présentant des variations interannuelles proches, elles peuvent donc toutes représenter de façon convenable le climat régional dans le temps. Toutefois, les enregistrements de la station de Montoir sont les plus complets et le poste est le plus proche des peuplements analysés.

### 3 Bilan hydrique potentiel à Montoir-de-Bretagne

Le diagramme ombrothermique présente en parallèle l'évolution annuelle des températures et les précipitations de façon à déterminer les périodes de sécheresse. L'échelle de Gaussen ( $P=2T$ ) permet de situer le climat régional étudié par rapport aux autres grands types climatiques. A Montoir, pour la période comprise entre 1954 et 1995, il n'y a pas de mois sec au sens de Gaussen de façon moyenne (fig. 133). Toutefois, le mois de juillet ne reçoit en moyenne que 38,4 mm de précipitations pour une température de 18,5°C. Par ailleurs, un ou plusieurs mois secs selon Gaussen sont observés lors des années déficientes en précipitations. C'est par exemple le cas de 1989, dont les mois de mai à septembre sont secs selon ce critère. La saisonnalité des précipitations typique de la façade océanique se traduit donc par une période estivale relativement sèche, proche du critère défini par Gaussen.

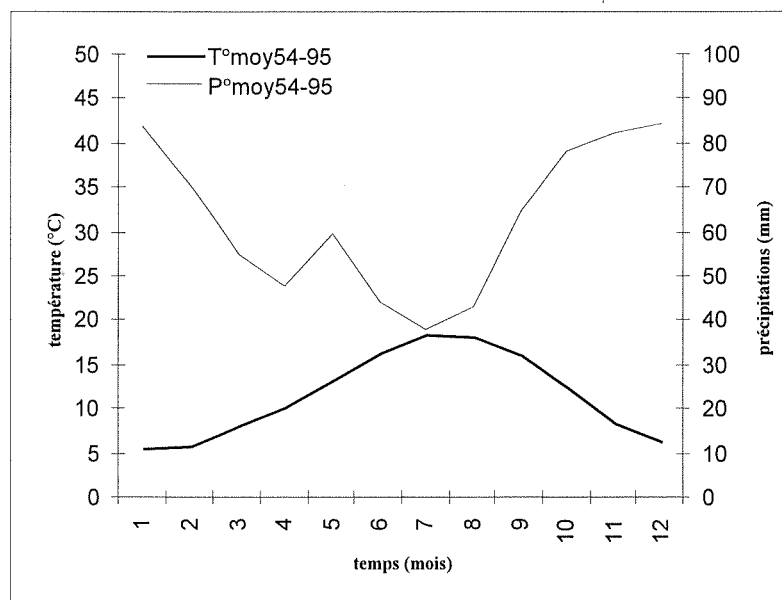


Figure 133 : diagramme ombrothermique de Gaussen, station de Montoir-de-Bretagne. Période de calcul 1954-1995

Le bilan hydrique potentiel permet de déterminer les périodes de sécheresse de façon plus proche des effets biologiques que la comparaison des températures et précipitations. L'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) selon la formule de Penman (cf. partie 1 chap.1.II) est disponible pour la station de Montoir-de-Bretagne (communiquée par la station Météo France de Bouguenais).

L'ETP de Penman est une estimation, de la quantité d'eau maximale qui serait transférée vers l'atmosphère par un peuplement végétal continu si l'eau évaporable était totalement renouvelée (cf. partie 1 chap.1.II). Si l'on considère uniquement l'entrée d'eau climatique, c'est-à-dire en négligeant la réserve du sol et l'apport phréatique, un bilan hydrique potentiel peut être calculé en faisant la différence entre les précipitations et l'ETP.

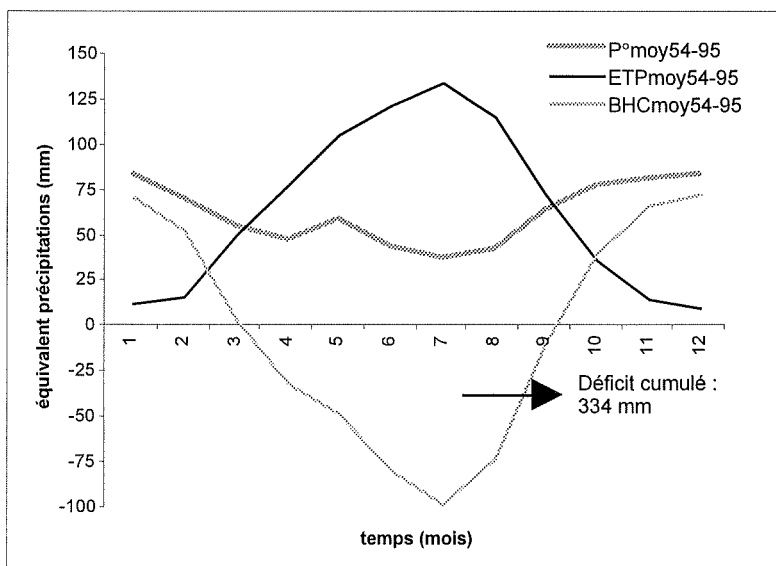


Figure 134 : bilan hydrique potentiel moyen pour la période 1954-1995 à la station de Montoir-de-Bretagne. P° : précipitations. ETP : évapotranspiration potentielle de Penman. BHC : bilan hydrique potentiel.

La moyenne des variables calculée pour la période 1954-1995 permet de décrire les caractéristiques hydriques d'une année type à Montoir. L'évolution au cours de l'année de l'ETP dépasse nettement les précipitations reçues dès le mois d'avril jusqu'au mois de septembre (fig. 134). Le bilan hydrique potentiel est donc déficitaire, entre ces deux mois. Le déficit cumulé sur toute la période de sécheresse climatique s'élève à 334 mm. Les précipitations sont excédentaires pendant les mois de novembre à mars mais ne compensent pas totalement les pertes. Le cumul annuel reste négatif, égal à -23 mm. Toutefois, elles sont suffisantes pour reconstituer la réserve hydrique d'un sol type, qui peut être estimée entre 100 et 150 mm, chaque année.

Le bilan hydrique potentiel n'aboutit qu'à une estimation du déficit hydrique, donc aux besoins en eau pour la végétation (CHOISNEL et PAYEN 1989). Ceci principalement, car la répartition dans le temps des pluies est considérée à un pas de temps mensuel. Par ailleurs, le peuplement intercepte une partie des précipitations qui est perdue par évaporation rapide et, selon la structure et la texture du sol, son réapprovisionnement est différent. Il y a donc une différence importante entre les précipitations reçues et les précipitations efficaces pour la végétation. Les variations de la réserve utile en eau du sol ne peuvent être connues précisément qu'avec des modèles nécessitant de nombreuses variables climatiques comme celui développé par GRANIER *et al.* (1995).

Cependant, il est permis de penser que l'estimation du déficit hydrique vers 300 mm correspond à un besoin en eau de la végétation élevé. Les sols types de la région ne permettent de fournir qu'une part de cette demande. En utilisant les valeurs de capacité de rétention de l'eau en fonction de la texture du sol retenues par Duhamel (*in* BADEAU 1995), un très bon sol, équilibré en argile et limon, prospecté sur 1,5 m de profondeur, correspond à une réserve utile de 200 mm. Les sols observés sur les îles (non hydromorphes) de Camer et proches du marais de Vaie-ès-Sauzes (*cf. infra*), limono-argileux comportant des éléments grossiers et des sables, profonds de 80 à 100 cm, représentent une réserve utile proche de 100 mm. Les sols hydromorphes tourbeux sont probablement humectés par capillarité depuis la nappe phréatique comme c'est le cas dans le marais Poitevin (JAMBU 1971). Les peuplements de chênes, plus avancés dans le marais, peuvent donc profiter de ces apports. Toutefois, c'est uniquement le cas si la contrainte à l'enracinement que pose l'hydromorphie leur permet d'avoir un système racinaire efficace à une profondeur suffisante. Ces hypothèses sont abordées en comparant la relation entre les variables climatiques et la croissance de chênes situés le long d'une topo séquence perpendiculaire à la bordure du marais.

## II Variations du niveau d'eau en Grande Brière

Le niveau d'eau est actuellement mesuré tous les jours à une échelle fixe située à Saint Joachim, proche de l'île de Fédrun (cf. fig. 19 partie 1) par A. Boulet responsable environnement du Parc Naturel Régional de Brière. Les données de 4 dates par mois depuis 1954, nous ont été gracieusement communiquées par A. Boulet.

### 1 Cycle annuel

De 1954 à 1978 les relevés sont réalisés par la commission syndicale de Grande Brière Mottière à la porte de Pont de Paille, au sud de la Brière Mottière. Après 1978, les mesures sont réalisées à Fédrun, à l'est de la Brière Mottière. Dans les deux cas, les relevés sont effectués dans un aménagement où l'eau libre est toujours présente. Il s'agit d'un canal ou d'une douve reliés au réseau de la Grande Brière. Les systèmes d'altitude ont été homogénéisés par A. Boulet. Le relevé est aujourd'hui exprimé en cotes NGF (Nivellement Général de la France), système d'altitude généralisé sur les cartes topographiques.

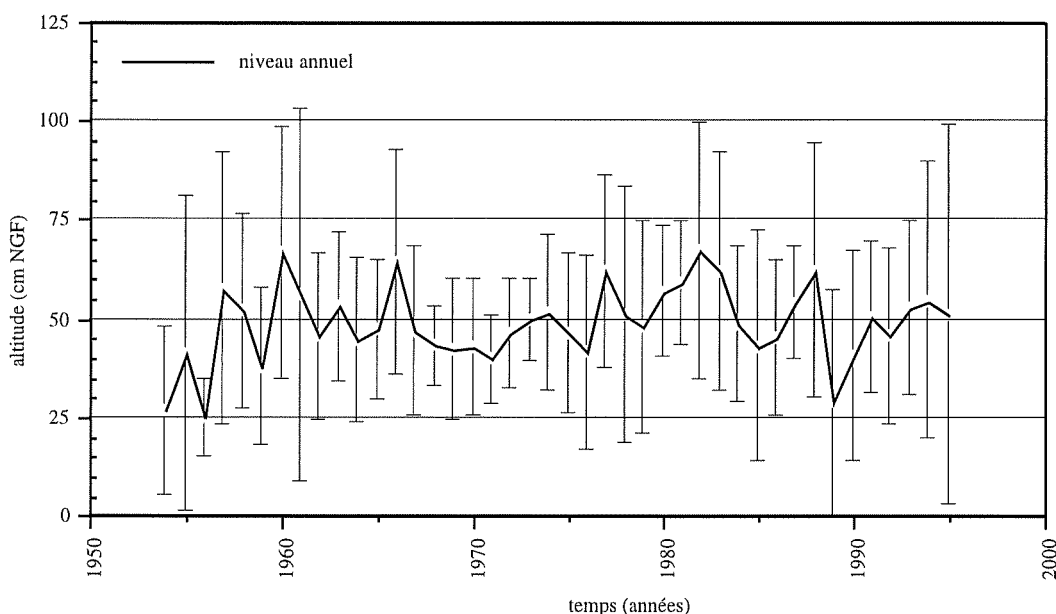


Figure 135 : niveau d'eau moyen annuel en Grande Brière, avant 1978 échelles de Pont de Paille, après 1978 échelle de Fédrun. Barre : écart-type.

Les deux parties de l'enregistrement ne montrent pas de différences qui pourraient être attribuées à la localisation des mesures. L'évolution du niveau annuel moyen et de son écart-type ne présentent pas d'écarts particuliers avant et après 1978 (fig. 135). De même, les cycles annuels moyens obtenus avec les mesures réalisées avant et après 1978 sont similaires (fig. 136). Toutefois, avec les données anciennes, le niveau est inférieur aux mois de janvier et février et supérieur aux mois d'août et septembre.

Les moyennes avant 1978 d'une part et après 1978 d'autre part, sont comparées deux à deux par un test de Student. Aucune moyenne n'est jugée différente de son équivalente à un risque près inférieur à 2%. 8 comparaisons sur 48 (3 en janvier et février et 5 en août et septembre) aboutissent à considérer les moyennes différentes à un risque compris entre 2% et 5%. La plupart des comparaisons permettent donc de considérer les moyennes proches. Les deux parties de l'enregistrement sont donc représentatives du même cycle annuel. Les différences peuvent être attribuées au faible nombre d'années (24 et 18) considérées dans les moyennes.

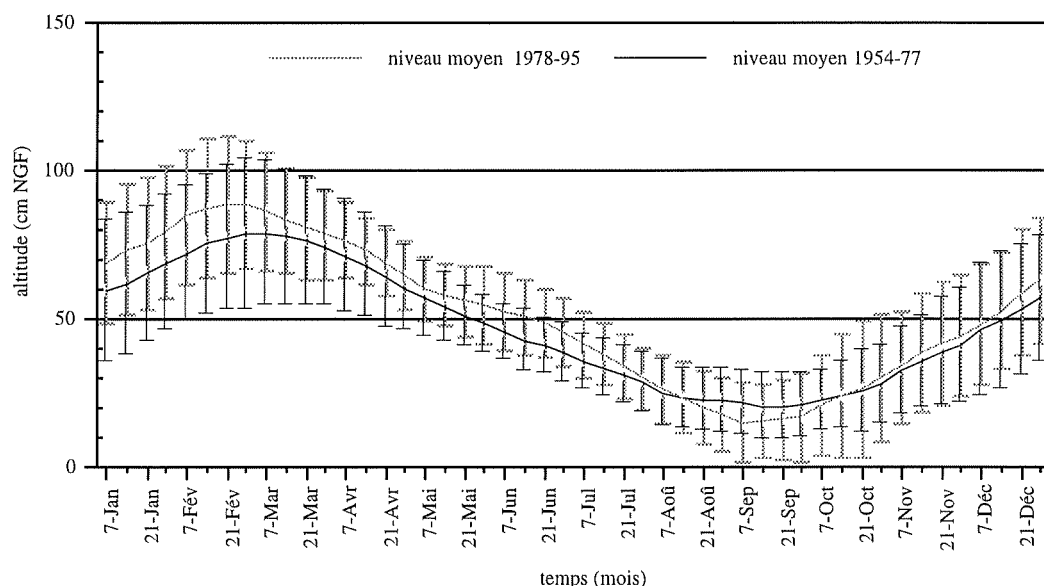


Figure 136 : variation moyenne mensuelle du niveau d'eau en Grande Brière calculée pour les périodes 1954-1977 et 1978-1995.

Les données peuvent être regroupées pour constituer un cycle annuel moyen sur la période 1954-1995 (fig. 137). Le niveau de la nappe en Grande Brière passe en moyenne par un maximum à la fin du mois de février à une cote de 83 cm NGF. Puis celui-ci baisse en moyenne jusqu'à la fin du mois de septembre, vers 20 cm NGF. Le cycle peut alors être décomposé en deux phases, humide et sèche, reliées par une décrue (cf. partie 1 chap. 2.I). Le niveau est élevé, nettement supérieur à l'altitude moyenne des prairies, de décembre à avril. De mai à juillet, la décrue est la plus rapide et le marais reste en phase sèche jusqu'en octobre.

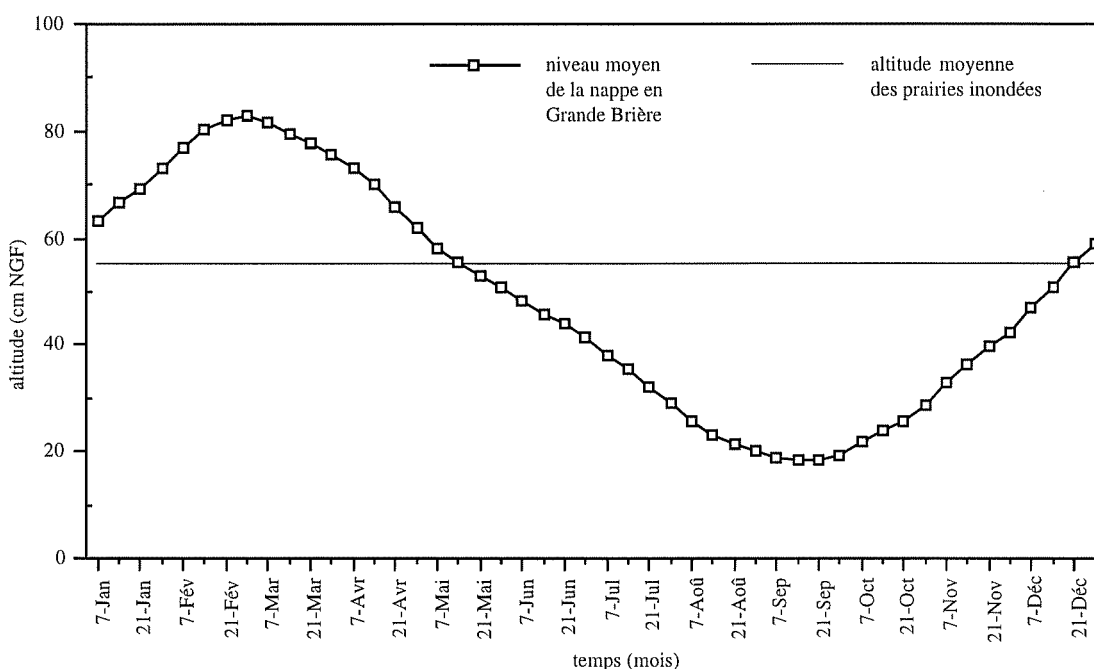


Figure 137 : variation moyenne du niveau d'eau en Grande Brière. 4 mesures par mois. Période de calcul 1954-1995.

La gestion hydraulique a probablement une influence sur des parties de ce cycle. En période de hautes eaux, de novembre à mai, des vannes peuvent fonctionner en direction de la Loire (BOULET 1992). L'évacuation peut toutefois être ralentie si le niveau hivernal est bas et risque d'induire une sécheresse estivale. En période de basses eaux, les portes sont fermées pour maintenir un niveau compatible avec le développement des prairies (BOULET 1992). Des apports d'eau depuis l'estuaire peuvent être réalisés à cette période dans le même but

(BOULET 1992). La gestion hydraulique tend donc à diminuer l'amplitude du cycle annuel. Toutefois, la surface des zones inondables approchant 20 000 hectares, les variations du niveau restent importantes et largement inféodées aux conditions climatiques.

Selon les années, des écarts assez importants par rapport à ce cycle moyen sont observés. Cependant, au cours de l'année, le cycle est la première source de variations du niveau. Son évolution pour les années 1970 et 1960 montre la forte opposition des saisons et peu de variations de haute fréquence, sur quelques décades (fig. 138).

Les échelles sont positionnées dans un canal. Les divers canaux ont des relations bien entretenues en Grande Brière. La mesure est donc probablement représentative des variations du niveau pour une grande surface. De ce fait, l'inertie de la très grande masse d'eau concernée masque les variations de haute fréquence. MAGNANON (1991) a réalisé des mesures directement dans les prairies inondées de plusieurs marais répartis le long du Brivet. Elle signale une variabilité du niveau de la nappe pouvant être localement importante pour de courtes périodes selon le type de relations que la prairie présente avec le réseau de canaux. Cependant le cycle annuel reste le caractère le plus important.

Les variations des niveaux, sont également différentes selon la fonction générale du compartiment concerné (MAILLARD et BOULET 1988). Les variations seront plus rapides dans un secteur de transit, comme le Brivet-moyen, que dans la Grande Brière qui joue un rôle de vase d'expansion ou de retenue selon les saisons (MAILLARD et BOULET 1988).

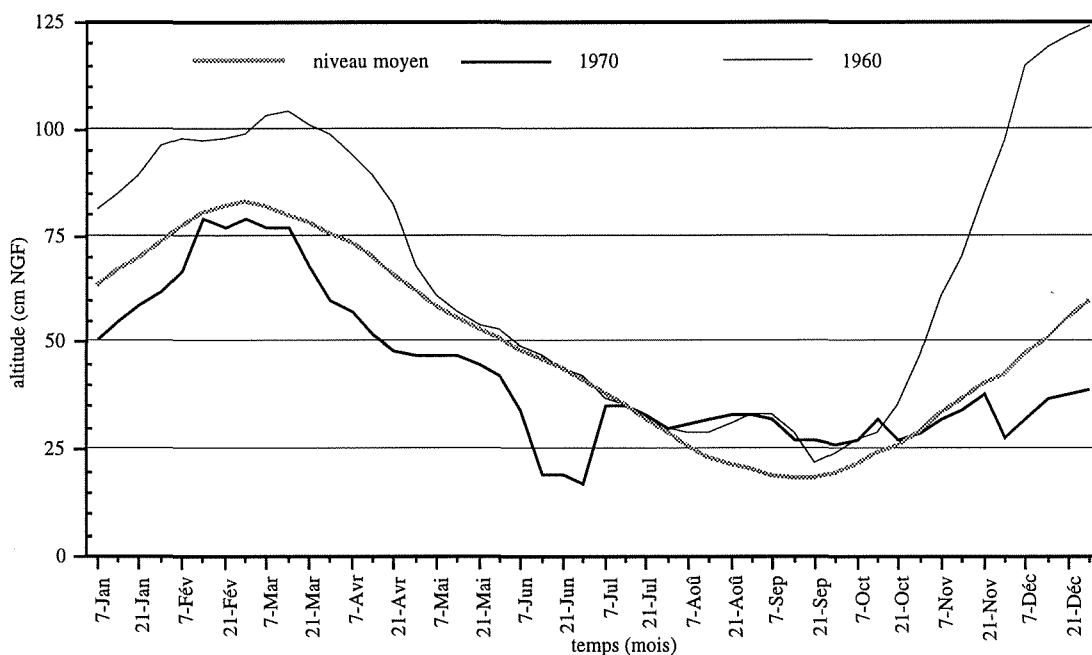


Figure 138 : variation du niveau d'eau en Grande Brière en 1970 et 1960

En conséquence du cycle annuel et de l'inertie de la masse d'eau, l'évolution du niveau durant la période comprise entre 1954 et 1995 à des dates proches dans l'année présente une forte similitude. La variation de l'altitude au 7 janvier présente une corrélation de 0,87 avec celle au 7 février (fig. 139). Le coefficient s'élève à 0,76 entre les séries de juillet et août. Par contre, le lien entre les niveaux après une plus longue période n'est plus significatif. La corrélation entre le niveau au 7 juillet et ceux de janvier et février est de 0,14 et 0,12.

Le calcul peut être généralisé. Le niveau est disponible 4 dates par mois. Le coefficient de corrélation est calculé entre les 48 séries. Un coefficient moyen est calculé pour toutes les paires séparées de la même période. La figure 140 montre que le lien entre les

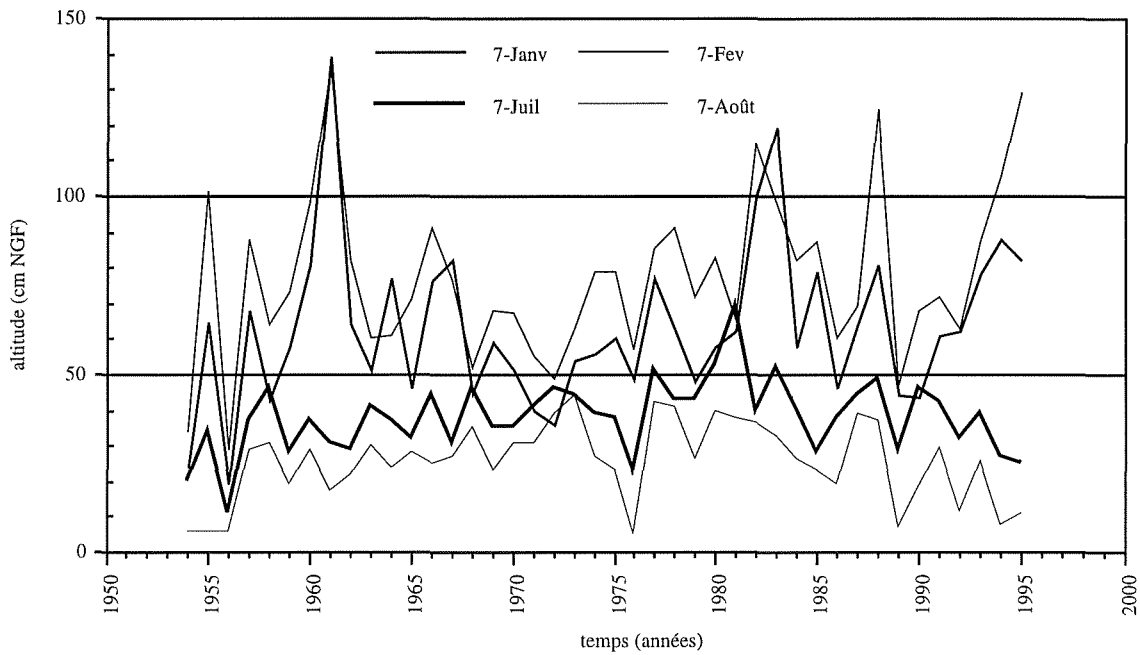


Figure 139 : variation du niveau d'eau en Grande Brière les 7 janvier, 7 février, 7 juillet et 7 août entre 1954 et 1995

niveaux diminue de façon moyenne avec le décalage. Lorsque celui-ci est d'une semaine, le coefficient de corrélation moyen s'élève à 0,96. Avec 10 semaines d'écart, la valeur est de 0,43 et à 13 semaines de décalage, elle est de 0,30. Cette valeur reste significative à un risque de 5 % pour un test de Student. Les niveaux tendent vers une indépendance après 24 semaines ( $r = 0,11$ ), soit après 6 mois d'écart.

En moyenne, quelle que soit la saison considérée, après 6 mois de décalage, les niveaux observés ne présentent plus de lien. C'est notamment le cas entre les mois de janvier et juillet mais également entre le niveau maximum, observé pendant la phase humide, et l'altitude minimale, survenant vers la fin septembre ( $r = -0,05$ ). Il semble donc y avoir peu de relation entre la hauteur du niveau durant la phase humide et celle qui est observée en phase sèche. La gestion hydraulique, qui cherche à évacuer l'excès hivernal, induit probablement cette indépendance et ne permet pas de prévenir correctement un niveau bas estival.

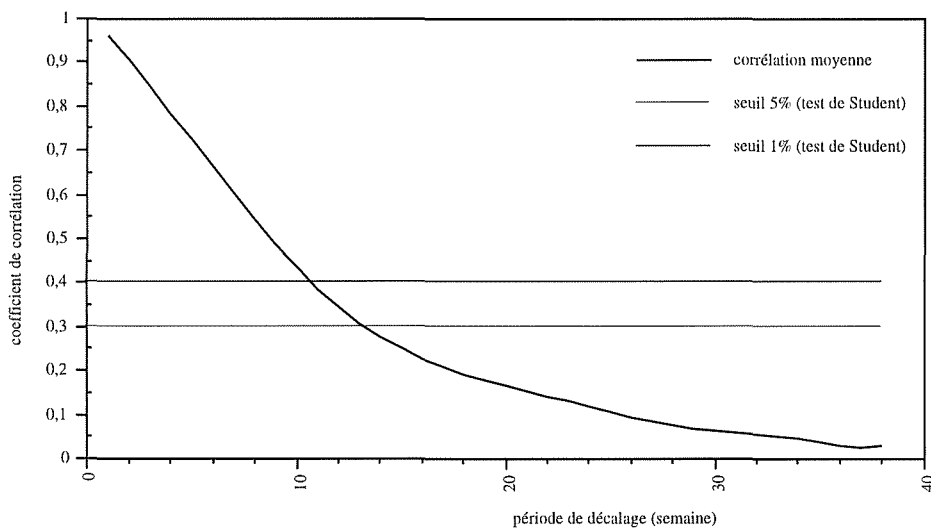


Figure 140 : corrélation moyenne entre les séries de niveaux en fonction du décalage de la date de mesure 1995.



## 2 Relations entre le climat et le niveau d'eau

Les séries de relevés du niveau en Grande Brière sont comparées aux données climatiques de la station de Montoir-de-Bretagne située au sud de la grande Brière, sur le bourrelet alluvial.

La saisonnalité des précipitations induit un bilan hydrique potentiel (P-ETP) positif d'octobre à mars et une période déficitaire du mois d'avril au mois de septembre. Durant la première période, les précipitations excédentaires s'accumulent dans le bassin du Brivet. D'octobre à la fin février, l'augmentation du niveau d'eau en Grande Brière suit cette accumulation (fig. 141). La décrue et la période sèche sont observées ensuite, concomitantes de la période de pluviométrie déficitaire. Les apports en précipitations sont insuffisants pour compenser le départ vers l'estuaire à partir du mois de mars où s'amorce la décrue. La gestion hydraulique favorise ce départ et avance probablement la baisse du niveau. La perte en eau du marais reste supérieure au déficit potentiel pendant les mois d'avril et mai puis le niveau baisse, de façon relative, moins que le bilan. Durant ces deux mois, l'évapotranspiration est élevée au détriment de la nappe et s'ajoute au drainage. Puis l'eau devient progressivement indisponible pour la végétation, en juin et juillet selon les espèces, en fonction de leur altitude de développement et de la profondeur de leur enracinement. La transpiration est régulée, les pertes, surtout dues au drainage, diminuent. D'une part, la gestion hydraulique permet probablement de limiter ce drainage et d'autre part les transits dans le bassin versant sont probablement ralentis car les sols, dont la réserve utile a été exploitée, retiennent plus d'eau. Ceci peut expliquer que les pertes du marais sont inférieures à la baisse du bilan hydrique potentiel dès juillet et août. L'étiage est observé en septembre au moment où le déficit potentiel cumulé est le plus bas.

Le cycle annuel de variation du niveau d'eau en Grande Brière semble donc principalement lié aux facteurs climatiques, à l'évapotranspiration de la végétation et à la gestion hydraulique. L'influence des relations avec la Loire et l'estuaire peuvent être jugées minimales pour ce compartiment.

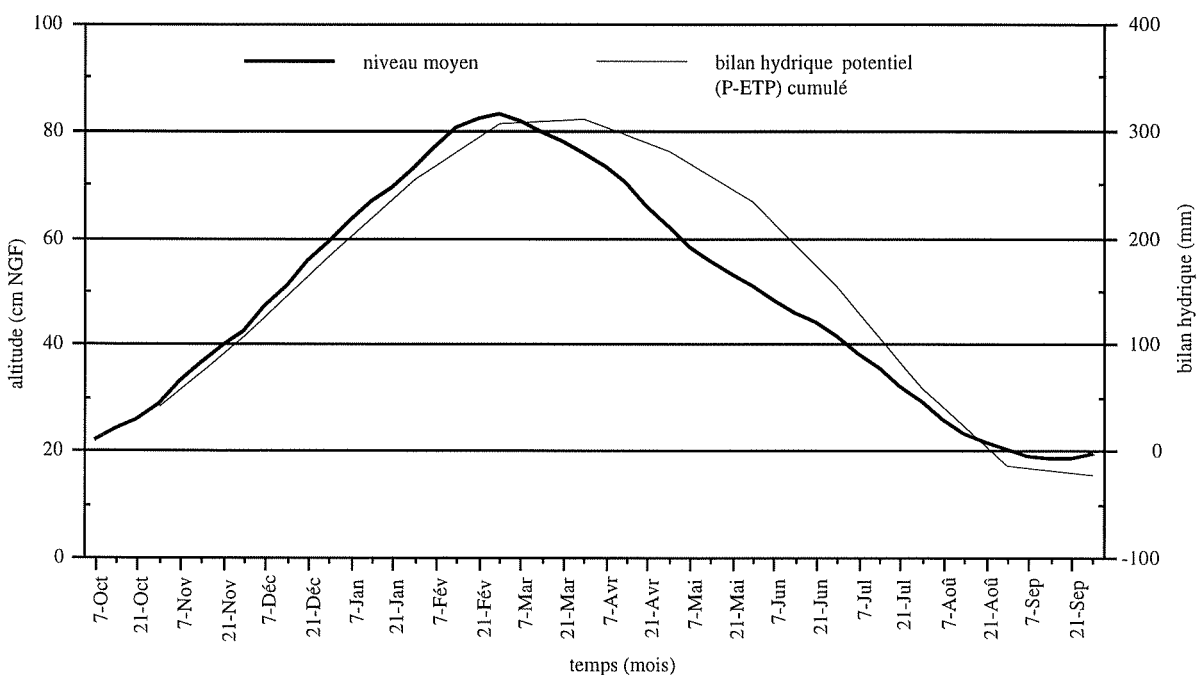


Figure 141 : cycles annuels du bilan hydrique potentiel (P-ETP) cumulé et du niveau d'eau en Grande Brière

Les variations du niveau sur la période 1954-1995 sont comparées à celles du bilan hydrique potentiel pour la même période dans une analyse en composantes principales. Les données sont des variables continues, dont les moyennes sont nettement différentes, elles relèvent donc plus typiquement d'une ACP centrée normée. Seule l'altitude du niveau au 28 de chaque mois est conservée pour équilibrer le nombre de colonnes représentant le niveau et le bilan hydrique. Les années, en lignes, sont considérées comme des réalisations de ces variables.

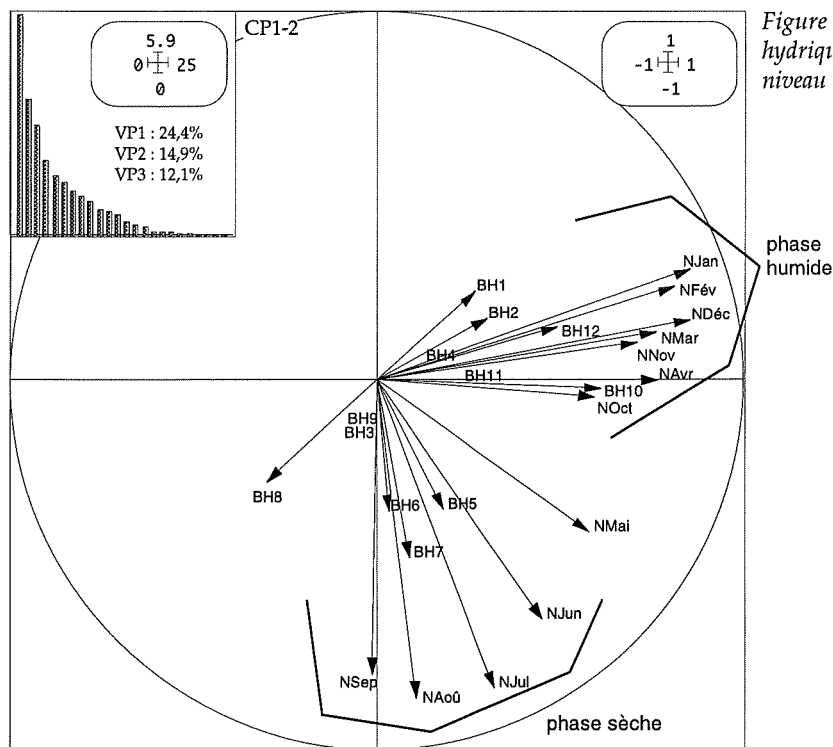


Figure 142 : résultats d'ACP du bilan hydrique potentiel (BH) à Montoir et du niveau d'eau en Grande Brière (N).

Les deux premières valeurs propres représentent 24,4 et 14,9 % de l'inertie totale. Les points qui correspondent aux variables ont tous une coordonnée positive sur le premier axe, exception faite du bilan hydrique potentiel du mois d'août (BH8) (fig. 142). La corrélation entre les variables est, en moyenne, positive ; la première composante exprime donc la cohésion des variables. On remarque cependant que les bilans hydriques potentiels mensuels sont, en général, plus proches de l'origine. Ils sont donc moins corrélés à l'ensemble des données. Ceux des mois de mars, avril et septembre peuvent être jugés sans relation avec les autres variables de l'analyse.

La seconde composante permet de différencier les points correspondants aux niveaux de la phase humide, d'octobre à avril, de ceux de la phase sèche (fig. 142). Le cycle annuel induit également la répartition le long de l'axe 2 des points qui représentent les mois durant lesquels le niveau subit les variations les plus rapides. C'est le cas de mai à septembre, pendant la décrue, et d'octobre à janvier pendant l'accumulation.

Des bilans hydriques potentiels peuvent être associés aux deux ensembles de points définis sur l'axe 2 qui représentent les niveaux. Ces bilans sont en moyenne indépendants les uns des autres ( $r=0,01$ ), alors que les niveaux sont corrélés ( $r=0,33$ ). Les vecteurs des bilans dont la direction est proche de celles définies par les deux groupes sont donc positionnés, en très grande part, car ils présentent une relation avec les niveaux. Ceci permet de supposer une relation entre les bilans hydriques des mois d'octobre à février et le niveau en phase humide ainsi qu'entre ceux des mois de mai à juillet et le niveau en phase sèche.

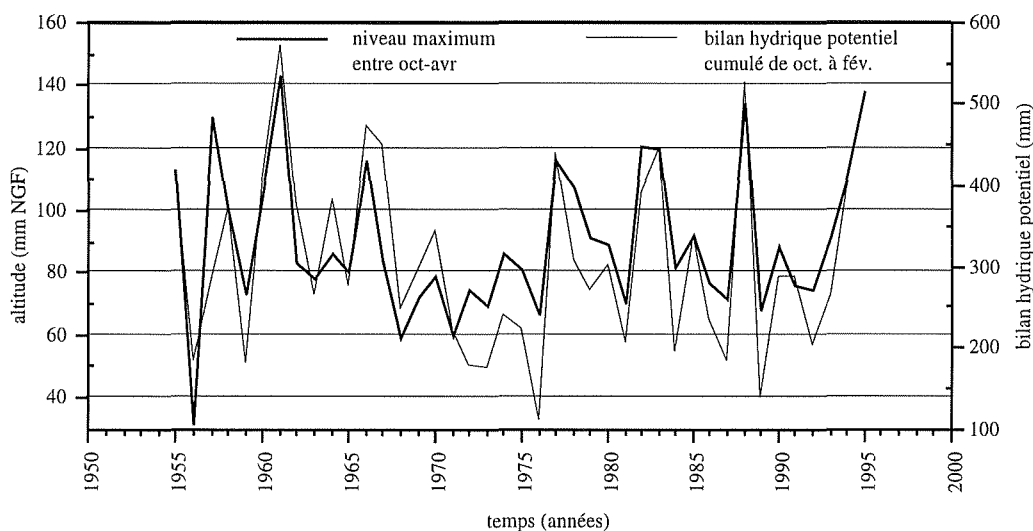


Figure 143 : évolution entre 1954 et 1995 du niveau d'eau maximum entre octobre et avril en Grande Brière et du bilan hydrique potentiel cumulé d'octobre à février à la station de Montoir.

Les altitudes maximales et minimales atteintes par le niveau respectivement entre les mois d'octobre et d'avril et entre mai et septembre permettent de caractériser les phases humides et sèches de façon plus globale que l'altitude à une date précise.

L'ACP suggère que le niveau en période humide est en relation avec le bilan hydrique potentiel des mois d'octobre à février. Les bilans mensuels sont donc cumulés sur cette période. L'évolution pour la période comprise entre 1954 et 1995 de ces deux variables montre beaucoup de points communs (fig. 143). La corrélation qui les unit s'élève à 0,81.

De même, il est suggéré que le niveau bas est fonction du bilan hydrique des mois de mai à juillet. L'évolution, sur la période d'enregistrement, du niveau minimum mesuré entre mai et septembre est effectivement similaire à celle du bilan hydrique potentiel cumulé de mai à juillet. La corrélation entre les deux variables s'élève à 0,59 (fig. 144).

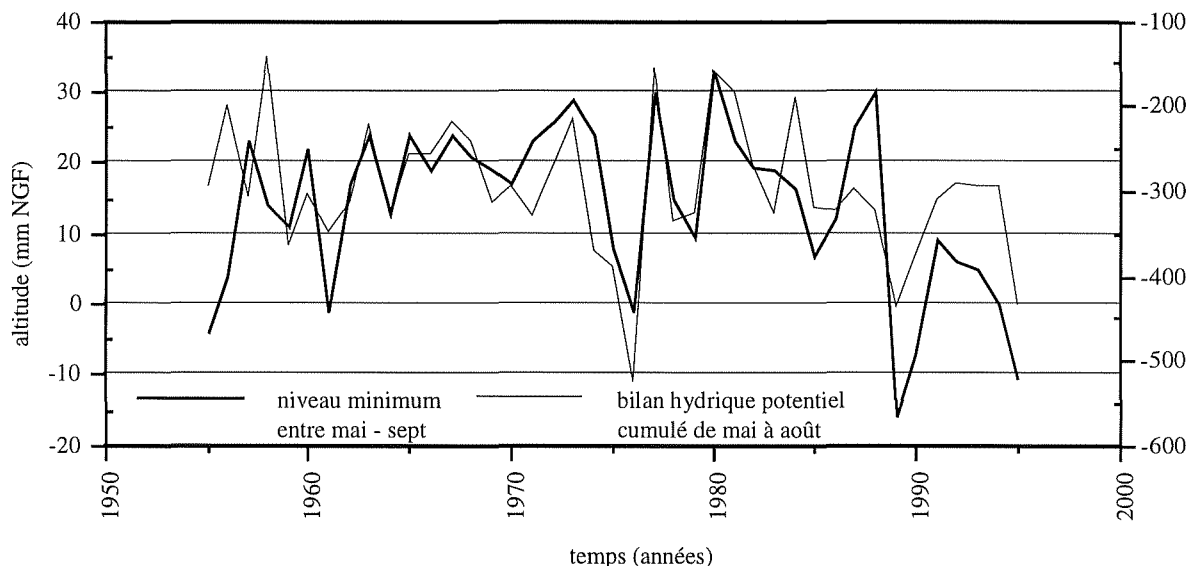


Figure 144 : évolution entre 1954 et 1995 du niveau d'eau minimum entre mai et septembre en Grande Brière et du bilan hydrique potentiel cumulé de mai à juillet à la station de Montoir.

Le relevé d'un seul niveau ne peut représenter la complexité du fonctionnement hydraulique du marais, ni même de la Grande Brière. De plus, il est impossible de savoir à quelles surfaces se rapportent les variations. En effet, la surface en eau assez unie en hiver se fragmente en saison sèche. Le niveau ne peut donc pas être considéré comme directement

---

relié au volume ou à la masse d'eau présente en Brière. On peut toutefois supposer que la surface restant très grande, elle varie peu en fonction du niveau. Malgré ces approximations ainsi que la gestion hydraulique, le niveau relevé présente des relations avec le bilan hydrique potentiel. Il est donc directement représentatif des conditions hydriques annuelles. Les facteurs climatiques expliquent une part des variations du niveau mais celles-ci présentent une spécificité importante. On utilisera plus avant cette variable comme explicative de la croissance des chênes analysés. Celle-ci apporte une information supplémentaire par rapport aux seules variables climatiques. Même si la complexité de la circulation de l'eau en Brière nous interdit de considérer le niveau mesuré représentatif du niveau de la nappe sur les stations de prélèvements dendrochronologiques, le niveau est une variable qui peut être considérée comme une approximation de la disponibilité en eau pour les chênes.



## Chapitre 2

# CARACTÉRISATION ÉCOLOGIQUE DES PLACETTES

## I Localisation et type de peuplements

### 1 Localisation

Les placettes peuvent être considérées comme réparties le long d'un transect partant de peuplements de Chêne pédonculé sur les îles, vers des peuplements toujours dominés par le chêne, au contact des formations spécialisées du marais, à saules ou phragmites dominants. Ces peuplements subissent une influence plus ou moins prononcée de la variation saisonnière du niveau de la nappe en liaison avec le marais. L'influence de la nappe selon les stations est estimée par le relevé de variables descriptives du milieu, principalement du sol, et par le relevé floristique. Les photographies 145 et 146 présentent les stations lors de la phase humide (en février) et lors de la phase sèche (en juillet).



Figure 145 : vue de la station CHAS1-2 (la Chapelle-des-Marais) en phase humide



Figure 146 : vue de la station CHAD2 (la Chapelle-des-Marais) en phase sèche

L'étendue de ces peuplements et leur évolution sont intimement liées aux activités agricoles. La figure 147 montre une limite de parcelle rectiligne qui est influencée par les variations des facteurs du milieu mais également par les choix réalisés par les exploitants. Les phragmites du marais sont fauchés. Un ourlet comportant des saules (*Salix atrocinerea*) et des chênes pédonculés assure la transition entre les hélophytes et la formation plus forestière. La variation d'altitude est faible en faveur de la formation forestière (inférieure à 50 cm). Par contre, on peut supposer que le fauchage a du être moins régulier pour permettre l'évolution forestière. De jeunes chênes sont capables de s'installer dans l'ourlet, voire dans les phragmites et font avancer la chênaie dans des milieux de plus en plus humides.



Figure 147 : photographie du contact entre une chênaie pédonculée et une phragmitaie à la Chapelle-des-Marais, proche des stations CHAS1 et CHAS2.

Toutefois, le transect ne peut être réalisé sur un seul site. Les stations sont localisées dans plusieurs petits bois plus ou moins avancés dans le marais. L'unité la plus vaste est localisée sur la commune de la Chapelle-des-Marais où 4 stations (CHAS et CHAD1-2) ont pu être réalisées (fig. 148). 3 sont localisées sur une île (ne portant pas de nom sur la carte topographique) dans le marais de Vaie-ès-Sauzes (VES1-3) et 2 sont au contact entre l'île de Camer et le marais (CAM1-2) (fig.148). Enfin, deux stations sont éloignées d'environ 10 km des premières en bordure d'Ile d'Errand (IDE1-2).

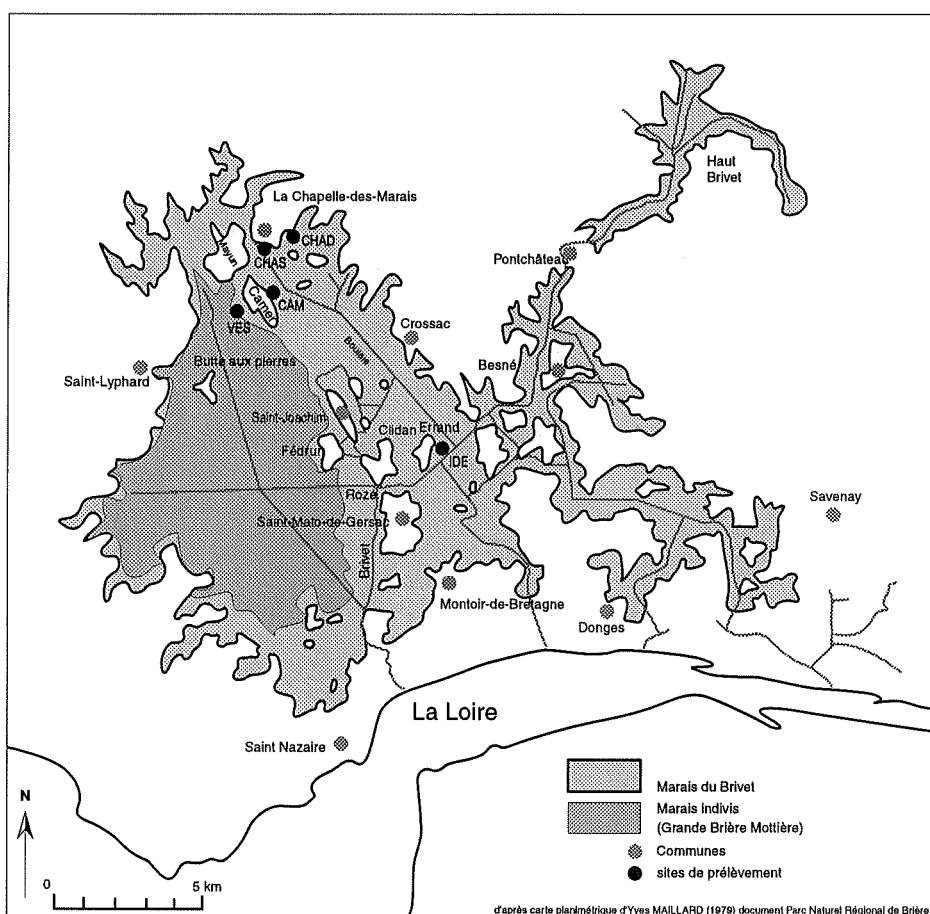


Figure 148 : localisations des placettes d'échantillonnage



---

## 2 Types de peuplements et sylviculture

Les arbres ont été échantillonnés dans des peuplements qui sont sur des terrains privés. Il n'existe pas à proprement parler de massifs forestiers et la gestion sylvicole est limitée à quelques plantations de peupliers et à des exploitations de bois de feu très limitées. Le développement de ces peuplements est très récent. Des vues aériennes prises en 1938 ne montrent pas de formations forestières mais des haies de chênes rayonnantes à partir des îles en direction du marais. Cette organisation est perturbée par les changements démographiques et d'activité de la population. La Chapelle-des-Marais comportait 28 % de sa population active dans l'agriculture en 1936 et 4 % en 1968 alors que l'industrie employait 39% des actifs en 1936 et 65 % en 1968 (VINCE *et al.* 1981). La surface agricole utilisée diminue cependant de façon beaucoup moins marquée, par effet de la concentration des exploitations (MAGNANON 1991). Celle-ci croît même pour certaines communes. La déprise agricole est principalement observable à cause de la raréfaction des tâches d'entretien dans les petites propriétés. L'entretien et l'émondage des haies délimitant beaucoup de parcelles reposent sur l'économie du bois de feu.

Les briérons bénéficient de droits d'usages collectifs dans les marais indivis comme le pacage du bétail, la pêche, la chasse et la coupe du roseau (cf. partie 1). Ces droits comprenaient le tourbage : exploitation de la tourbe et du "noir" (tourbe retirée des canaux) comme combustible. Le "charruage" des mortas est plus complexe car en plus de combustible, les meilleurs troncs sont utilisés pour réaliser des chevrons de chaumière. Au XIXe siècle et jusqu'en 1930 au plus tard, le tourbage donnait lieu à un commerce auquel une part importante des briérons participait (VINCE *et al.* 1981). Cependant, dès 1920, le développement général des transports met de plus en plus à disposition le charbon, meilleur combustible. Le tourbage perdure seulement sous forme d'activités familiales. La ressource en combustible pendant cette période jusque vers 1950 est probablement diversifiée. La tourbe et le morta sont peu utilisés par rapport au bois et au charbon. Le bois provient principalement des haies qui sont émondées régulièrement. A partir de 1950, le fuel remplace le bois comme le charbon a remplacé la tourbe. Les haies sont moins entretenues et l'émondage est partiellement abandonné.

La déprise agricole se remarque sur les photographies aériennes par une densification et un élargissement des haies mais les zones de boisement restent rares et surtout fonction de modifications locales. A la Chapelle-des-Marais, la construction de la route départementale 33 en 1952 a coupé en deux des parcelles de prairies humides entourées de haies visibles sur les photographies aériennes de 1938. Les parties les moins accessibles ont été délaissées et constituent un petit bois. Une petite île, non habitée, incluse dans le marais de Vaie-ès-Sauzes, où des prairies sont visibles en 1938, est accessible uniquement de l'île de Camer par un chemin dans le marais dont l'entretien nécessite la fauche annuelle des phragmites. Elle ne fait aujourd'hui plus l'objet d'exploitation. Des peupliers plantés sont de mauvaise venue et le chêne pédonculé, à partir des haies, colonise l'ensemble jusqu'au contact de la saulaie qui ceinture l'île.

Pour refléter cet aspect dynamique sur les placettes d'échantillonnages, des variables de structure du peuplement ont été définies. Les recouvrements au sol des strates de végétation, notées en phytosociologie, permettent de juger de la structure verticale. Pour la strate arborescente et plus particulièrement le Chêne, j'ai défini trois stades du peuplement que l'on peut assimiler à des sylvofaciès. Dans le stade haie - taillis, la station comporte encore des arbres de haies et un sous-étage de colonisation. Dans le stade taillis âgé, il n'y a plus d'arbres de haie, les chênes forment un étage assez fermé de hauteur assez constante mais ils n'ont pas atteint leur maximum de développement. Enfin dans le taillis de colonisation, observé au contact du marais, les arbres sont plus petits et espacés.

## II Description du milieu

### 1 Types de sols rencontrés

Les sols sont décrits par un à trois sondages à la tarière sur la station. Leur genèse est, pour la plupart complexe, polycyclique, car elle s'est déroulée sous des conditions d'hydromorphie variables en fonction des périodes. Certains reposent sur l'arène de dégradation du socle primaire composé de roches cristallines et les autres sur les remplissages quaternaires marins, argiles et sables holocènes. Les deux substrats conduisent à des sols très différents.

#### 1.1 Sols sur socle

Les sols observés aux plus hautes altitudes (fig. 149 : VES1 et CAM2) ont une hydromorphie temporaire, qui se limite au fond du profil, dont les figures d'oxydoréductions sont nettes à partir de 60 cm environ. Ils ne contiennent pas d'horizon organique. La partie supérieure du profil est riche en matériaux grossiers, sables, graviers dont ceux qui ont pu être identifiés sont des fragments de socle. Une partie intermédiaire est moins riche mais des graviers sont toujours présents. En approchant du socle, la concentration en fragments de plus en plus gros augmente à nouveau. La proportion entre limons et argiles est favorable aux limons dans la partie supérieure puis la texture s'enrichit en argile avec la profondeur. Mais elle reste limono-argileuse avec une participation des sables (Las, lA(s)) à une profondeur de 70 cm environ. A 90 - 100 cm, la tarière est stoppée par l'arène. La nappe d'eau libre n'a pas été observée dans le trou de tarière (relevé le 20/07/96), le sédiment était frais dans le fond du profil. L'enracinement est très intense dans les 5 à 7 cm du premier horizon puis progressivement plus rare, des racines, toutes saines, sont observées dans la tarière à 60 -70 cm mais on peut supposer que tout le profil est prospecté par les arbres. Le niveau de nappe n'est pas contraignant.

Des sols reposant sur le socle sont observés à des altitudes inférieures (fig. 149 : VES2, VES 3 et CAM1). Les deux premiers possèdent un horizon organique peu épais de 15 à 20 cm. Des concrétions ferro-manganiques sont observables dès 20 à 30 cm, le gley oxydé apparaît entre 60 et 80 cm. La nappe était libre, en juillet 1996, à ces profondeurs. La

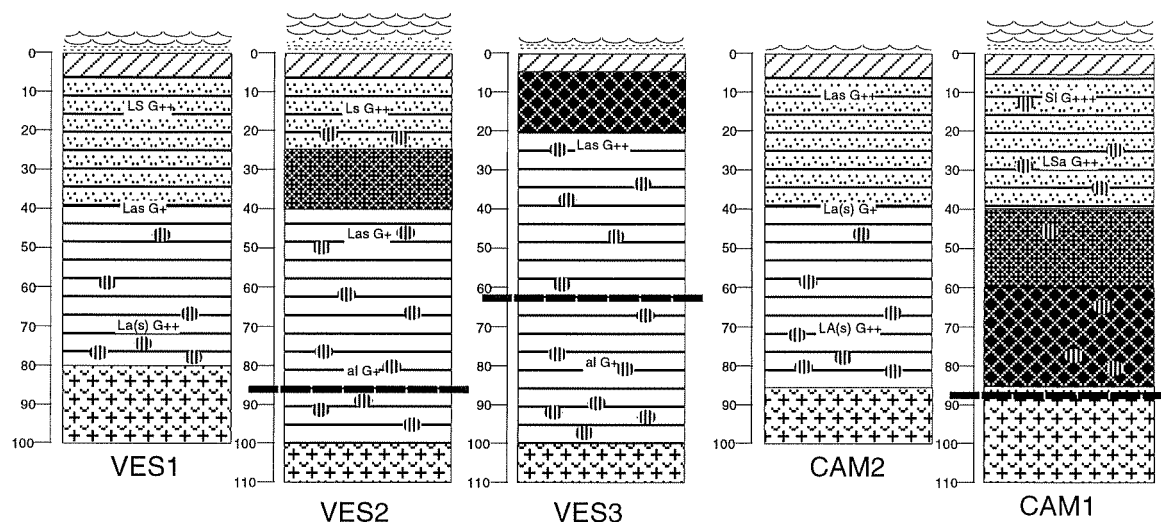


Figure 149 : profils pédologiques des sols se développant sur le socle (légendes : fig. 150)

répartition le long du profil de la fraction grossière et de la texture de la partie fine est semblable, en dehors de l'horizon organique, aux sols précédents. L'horizon organominéral, d'épaisseur supérieure (100 cm) devient argilo-limoneux au delà de 80 cm. Les sables sont rares à cette profondeur.

Le niveau tourbeux est surmonté d'un horizon organominéral graveleux. Dans le cas de VES 2, la transition entre cet horizon et la tourbe forme des glosses. La tourbe comporte une fraction minérale et apparaît assez structurée. L'horizon organique de VES 3 n'est pas superposé d'un horizon graveleux. La tourbe est noire, assez structurée, à tendance grumeleuse, mais non sableuse. L'humus est peu épais, composé d'une couche de feuilles peu modifiées de quelques années et 0,5 cm de feuilles fragmentées. Il ne comporte pas d'horizon humique mais est inondé chaque hiver. Cet humus repose sur un horizon organominéral riche en matière organique, de type A1, grumeleux, où le développement racinaire est intense (fig. 149). Le sol de la station CAM1 repose sur le socle à une altitude également faible mais l'horizon organique est plus épais, (45 cm). La transition avec l'horizon graveleux est glossique. La tourbe est sableuse et faiblement structurée. L'horizon graveleux est également plus épais et comporte des concrétions dès 15 - 20 cm, dans la tourbe noire des amas rappellent nettement les concrétions. Par contre, le niveau inférieur à la tourbe est peu épais avant que le socle n'arrête la tarière.

Dans ces trois sols, l'enracinement subit une contrainte qui reste faible. Des gaines d'oxydation entourent certaines racines dès 25 cm dans le cas de CAM1 et des racines mortes sont visibles à 40 cm pour VES3, mais les parties tourbeuses sont prospectées, celle de VES2 est même riche en racines. La présence de la nappe en juillet vers 60 à 90 cm indique cependant un plancher.

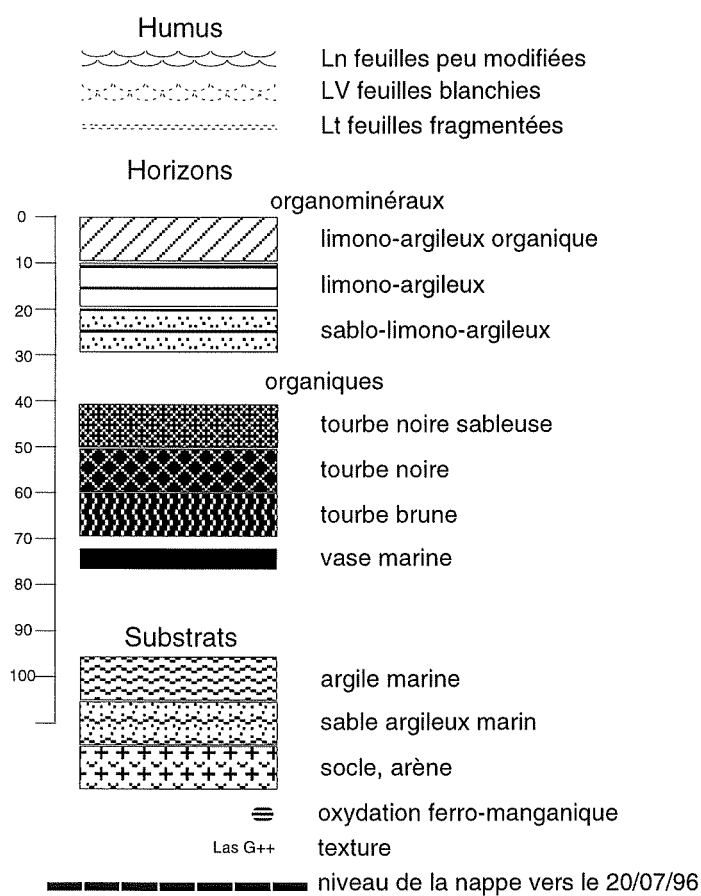


Figure 150 : légendes utilisées pour la description des profils pédologiques

Ces sols sont très probablement polygéniques, les horizons tourbeux s'étant développés dans des conditions d'hydromorphie plus permanentes que maintenant. Même pour le sol de VES3 dont le premier horizon n'est pas graveleux, la structure de la tourbe et l'humus de type hydromull tendent à montrer que l'horizon organique est issu d'une tourbification ancienne. Ces périodes d'accumulation organique ont interrompu la formation de sols qui seraient très proches de ceux observés à une altitude supérieure où les inondations sont rares. Les horizons organominéraux peuvent être considérés homologues des sols plus élevés. A ces altitudes, l'évolution des matériaux du socle conduit à un sol exclusivement minéral où les sables et la partie grossière sont bien représentés. Les argiles ne sont plus abondantes que pour les parties profondes au delà de 80 cm, ce que nous n'avons pas rencontré dans la partie haute de la topo - séquence où l'épaisseur des sols est inférieure. A noter également, l'absence de figures d'horizons élévés. Le lessivage des argiles est donc faible.

Tous les sols, sauf VES3, présentent plus de matériaux grossiers dans leur partie supérieure que dans une partie intermédiaire. Les éléments les plus gros qui ont pu être identifiés proviennent du socle. Cet enrichissement en éléments grossiers de la partie supérieure du profil semble dû au colluvionnement plutôt qu'à un apport de crues qui n'aurait pu déplacer des graviers compte tenu de la topographie du bassin versant., même s'il ne faut pas exclure pour les sols les plus bas un apport alluvial fin.

## 1.2 Sols sur dépôts marins

le substrat marin peut être presque exclusivement argileux ou être plus sableux. Une couche de vase organique très fluide peut s'intercaler entre le dépôt marin et la tourbe. Dans tous les cas, le fer dans le niveau marin est réduit : la couleur du sédiment est bleu-grise.

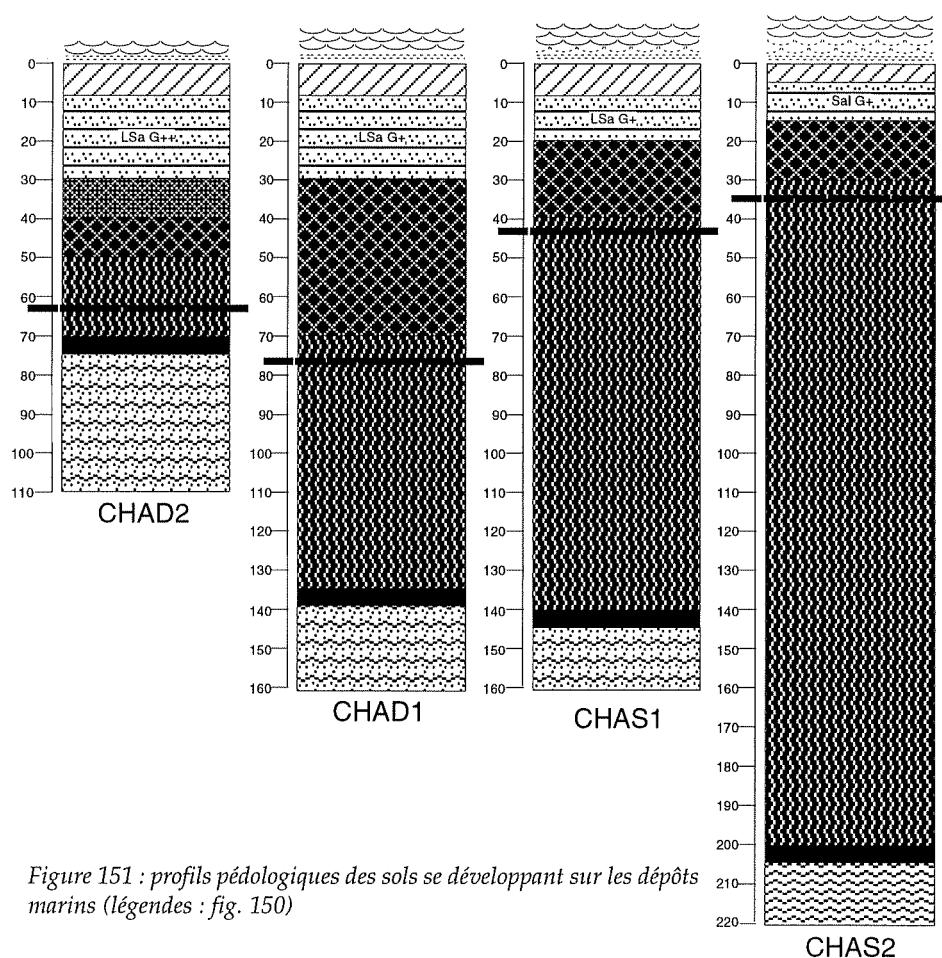


Figure 151 : profils pédologiques des sols se développant sur les dépôts marins (légendes : fig. 150)

Le premier horizon observé est riche en racines et épais d'un peu moins de 10 cm : il est de type A1 (fig. 151). Il superpose un horizon où la partie grossière est présente mais moins abondante que pour les sols issus du socle. Sa texture fine est dominée par les limons et les sables. Son épaisseur est variable, entre 15 et 30 cm (fig. 151). Cet horizon semble également enrichi par des apports de surface. D'autres topo - séquences observées à Ile d'Errand et Ile Clidan (St-Malo-de-Guersac) ou à Catiho et My (Drefféac, marais du Haut Brivet) montrent que l'apport par colluvionnement depuis les parties les plus élevées de l'île atteint les sols tourbeux du marais.

En-dessous de cet horizon organominéral, les sols présentent tous un niveau organique épais qui repose directement sur le substrat marin. La partie supérieure de cet

---

horizon est sableuse et glossique uniquement pour le sol de CHAD2, le plus élevé en altitude. Dans les autres cas, la transition est nette et la tourbe ne comporte pas de sable. Le matériau organique a une couleur et une structure qui varient avec la profondeur. La partie supérieure est noire, pâteuse, la partie inférieure est brune, parfois très fibreuse. La transition entre les deux types est progressive. Des restes de bois non dégradés sont rencontrés localement dans la tourbe brune. La différenciation des tourbes peut être liée à la végétation d'origine et aux conditions de formation. Les analyses polliniques (VISSET 1979) et les datations <sup>14</sup>C montrent que la tourbe brune se serait formée rapidement sous une couche d'eau de faible épaisseur et un peuplement dominé par l'aulne alors que la tourbe noire aurait été édiflée plus lentement en concordance avec une augmentation des pollens de graminées. La vitesse de tourbification est probablement très variable dans le temps et l'espace. A Ile d'Errand, pendant l'épisode de la chênaie de 1000 av. J.-C, la formation de tourbe a même dû être interrompue (VISSET *et al.* 1994). Les sondages étudiés en palynologie sont réalisés plus avant dans le marais, dans des peuplements actuellement dominés par les phragmites ou la prairie humide. Les différences morphologiques observées plus en marge peuvent également résulter de la pédogenèse depuis l'arrêt de tourbification. Le niveau de nappe dans le sol varie en fonction de la saison, provoquant une alternance dessiccation - humidification de la matière organique qui la modifie (JAMBU 1971). Lors des prélèvements en juillet, la nappe est observée à des profondeurs entre 70 et 35 cm, souvent dans la zone de transition entre tourbe noire et brune.

L'enracinement est intense dans l'horizon A1, en dessous, des racines plus rares, peuvent être gainées de rouille dès 20 cm et des racines nécrosées sont observables à partir de 40 à 90 cm. Des racines de type dicotylédones vivantes et mortes peuvent être observées jusque vers 80 cm. Quand la profondeur augmente, seuls les rhizomes de phragmites sont rencontrés. La contrainte à l'enracinement est marquée, particulièrement dans les sols CHAS1 et 2 où la nappe est encore très superficielle en juillet.

## 2 Tableau de variables descriptives du milieu

Le tableau mésologique synthétise les observations faites pour les sols et la structure du peuplement de façon à ordonner les stations et à présenter la part de responsabilité des différents types de facteurs dans la caractérisation des stations (tab. 54). Les stations ont été choisies *a priori* le long d'une diversité, ce qui implique que l'analyse du tableau n'est représentative que de celle-ci. Cependant, elle reste indispensable pour placer dans le détail les stations les unes par rapport aux autres et vérifier que des facteurs imposés lors de l'échantillonnage, par la rareté des peuplements de chênes, ne prennent pas une part prépondérante dans la diversité des stations.

Les variables retenues pour décrire le milieu de développement des arbres peuvent se diviser en trois groupes : des variables topographiques, de structure du peuplement et pédologiques. Elles sont choisies en essayant d'éviter les redondances. Certaines d'entre elles ont été mesurées sur le terrain, elles sont quantitatives, comme la profondeur des horizons. Cependant, la majorité est issue de clés de détermination, elles sont alors qualitatives. Dans un souci d'homogénéité, les variables sont rendues discrètes en cherchant à équilibrer les classes et à représenter la diversité. Dans la plupart des cas, les classes peuvent être ordonnées. La nature des variables est donc qualitative ordinale. Le tableau 54 indique les classes et leur ordre pour chaque variable.

structure peuplement	topographie	tourbe
1 : sylvofaciès 1 haie->taillis 2 taillis 3 colonisation	7 : altitude 1 > 1 m NGF 2 3 4 < 2 m NGF	16 : sommet horizon tourbeux 1 tourbe absente 2 profondeur > 20 cm 3 profondeur < 20 cm
2 : hauteur sous houpplier 1 10 m 2 12 m 3 15 m 4 17 m	Hydromorphie	17 : base horizon tourbeux 1 tourbe absente 2 profondeur 20-40 cm 3 profondeur 70-90 cm 4 profondeur >90 cm
3 : recouvrement futaie 1 0% 2 40% 3 70%	8 : période inondation 1 annuelle 2 fréquente 3 rare	18 : épaisseur de l'horizon tourbeux 1 tourbe absente 2 < 20 cm 3 40-50 cm 4 >100 cm
4 : recouvrement sous-étage 1 40% 2 70% 3 100%	23 : profondeur nappe en 07/96 1 35-45 cm 2 60-70 cm 3 80-90 cm 4 absente	Enracinement
5 : recouvrement arbustes 1 5% 2 20% 3 40%	22 : présence gley oxydé 1 0 2 1	19 : profondeur racines mortes 1 0 2 >40 cm 3 <40 cm
6 : recouvrement herbacées 1 <90 % 2 90% 3 100%		20 : gaines rouilles d'oxydation racinaire 1 0 2 1
9 : humus 1 mull acide 2 mull mésotrophe 3 hydromull méso 4 hydromull oligo	sol	21 : origine du substrat 1 marine 2 arène
10 : feuilles blanchies (Ln) 1 0-1 an 2 1-2 ans 3 2-5 ans 4 >5 ans	12 : épaisseur horizon a1 1 4-6 cm 2 8-9 cm	
11 : feuilles fragmentées (Lt) 1 <0,5 cm 2 1cm 3 2cm 4 3cm	13 : prof.horizon organominéral 1 <20 cm 2 30-40 cm 3 >80 cm	
	14 : abondance graviers 1 + 2 ++ 3 +++	
	15 : texture hor. organominéral 1 LAs 2 Las 3 Ls-LSa 4 Sal	

Tableau 54 : codage en classes croissantes des variables mésologiques

Les placettes sont toutes dans une situation topographique présentant une très faible pente (inférieure à 2%). La pente n'a donc pas été utilisée. Sur la carte au 1/25000, les stations sont comprises entre 2,5 m et 1 m d'altitude. La carte ne pouvant être utilisée pour une altitude plus précise par station, celle-ci a été appréciée par 4 classes ordonnées dans cette fourchette, de façon relative entre les stations, en fonction des déplacements.

Des variables sont choisies pour décrire l'hydromorphie et sa contrainte à l'enracinement. La périodicité de l'inondation a été estimée par trois classes en fonction d'observations faites en 02/96, pendant la période où, en moyenne, le niveau est le plus élevé (fig. 145). Il a également été pris en compte des observations de dépôts liés à plusieurs crues, traces sur les arbres (fig. 152), accumulations de feuilles déplacées. La profondeur de la nappe a été mesurée lors des sondages à la tarière entre le 17 et le 19/07/96. Il n'a pas plu dans l'intervalle. 4 classes ordonnées en résultent. Les observations d'oxydoréduction du fer, présence d'un gley oxydé, de gaines rouilles d'oxydation autour des racines, et la profondeur de racines nécrosées permettront de juger du caractère temporaire ou non de l'hydromorphie. Les gaines de rouilles sont observées autour des racines, qui subissent une anoxie temporaire, qui ont la possibilité d'enrichir leur périphérie en oxygène à partir de parties supérieures (BELGRAND 1983). Les racines nécrosées sont un signe de séjour dans la nappe anoxique. On a cherché à éviter les racines de plantes herbacées, mais l'identification est impossible. Seuls les rhizomes de phragmites sont parfaitement reconnaissables et les racines de chêne de diamètre assez fort. Les arbres des stations les plus inondées présentent en surface des signes

---

évidents de systèmes racinaires particulièrement traçants (fig. 153). Les pivots font un angle proche de  $90^\circ$  au collet et peuvent être suivis, juste recouverts d'humus, sur plus d'un mètre en périphérie de l'arbre. Ces variables obtenues uniquement lors des sondages à la tarière ne permettent pas de décrire le système racinaire mais peuvent être utilisées pour estimer la contrainte à l'enracinement de l'hydromorphie dans des situations contrastées.



Figure 152 : photographie de traces déposées sur un tronc de chêne par des crues antérieures à 1996 sur la station CHAS1.

Les recouvrements au sol des différentes strates, les hauteurs sous le houppier des chênes ont été regroupés en classes ordonnées. La définition des trois sylvofaciès ne peut pas à proprement parler être ordonnée, mais on fait l'hypothèse qu'il s'agit de trois stades de la colonisation à partir des haies.



Figure 153 : photographie de la base d'un tronc de chêne pédonculé à système racinaire traçant sur la station CHAS1.

Les variables pédologiques prises en compte sont morphologiques. L'épaisseur des horizons ou leur profondeur mesurées au moment des sondages à la tarière sont transformées en 3 ou 4 classes ordonnées. Les textures des horizons minéraux sont regroupées en 4 classes qui peuvent être ordonnées en fonction de la part de la fraction fine. La fraction grossière est représentée par une estimation de l'abondance des graviers. 4 types d'humus ont été

---

identifiés. Les 4 classes peuvent être ordonnées selon le fonctionnement hydrique de l'humus, les hydromulls sont opposées aux mulls et en fonction du niveau trophique, les humus oligotrophes sont opposés aux humus eutrophes.

Les variables sont toutes discrètes, l'ACM est adaptée au traitement de ces données (cf. annexe 1). Pour l'analyse, les variables sont considérées comme descriptives, elles sont placées en colonnes, et les stations, prises comme individus, sont en lignes. Le tableau traité est disjonctif, chaque classe de variable forme une colonne. Il ne contient pas de classe sans individus, ce qui explique que les limites de classes ne sont pas continues. Par exemple, pour la profondeur de l'horizon organominéral : 2 stations ont une profondeur inférieure ou égale à 20 cm, 3 entre 30 et 40 cm et 4 supérieure à 80 cm, le sondage à la tarière s'arrêtant, dans ces conditions, entre 100 et 110 cm. Ces trois groupes de stations forment trois classes, mais aucune station est observée avec des horizons compris entre 20 et 30 cm ou entre 40 et 80 cm. Les classes sans occurrence sont interdites par l'analyse et pour ne pas diminuer le sens de chacune, les limites de classes ont été choisies discontinues (tab. 55).

### 3 Résultats d'ACM

Les deux premières valeurs propres se dégagent des autres (fig. 154A), elles représentent 28,6 et 18,1 % de la variance du nuage. Les deux premiers axes résument au mieux l'information du nuage. L'ACM permet la double représentation des lignes et des colonnes, donc des stations et des classes de variables, sur la même carte factorielle.

#### 3.1 Répartition des stations

Les stations sont réparties le long de l'axe 1 (fig. 154B). Trois groupes peuvent être distingués. Les points représentant CAM2, VES1 et VES2 sont opposés à ceux de CHAS1, CHAS2 et VES3. Les stations CAM1, CHAD1 et CHAD2 sont intermédiaires. L'axe deux sépare ce groupe intermédiaire des autres. Si l'on tient compte des deux axes, on peut relier les stations, sauf VES3 qui est à l'écart, sur une figure en "U" inversé. Les stations peuvent être considérées sur un continuum défini par la figure en "U" mais elles sont irrégulièrement réparties dans ce gradient puisque trois groupes se forment.

#### 3.2 Variables "corrélées" aux axes

Chaque classe de variable est représentée par un point situé au barycentre des stations qui la possède. Les variables utilisées sont presque toutes ordinales, on peut donc relier les différentes classes de chaque pour juger de la relation entre l'ordre des classes et les axes factoriels. De plus, ADE propose un rapport de corrélation entre la variable et les axes (cf. annexe 1). Les variables qui ont les rapports les plus forts expliquent le mieux la définition des axes. Les coefficients sont les plus élevés sur l'axe 1 (tab. 55) pour les variables : sylvofaciès, recouvrement de la futaie, altitude, abondance de gravier, base et épaisseur de l'horizon tourbeux, et profondeur des racines mortes et niveau de la nappe en juillet.



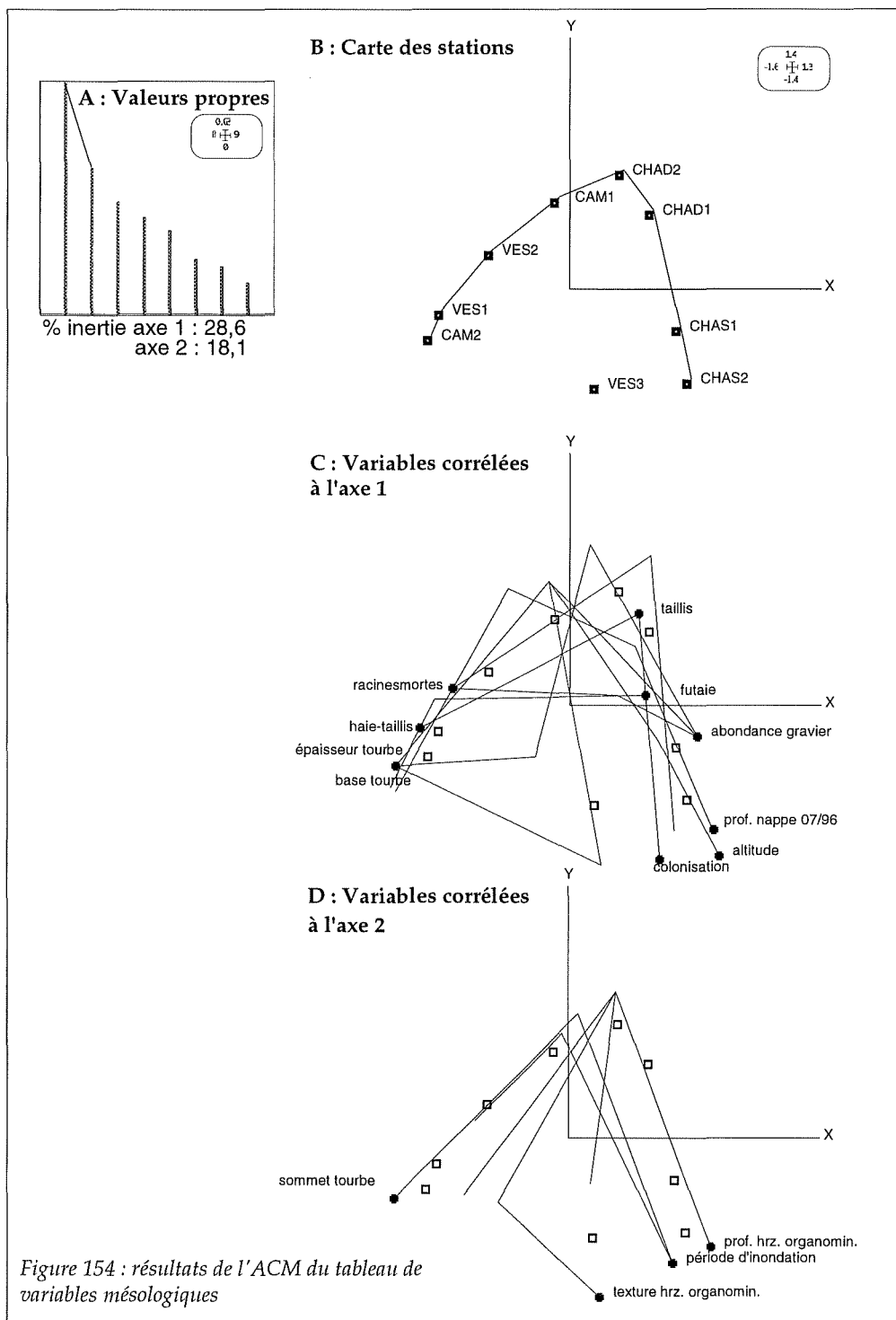


Figure 154 : résultats de l'ACM du tableau de variables météorologiques

Le coefficient, qui tend vers 0 et 1, ne donne pas de sens à la relation, car les axes sont des directions où l'opposition entre des points peut être interprétée mais pas le signe des coordonnées. Cependant, dans notre cas, les classes peuvent être ordonnées et comparées au gradient des stations. Le sens croissant est attribué au gradient de CAM2 vers CHAS2. Une variable peut être dite directement corrélée au gradient quand le coefficient est élevé et que sa classe la plus faible est près de CAM2, bien que le calcul du rapport de corrélation ne soit pas exactement un coefficient de corrélation.

Sur les figures 154C et D, le nom de la variable est positionné près du point de la classe 1 qui représente la valeur la plus faible. On observe que l'altitude corrèle inversement avec le gradient. Les stations s'ordonnent le long des classes d'altitude décroissantes : des îles vers le marais. Les variables les plus corrélées directement sont : la profondeur des racines mortes, l'épaisseur et la profondeur de la base de la tourbe. L'axe 1 oppose les sols uniquement organominéraux de l'île et les sols du marais, tourbeux. L'abondance de graviers corrèle inversement avec le gradient. La partie supérieure du sol est plus riche en graviers sur l'île qu'en direction du marais, par suite du colluvionnement. La nappe en juillet est plus proche de la surface dans le marais. Ces variables pédologiques et topographiques, les plus corrélées, indiquent bien que l'axe de diversité le plus important du nuage de points est lié à la topo - séquence.

variable	axe 1	axe 2	variable	axe 1	axe 2
profondeur nappe juil-96	0,96	0,64	sommet hor. tourbeux	0,74	0,89
épaisseur de l'hor. tourbeux	0,89	0,52	texture hor. organominéral	0,19	0,82
base hor. tourbeux	0,88	0,64	prof. hor. organominéral	0,71	0,77
abondance gravier	0,86	0,04	profondeur racines mortes	0,81	0,72
altitude	0,85	0,62	profondeur nappe juil-96	0,96	0,64
recouvrement futaie	0,82	0,06	sylvofaciès	0,81	0,64
sylvofaciès	0,81	0,64	base hor. tourbeux	0,88	0,64
profondeur racines mortes	0,81	0,72	période d'inondation	0,47	0,62
sommet hor. tourbeux	0,74	0,89	altitude	0,85	0,62
prof. hor. organominéral	0,71	0,77	épaisseur de l'hor. tourbeux	0,89	0,52
humus	0,71	0,39	humus	0,71	0,39
substrat	0,70	0,03	recouvrement herbacées	0,46	0,32
gley oxydé	0,70	0,03	hauteur houppier	0,52	0,32
recouvrement sous-étage	0,52	0,26	gainés d'oxidation racinaires	0,30	0,29
hauteur houppier	0,52	0,32	feuilles fragmentées	0,50	0,28
recouvrement arbustes	0,52	0,13	recouvrement sous-étage	0,52	0,26
feuilles fragmentées	0,50	0,28	épaisseur a1	0,35	0,21
période d'inondation	0,47	0,62	recouvrement arbustes	0,52	0,13
recouvrement herbacées	0,46	0,32	feuilles blanchies	0,43	0,08
feuilles blanchies	0,43	0,08	recouvrement futaie	0,82	0,06
épaisseur a1	0,35	0,21	abondance gravier	0,86	0,04
gainés d'oxidation racinaires	0,30	0,29	substrat	0,70	0,03
texture hor. organominéral	0,19	0,82	gley oxydé	0,70	0,03

Tableau 55 : rapports de corrélation entre les variables mésologiques et les axes factoriels de l'ACM.

Cependant, le recouvrement de la futaie inversement corrélé et les sylvofaciès indiquent que l'axe de colonisation suit également la topo - séquence. Ceci montre que le transect réalisé n'a pas qu'un axe de diversité pédologique mais également de dynamique du peuplement.

Des variables corrèlent fortement avec les deux axes (fig. 154D) : l'épaisseur de l'horizon organominéral, le sommet de l'horizon tourbeux et la période d'inondation. Ceci peut paraître contradictoire, car les axes factoriels sont perpendiculaires deux à deux et donc non corrélés. Le rapport de corrélation indique en fait que la variance des coordonnées des points des modalités s'exprime autant dans la variance de celle des points stations sur les deux axes. Les variables jouent un rôle dans l'interprétation des deux axes (CHESSEL et THIOULOUSE 1996). Ces variables suivent d'autant mieux la figure en "U" du continuum qui est définie par les deux axes. Elles sont donc celles pour lesquelles le transect est le plus représentatif. En direction du marais, l'horizon organominéral est plus mince, la tourbe y est plus proche de la surface, le sol est inondé le plus souvent (fig. 154D). Il n'apparaît pas de variable de structure du peuplement.

Seule la texture des 30 premiers centimètres corrèle fortement avec le second axe uniquement. La répartition des classes montre que la texture est plus grossière en direction du marais sauf pour la station VES3 qui se singularise par une plus grande importance des argiles.

### 3.3 Carte par types de variables

L'axe principal de diversité suit la topo - séquence, cependant en analysant la distribution des classes des variables le long du gradient, des aspects du milieu selon les stations peuvent être précisés.

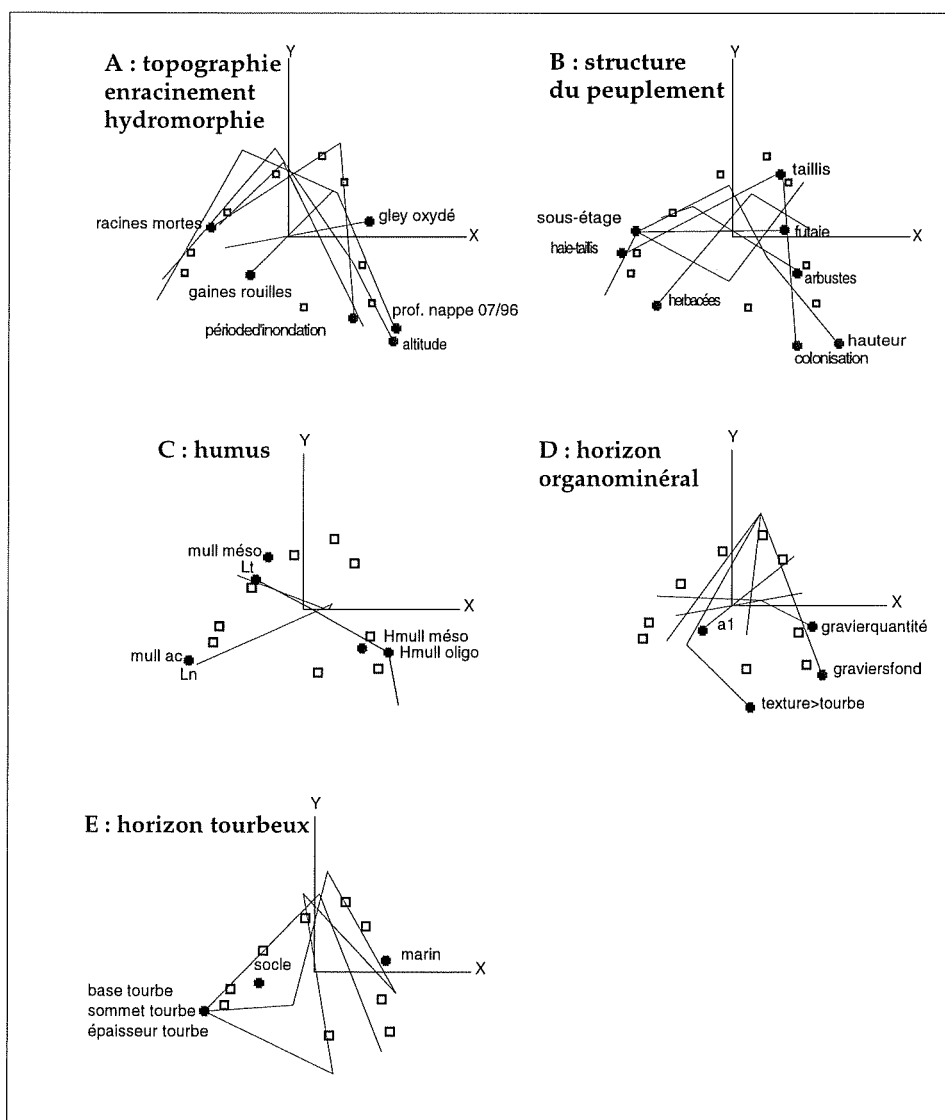


Figure 155 : cartes factorielles de l'ACM par types de variables

Les variables qui représentent la topographie, l'hydromorphie et l'enracinement ont des classes qui se disposent le long de la figure en "U" du continuum (fig. 155A). Les caractères d'hydromorphie permanente, contraignant l'enracinement, sont les plus nets pour les stations CHAS1 et 2 et VES3. Les classes de variables liées à ce groupe sont : la profondeur de la nappe en juillet 1996 la plus faible, l'inondation chaque année, la présence de gaines d'oxydation racinaires, des racines mortes dès 40 cm. L'hydromorphie des stations intermédiaires apparaît plus temporaire. La formation d'un gley oxydé, la profondeur de la nappe en juillet 1996 entre 60 et 90 cm mais une inondation hivernale fréquente montre que le niveau de la nappe subit une variation saisonnière de grande amplitude. Enfin sur l'île la nappe est absente en juillet, l'inondation rare et l'enracinement ne montre pas de signes de contraintes liées à l'hydromorphie. Le gley oxydé, rencontré plus profond, indique une nappe hivernale.

Les variables de structures du peuplement (fig. 155B) montrent que la colonisation suit la topo - séquence. La hauteur sous le houppier et le recouvrement de la futaie ont les classes qui suivent le plus la figure en "U". Pour les peuplements qui comportent deux étages

d'arbres, le recouvrement des herbacées est inférieur alors que les arbustes y sont plus abondant que dans les stations de taillis composé uniquement d'une strate d'arbres. La station VES3 se singularise par une strate arborée unique de faible hauteur où les arbres sont assez espacés et des strates arbustive et herbacée également peu recouvrantes.

Les humus observés sont influencés par la nappe uniquement pour les stations les plus avancées sur le marais (fig. 155C). L'horizon de feuilles fragmentées (Lt) est en général plus épais vers le marais ce qui indique une assimilation de la matière organique plus lente. L'horizon A1 est toujours présent, son épaisseur varie peu entre les stations. Les points représentant les classes d'épaisseurs sont donc centrés (fig. 155D). La formation d'horizon humique n'a pas été observée parmi les stations. Il ne semble donc pas que la matière organique s'accumule. Tous les sols subissent les variations saisonnières du niveau de la nappe qui induit une dessiccation. Ils possèdent un horizon enrichi par des apports de surface, organominéral, même si celui-ci est plus mince sur les sols tourbeux (fig. 155D). Ces caractéristiques expliquent probablement que même pour CHAS2 où l'épaisseur de tourbe approche les 2 m, il n'y a pas formation d'un anmoor.

Pour les variables qui représentent l'épaisseur de tourbe et la texture, VES3 est associée à des classes particulières (fig. 155D et E). VES3 est située à une altitude basse, au contact du marais. L'hydromorphie est une contrainte pour l'enracinement, des racines mortes sont observées à 40 cm. Ceci explique la position du point VES3 dans les stations proche du marais. Mais le sol ne comporte pas un horizon organique épais et la texture est plus argileuse que pour les autres sols.

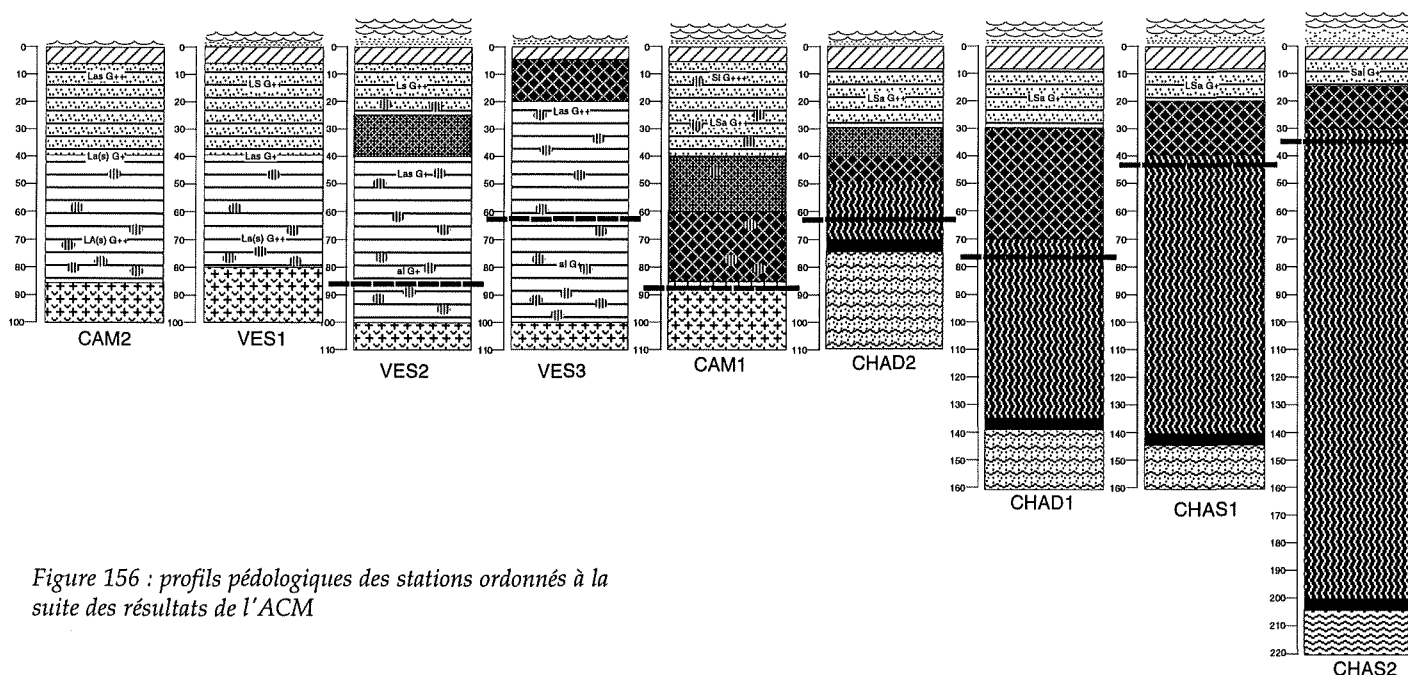


Figure 156 : profils pédologiques des stations ordonnés à la suite des résultats de l'ACM

#### 4 Conclusion

Les stations sont choisies le long d'une topo - séquence perpendiculaire à la limite du marais. L'analyse de variables décrivant le milieu montre que les caractères pédologiques sont effectivement très différenciés le long de cet axe. Toutefois, la dynamique de colonisation suit également la topo - séquence mais les variables qui sont le mieux représentées par l'échantillonnage se rapportent à la topographie et à la pédologie. Tous les peuplements restent de petite dimension et issus d'un développement récent du chêne pédonculé. Des aspects dendrochronologiques comme l'âge des arbres seront liés à ce type de peuplements.

---

Les deux premiers axes de l'ACM réalisée sur les variables mésologiques définissent un continuum où s'ordonnent les stations. Cet ordre fait apparaître VES3 comme une station particulière. Les autres placettes peuvent être associées en trois groupes en fonction de leur avancement en direction du marais. Des stations sont situées sur l'île et dépendent exceptionnellement du cycle annuel du marais. Des stations intermédiaires présentent des caractéristiques qui sont issues des influences de la nappe, cependant la contrainte reste limitée. Enfin, des stations dominées par le chêne sont proches des peuplements spécialisés du marais. La nappe est alors une contrainte importante. La présence de la nappe dans le sol et d'un horizon tourbeux sont les facteurs du milieu les plus rapport avec la définition de ces groupes. La figure 156 présente les profils pédologiques après le tri des stations.

## III Description de la végétation

### 1 Tableau phytoécologique

Les conditions stationnelles peuvent être décrites par le cortège des espèces végétales qui s'y développent. Nous ne disposons pas d'étude particulière des formations prospectées. Les études de la végétation menées sur le marais se sont concentrées sur les peuplements les plus dépendants de l'hydromorphie. Le caractère indicateur des espèces est donc fourni par des références bibliographiques générales, principalement la flore forestière française (RAMEAU *et al.* 1989). La compilation des renseignements phytosociologiques sur une aire vaste, comme c'est le cas dans la flore forestière, aboutit nécessairement à une généralisation du caractère indicateur des espèces. Toutefois, s'il reste important de situer les peuplements étudiés dans les principaux axes de diversités, hydrique et trophique, l'objectif principal est d'ordonner les stations de prélèvements dendrochronologiques. L'analyse relative des relevés, qui ne dépend pas directement du caractère indicateur des espèces, revêt donc l'intérêt principal. Le cortège floristique est considéré représentatif de facteurs du milieu qui ne sont pas nécessairement identifiés.

Pour comparer les relevés, le tableau de coefficients d'abondance - dominance est modifié de façon à être utilisable dans une analyse factorielle des correspondances (AFC). 0 est attribué à l'espèce lorsqu'elle est absente, 1 lorsqu'elle est rare. Dans les autres cas, 1 est ajouté au coefficient de Braun-Blanquet.

### 2 Résultats d'AFC

Les trois premières valeurs propres se détachent des autres (fig. 157A), elles représentent 31,2 %, 24,2 % et 15,9 % de la variance du nuage. Les trois premiers axes résument au mieux la variance du nuage et comportent une information à expliquer. L'AFC permet la double représentation des lignes et des colonnes, donc des espèces et des stations, sur la même carte factorielle.

#### 2.1 Carte des stations

Les stations, sauf CHAD1, sont réparties le long de l'axe 1 (fig. 157B). CHAS1 et 2 sont opposées à VES1, CAM2 et VES2. Un groupe intermédiaire est également très réparti sur l'axe 2. CHAD1 est la station la plus rejetée sur cet axe. Cependant, en tenant compte des deux premiers axes, on peut relier les stations par une figure proche d'un "V" inversé suite à

l'individualisation de CHAD1. Cette figure définit un gradient sur lequel on peut ordonner les stations. Certaines présentent une individualisation forte. Il s'agit de CHAD1 sur l'axe 2 et de CAM1 sur l'axe 3 (fig. 157C).

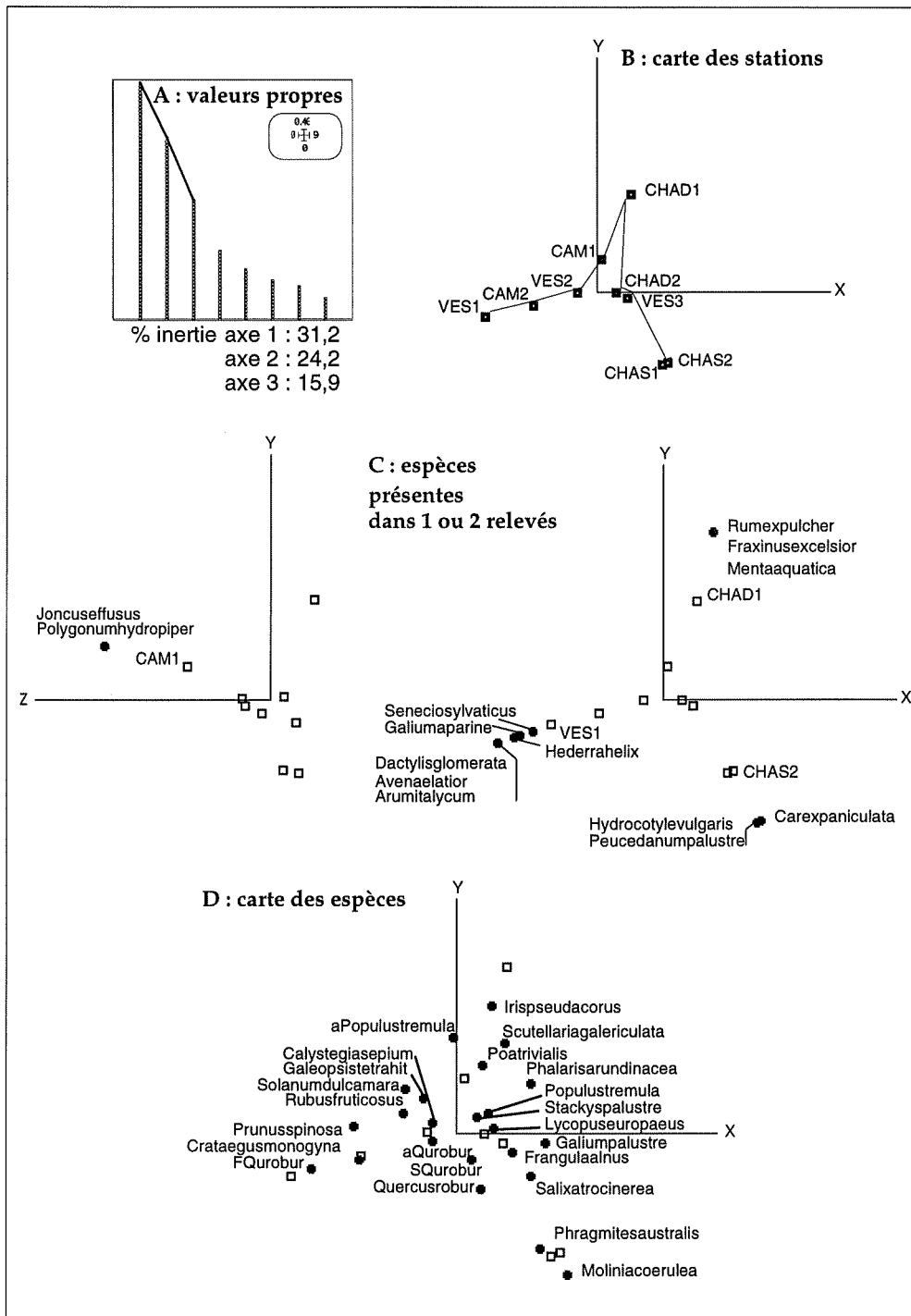


Figure 157 : résultats de l'AFC du tableau de relevés floristiques

## 2.2 Carte des espèces

Le nombre de relevés analysés est faible, de plus ils sont assez diversifiés dans la mesure où des espèces ne sont présentes que dans un seul ou deux relevés. Ceci explique que les axes 2 et 3 soient respectivement définis par une seule station. De même, l'axe 1 résulte pour une part de l'opposition des espèces présentes uniquement dans les stations VES1, CAM2 et CHAS1, CHAS2 (fig. 157C). Dans une logique de bio-indicateur, ces espèces véhiculent une information importante puisqu'elles permettent d'individualiser des stations.

4 groupes d'espèces, répartis sur les 3 axes, peuvent être formés. Les deux ensembles d'espèces qui sont associés aux extrémités de l'axe 1 sont en partie responsables du plus grand axe de diversité du nuage. Leur caractère indicateur renseigne donc sur le facteur principal de la diversité entre les stations.

Les espèces suivantes sont opposées sur l'axe 1 : *Dactylis glomerata*, *Avena elatior*, *Arum italicum*, *Hedera helix*, *Galium aparine* d'une part et *Senecio sylvaticus*, *Hydrocotyle vulgare*, *Peucedanum palustre* et *Carex paniculata* d'autre part. Les espèces prairiales présentes dans la station VES1 montrent que la formation forestière est récente. Les premières sont mésophiles alors que les secondes sont hygrophiles. Les espèces des deux autres groupes, qui induisent l'individualisation des stations CHAD1 (*Rumex pulcher*, *Mentha aquatica* et *Fraxinus excelsior*) et CAM1 (*Juncus effusus* et *Polygonum hydropiper*) sont mésohygrophiles à hygrophiles (fig. 157C). La carte factorielle des espèces présentes dans plus de deux relevés confirme les observations précédentes. Les espèces les plus hygrophiles : *Salix atrocinerea*, *Phragmites australis* et *Molinia caerulea* sont opposées aux espèces mésophiles comme *Crataegus monogyna* et *Prunus spinosa*. (fig. 157D). *Poa trivialis*, *Scutellaria galericulata* ou *Iris pseudacorus*, mésophiles à hygrophiles, sont rejetées sur l'axe deux.

stations	VES1	CAM2	VES2	CAM1	CHAD1	CHAD2	VES3	CHAS1	CHAS2
futaie (recouvrement)	70	40	70	0	0	0	0	0	0
<i>Quercus robur</i>	4	3	4						
sous-étage (recouvrement)	40	70	40	90	100	100	70	100	90
<i>Quercus robur</i>	3	4	3	4	3	5	4	5	4
<i>Populus tremula</i>					4				
arbustes (recouvrement)	20	50	30	40	20	10	10	10	5
<i>Crataegus monogyna</i>	+	+	+			+			
<i>Prunus spinosa</i>	2	3	2	1	+				
<i>Quercus robur</i>	+	+	+		+		+	+	
<i>Rubus fruticosus</i>	1	2	1	2	+	1	+		
<i>Solanum dulcamara</i>	+	+	+	+	+	+			
<i>Populus tremula</i>			1		+				
<i>Fraxinus excelsior</i>					+				
<i>Frangula alnus</i>			1		+	+	+	+	+
<i>Salix atrocinerea</i>				+			+	+	
<i>Salix atrocinerea mort</i>			+		+		+	+	
herbacées (recouvrement)	50	20	90	90	90	100	60	90	100
<i>Quercus robur</i>	+		1		+			1	+
<i>Arum italicum</i>	+								
<i>Avena elatior</i>	+								
<i>Dactylis glomerata</i>	+								
<i>Hedera helix</i>	2	+							
<i>Galium aparine</i>	1	+							
<i>Senecio sylvaticus</i>	+	+							
<i>Calystegia sepium</i>		1	+	1			1		
<i>Galeopsis tetrahit</i>	+	+	+	+	+	+	+		
<i>Polygonum hydropiper</i>				+					
<i>Juncus effusus</i>				1					
<i>Rumex pulcher</i>					+				
<i>Mentha aquatica</i>					2				
<i>Iris pseudacorus</i>			+	+	1		+		
<i>Scutellaria galericulata</i>				+	+	+	+		
<i>Poa trivialis</i>	+		2	4	4	4	2	+	
<i>Phalaris arundinacea</i>				1	1	+			1
<i>Stachys palustre</i>		+	+	+	+	+	+	+	
<i>Populus tremula</i>			1	+				+	
<i>Lycopus europaeus</i>		+			+		+		+
<i>Galium palustre</i>				+	+		+	+	+
<i>Phragmites australis</i>		+	+			+	2	2	3
<i>Molinia caerulea</i>			+			1	+	3	4
<i>Carex paniculata</i>								1	+
<i>Hydrocotyle vulgaris</i>								+	
<i>Peucedanum palustre</i>								+	

Tableau 56 : tableau phytoécologique ordonné. Gras : espèces caractéristiques. Gras le plus fort : espèces présentes dans un ou deux relevés.

Les lignes du tableau phytoécologique peuvent être triées en prenant les espèces dans l'ordre des projections sur la structure en "V". Dans le même temps, les colonnes sont ordonnées dans le même sens, de VES1 vers CHAS2 (tab. 56).

Les espèces qui sont présentes dans un ou deux relevés peuvent être considérées caractéristiques de ceux-ci. Elles permettent d'individualiser les deux stations VES1 et CAM2 (tab. 56). Également, CHAS1 et CHAS2 leur sont opposées et CHAD1 et CAM1 comportent des espèces qui leur sont propres. Les espèces plus fréquentes, qui contribuent fortement aux 2 premiers axes factoriels, confirment l'opposition entre les deux groupes précédents. Par contre, elles montrent qu'un groupe de stations intermédiaires aux deux précédents peut être constitué. Il unit les stations où *Poa trivialis* est abondant : VES2, CAM1, CHAD1, CHAD2 et VES3. Le tableau ordonné montre en fait une assez grande diversité des espèces peu abondantes dans ces relevés. Ainsi le relevé de VES3 présente une similitude plus élevée avec celui de CHAS1 qu'avec celui de VES2 (tab. 56). Les stations sont effectivement réparties le long d'un continuum mais du fait qu'elles sont peu nombreuses et diversifiées, les groupes constitués sont assez dispersés.

### 2.3 Caractère indicateur des espèces

Les stations analysées représentent des peuplements assez typiquement différents. Ceci permet d'utiliser les caractères indicateurs "généraux" des espèces, définis sur toute leur aire de distribution dans la flore forestière française (RAMEAU *et al.* 1989).

Pour chaque station, le nombre d'espèces par caractère indicateur permet de la situer dans les deux axes principaux de diversité de la végétation, le niveau trophique et le niveau hydrique (tab. 57). Seule la présence des espèces (répertoriées par la flore) est considérée.

niveau trophique	VES1	CAM2	VES2	CAM1	CHAD1	CHAD2	VES3	CHAS1	CHAS2
acidiphiles			2		1	2	2	2	2
acidiphiles larg.			1	1	1		2	2	
acidiclinales	2	2	2	2	2	2	2	1	
acidiclinales larg.	1	1		1					
neutroclines larg.	4	7	5	4	7	4	6	5	6
neutroclines	1	1	1	1	1				
neutronitroclines				1					
neutronitrophiles	1	1	1	1	2	1			
mésoneutrophile	1	1	2	2	3	2	2	2	
neutrophile			1	1	1		1		
niveau hydrique	VES1	CAM2	VES2	CAM1	CHAD1	CHAD2	VES3	CHAS1	CHAS2
mésoxérophiles					1				
mésophiles	6	6	4	3	3	3	2		
hygroclines				1					
mésohygroclines	4	4	5	3	5	2	3	3	1
mésohygroclines larg.				1	1				
hygroclines larg.			3	1	2	2	4	4	2
hygroclines		3	3	5	7	4	6	6	5

Tableau 57 : nombre d'espèces par niveaux trophique et hydrique dans chaque relevé

Les espèces qui tolèrent des niveaux trophiques de large amplitude dont l'optimum est cependant dans des conditions neutroclines sont les plus nombreuses pour toutes les stations (tab. 57). Des espèces inféodées plus strictement à des sols dont la richesse minérale est proche de la saturation, mésoneutrophiles à neutrophiles, sont observées dans la plupart des stations. De même des espèces acidiclinales sont présentes dans une majorité de relevés. La présence d'espèces indicatrices de niveaux trophiques assez différents tend à montrer que les



---

conditions trophiques sont peu contraignantes. Ceci est également confirmé par l'observation d'humus ne présentant pas d'horizon humique. Cependant, deux espèces acidiphiles sont présentes pour les stations CHAD2, VES3, CHAS1 et 2 dont le sol est peut-être plus dessaturé. *A contrario*, les espèces neutro-nitrophiles et méso-neutrophiles sont plus nombreuses pour les stations VES2, CAM1 et CHAD1, les sols y sont peut-être plus saturés. On observe en fait peu de différences entre les stations. Leur organisation, de VES1 vers CHAS2, ne tient donc pas sa source dans un gradient trophique.

Des espèces mésohygrophiles apparaissent dans le contenu de tous les relevés. Toutefois, elles sont plus nombreuses dans les stations VES2 et CHAD1. Les stations VES1 et CAM2 contiennent le plus d'espèces mésophiles. Celles-ci sont les moins inféodées à la présence d'eau dans le sol, exception faite d'une espèce mésoxérophile. A l'inverse, les relevés CHAS1 et 2 sont constitués presque exclusivement d'espèces hygrophiles. Le nombre d'espèces en fonction du niveau hydrique est donc en relation avec l'ordre établi à partir de l'analyse du tableau. Le facteur hydrique structure le tableau d'une façon beaucoup plus marquée que le niveau trophique. L'ordre des stations reflète nettement une variation le long d'un gradient hydrique.

### 3 Conclusion

Le contenu floristique des stations permet de les ordonner. Les stations sont inégalement réparties dans un continuum. Les caractères indicateurs des espèces montrent nettement que le principal axe de diversité est hydrique. Ce gradient peut être mis en rapport avec la topo - séquence allant des îles vers le marais. Les conditions hydriques des deux stations les plus élevées sont mésophiles. Deux stations avancées dans le marais sont d'un niveau hydrique hygrophile. Entre ces deux groupes, les situations sont assez diversifiées. Le nombre d'espèces mésophiles, mésohygrophiles et hygrophiles évolue dans le sens du gradient. L'AFC montre que les stations dans une situation intermédiaires ont des contenus floristiques qui peuvent être particuliers. C'est principalement le cas de CHAD1 et de CAM1. Cette diversité est probablement le reflet de différences de fonctionnement hydrique des milieux qui était remarquable pour VES3 dans l'analyse du tableau mésologique.

Le chêne pédonculé, espèce neutrocline de large amplitude mésohygrophile rencontre très probablement des contraintes très différentes selon les conditions stationnelles qui viennent d'être décrites. Les conditions de développement, dans les peuplements les plus avancés sur la tourbe apparaissent très particulières. Les arbres anciens, datés autour de 1000 av. J.-C. sont en dépôt dans des situations encore plus avancées dans le marais. Toutefois, la croissance des jeunes chênes issus des peuplements hygrophiles peut être comparée à celle observée dans des situations moins dépendantes de la nappe et servir de modèle pour la compréhension des variations des largeurs de cernes particulières observées sur le matériel ancien.

# Chapitre 3

## CARACTÉRISATION DENDROCHRONOLOGIQUE

### DES PLACETTES

#### I Interdatation

##### 1 Constitution des moyennes stationnelles

Le synchronisme entre les graphiques de croissance qui proviennent des carottes du même arbre, puis ceux de tous les arbres d'une station sont vérifiés en les superposant sur une table lumineuse. Les cernes des arbres jeunes sont larges à très larges. Peu d'erreurs sont donc survenues, des cas d'oubli ou de cernes mesurés deux fois n'ont posé aucun problème de correction. Les arbres âgés ont, pour la plupart, subi des émondages qui perturbent leur croissance. Les cernes suivant l'année d'émondage ont un bois final très mince voire absent qui peut rendre difficile leur perception (cf. *infra*). La vérification est alors basée sur la carotte où les cernes sont le mieux observables.

Lorsque la moyenne stationnelle est obtenue, la date du dernier cerne est attribuée. Les stations sur la commune de la Chapelle-des-Marais ont été carottées en 1996 et celle d'Ile d'Errand en 1995. Dans les deux cas, les prélèvements ont eu lieu en juillet alors que l'élaboration du dernier cerne était incomplète. Celui-ci n'est pas mesuré mais est pris en compte comme valeur n'ayant pas d'incidence dans les calculs.

	Camer		Vaie-ès-Sauzes			Chapelle R.D.		Chapelle Stade		51 Ile d'Errand		F.D. Gâvre
	CAM1	CAM2	VES1	VES2	VES3	CHAD1	CHAD2	CHAS1	CHAS2	51IDE1	51IDE2	GAV
origine	1884	1861	1919	1935	1958	1945	1954	1939	1961	1854	1863	1831
terme	1996	1996	1996	1996	1996	1996	1996	1996	1996	1995	1995	1995
Nb.éch.	6	5	5	6	5	6	6	5	5	6	7	9
Nb.c./an	2	3	4	5	4	4	5	4	5	4	5	8
Nb.c.	113	136	78	62	39	52	43	58	36	142	133	165
âge moy	41	88	61	49	30	32	33	47	33	90	86	150
c.moy	270	271	351	463	490	453	560	329	393	240	277	115
e.typ	184	175	140	203	158	169	164	181	185	123	152	34
r1	0,82	0,75	0,68	0,81	0,79	0,75	0,61	0,85	0,88	0,77	0,78	0,77
r2	0,71	0,51	0,58	0,68	0,67	0,64	0,46	0,74	0,81	0,64	0,66	0,69
75%	67	62	82	59	77	58	72	82	70	55	40	58
90%	38	25	41	33	55	36	57	53	52	40	39	48
rmoy	0,41	0,1	0,47	0,39	0,35	0,35	0,36	0,56	0,5	0,35	0,24	0,46
EPS	0,91	0,44	0,9	0,9	0,84	0,89	0,9	0,93	0,91	0,89	0,86	0,97

Tableau 58 : paramètres descriptifs des moyennes stationnelles

Les chronologies stationnelles des marais de Brière sont comparées à celle établie pour la forêt domaniale de Gâvre communiquée par T. Keller du laboratoire de Botanique Historique et Palynologie de l'université d'Aix-Marseille III. Les arbres utilisés dans cette série sont issus d'une formation forestière beaucoup plus stable que celles en bordure des marais.

Le nombre d'individus prélevés par station, entre 5 et 9, est à la limite inférieure possible pour obtenir une représentation (tab. 58). Ce nombre est imposé par le type de peuplement. Les anciennes haies délimitaient des parcelles allongées en direction du marais. Les peuplements résultant de leur évolution sont encore linéaires dans cette direction. Il est donc apparu difficile d'obtenir plus de 6 arbres se développant dans des conditions de milieu homogènes et susceptibles de fournir au moins 30 cernes. Ceci se traduit également par un âge moyen très faible, en général proche de 30 ans. Les chronologies plus riches en cernes (CAM2 et 51IDE1-2), comportent des individus inclus dans les anciennes haies.

Les arbres jeunes et se développant dans des conditions de faible compétition présentent une croissance moyenne très élevée, comprise entre 560 et 240 /100 mm. Ces valeurs sont nettement supérieures aux 115 /100 mm observés dans la forêt de Gâvre. La production moyenne dans cette forêt s'élève à 155 /100 mm si l'on ne considère que les 40 premiers cernes de chaque arbre. Cette valeur reste très inférieure à celles observées en Brière. D'une façon plus générale, il est rare d'observer des arbres se développant dans des peuplements fermés présentant une production moyenne de plus de 300 100/mm. La grande vigueur des chênes des bordures du marais est donc principalement à mettre en relation avec la dynamique de colonisation.

L'écart-type des largeurs en fonction du temps représente, selon les stations, environ la moitié de la valeur moyenne (tab. 58). La variation des largeurs est importante mais reste inférieure à ce qui est observé pour les séries subfossiles. Les arbres jeunes présentent souvent une croissance à forte variabilité. L'autocorrélation, comprise entre 0,61 et 0,88 explique une grande part de cette variation. Elle est significative pour un décalage d'un et deux ans, et montre le rôle majeur de la tendance dans les séries. Pour la station plus typiquement forestière, l'écart-type des largeurs n'atteint pas le tiers de la valeur moyenne et reste fortement expliqué par la tendance.

En fonction des stations, la qualité du synchronisme des croissances est très variable. Les pourcentages d'années caractéristiques restent tous élevés (tab. 58). Les écarts interannuels de quelques arbres provenant de conditions locales homogènes sont

---

typiquement très concordants. Cependant la corrélation moyenne, après standardisation en indices Except (cf. partie 2 chap.1), montre plus nettement que les séries individuelles de stations comme CAM2 présentent un synchronisme de qualité médiocre. Ce cas, le plus défavorable, est expliqué par l'âge et l'émondage des arbres. D'une façon générale, les séries d'arbres jeunes présentent un synchronisme assez faible. La corrélation moyenne entre les séries des stations ne comportant que des arbres jeunes est comprise entre 0,35 et 0,56. Le synchronisme entre les séries, parfois médiocre, associé à un nombre peu élevé d'individus, se traduit par une qualité de représentation statistique, estimée par l'EPS, faible pour plusieurs chronologies stationnelles. Toutefois, cette valeur dépasse le seuil de 0,85 (WIGLEY *et al.* 1984) dans 9 cas. La plupart d'entre elles doivent cependant être homogénéisées.

Le corpus analysé présente beaucoup de contraintes. L'âge des arbres est en limite de ce qui peut être utilisé en dendrochronologie et le nombre d'arbres atteignant cet âge reste faible. De plus les arbres âgés, inclus dans les haies, ont été émondés. Il est donc indispensable de maîtriser au mieux ces biais et de vérifier que les chronologies présentent bien une information commune liée aux facteurs régionaux. Malgré ces contraintes, les arbres échantillonnés en bordure des marais de Brière constituent un lot original, car il n'a pas été décrit de peuplements vivant actuellement dans des conditions qui peuvent être comparées à celles dont sont issus des chênes subfossiles. Cette absence constitue un obstacle majeur à l'interprétation des caractéristiques observées sur ce type de matériel (PILCHER *et al.* 1996). Les croissances des jeunes arbres de Brière peuvent être comparées le long d'une topo - séquence et contribuer à montrer que les variations du niveau de nappe peuvent être retenues pour expliquer en partie ces caractéristiques.

## 2 Émondage des arbres

### 2.1 Observations anatomiques

L'émondage des chênes, réalisé en dehors de la saison de végétation, pour une alimentation en bois de feu, peut être conduit principalement de deux façons, en têtard ou en ragoles (RENAUDIN 1996). Les têtards ont une croissance en hauteur qui est limitée par l'exploitation complète du houppier (étêtage) dès les premiers émondages vers l'âge de 15 à 25 ans. Les ragoles ont une silhouette beaucoup plus allongée qui est héritée de la conservation du houppier pendant une période d'élagage. Les branches sommitales sont les seules épargnées pendant 30 à 35 ans, favorisant la croissance en hauteur. Pendant l'émondage proprement dit toutes les branches sont exploitées. Dans le cas de ragoles, les bourgeons sont actifs tout au long du tronc alors que seule la zone sommitale est productive chez les têtards. La conduite en ragoles est principalement typique d'une zone est de la Bretagne, recouvrant l'Ille-et-Vilaine, comprenant une partie est du Morbihan et des Côtes-d'Armor. Ce type d'émondage est également observé dans le nord du département de la Loire Atlantique mais n'est pas développé en Brière et autour de l'estuaire de la Loire. Par contre, les chênes en têtards sont plus fréquemment observés. Leur tronc est court, environ 3 m, de fort diamètre, proche d'un mètre, et la zone de coupe préférentielle se traduit par une déformation (fig. 158). Cependant, les arbres les plus typiques des haies actuelles sont plus allongés et ont un houppier plus étalé, constitué de branches ramifiées de diamètre plus fort que celles des têtards (fig. 159).



Figure 158 : photographie de chênes émondés en forme de têtard et de forme élevée

Figure 159 : chênes de haie présentant un houppier bien développé.



L'émondage, quelle que soit la forme conduite, induit un arrêt brusque de la croissance radiale dont les aspects dendrologiques sont décrits par RENAUDIN (1996). Le plan transversal de certains arbres échantillonnés sur les placettes CAM1, CAM2 et 51IDE1-2 montre des figures anatomiques (fig. 160) proches de celles présentées par cet auteur. L'allure des cernes après le stress est identique entre les arbres ayant une forme de têtard et ceux présentant une bille plus allongée.

La première année suivant le stress, le cerne est presque exclusivement composé de bois initial (fig. 160). La dimension, le nombre d'assises et la taille des pores de cette zone ne sont pas significativement différents de ceux des cernes peu affectés par la taille (RENAUDIN 1996). Ceci peut être mis en relation avec plusieurs observations.

La croissance radiale est largement initiée avant la feuillaison mobilisant les réserves des années antérieures. Les mesures conjointes d'un indice de débourrement et de l'accroissement en circonférence permettent d'estimer que 43% de la croissance annuelle est réalisée avant que la transpiration des feuilles soit en place (BREDA 1994). Cette estimation est faite pour un peuplement fermé de chênes sessile et pédonculé en Lorraine. La proportion de bois formé dans ces conditions varie fortement d'une année sur l'autre : de 28 à 55% pour la période de 1990 à 1993. Elle est plus faible, 20%, pour un peuplement ayant subi une éclaircie. Toutefois, l'année suivant l'émondage l'observation du bois initial complet, qui représente en général un tiers de la largeur du cerne, concorde avec ces estimations. Elle montre également que la réactivation de la zone cambiale est indépendante de celle des bourgeons comme l'indique BREDA (1994). Par contre, le cerne ne comporte pas ou peu de bois final qui est plus dépendant de l'activité photosynthétique.

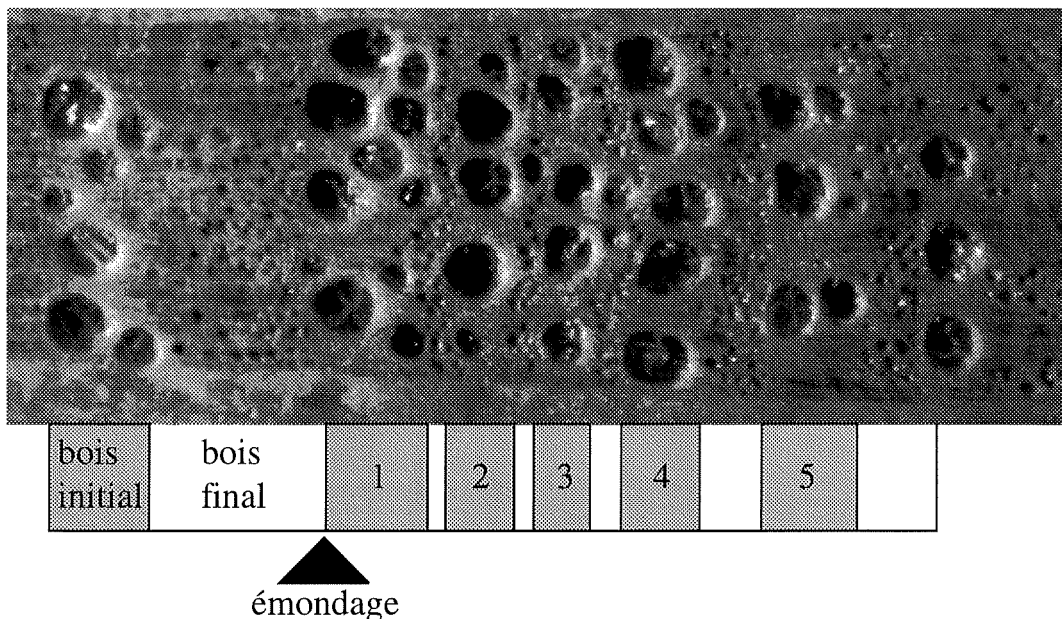


Figure 160 : photographie du plan transversal des cernes après émondage

Un an après l'émondage, le bois initial est affecté à son tour (fig. 160). On peut supposer que la perte en quantité des feuilles occasionne la mise à mal des réserves. De plus, une perte de capacité de transport un an après émondage est due à l'absence de bois final, dans le cerne de l'année d'émondage. Ces deux facteurs se traduiraient dans la largeur du bois initial avec un décalage. RENAUDIN (1996) observe une diminution du bois initial également dans le troisième cerne suivant l'émondage alors que le bois final augmente, ce qui peut également être observé sur la figure 160. Ce n'est que 4 ans après l'émondage que le bois initial a une largeur supérieure à celle de l'année antérieure et en moyenne après 5 ans qu'il acquiert à nouveau ces caractères typiques.

Les analyses dendroclimatiques montrent, d'une façon générale, que la largeur du bois initial est peu ou pas expliquée par les variables climatiques pour plusieurs espèces de chênes (*Q. robur*, *Q. petraea*, *Q. cerris*, *Q. pubescens*) (NOLA 1996). Par contre, elle apparaît significativement corrélée (directement) à celle du bois final de l'année antérieure (NOLA 1996). En ajoutant aux régresseurs climatiques (précipitations et températures mensuelles) la largeur du bois final de 1 à 3 années antérieures, les fonctions de réponse du bois initial sont alors globalement significatives pour les espèces *Q. petraea* et *Q. robur* dans le nord de l'Italie (NOLA 1996). La largeur de bois final est très explicative dans ces réponses, selon les sites et les espèces, lorsqu'elle est cumulée sur 1 à 3 années. Par contre, intégrer aux modèles les largeurs de bois final des années n-4 et n-5 réduit nettement la signification. Ces résultats suggèrent que la largeur du bois initial est en partie expliquée par la capacité de transports de la sève au printemps par quelques cernes antérieurs (NOLA 1996). Cependant, la largeur

de bois final peut également représenter le potentiel de réserve carbonée dont dispose l'arbre. La production de bois initial apparaît proportionnelle à la quantité de bois final des 2 à 3 cernes antérieurs alors que la corrélation avec la largeur entière est de qualité inférieure (NOLA 1996). Ceci est conforme avec l'hypothèse selon laquelle les vaisseaux de gros diamètre, de la zone initiale, n'assureraient le transport de la sève brute que pour une courte période voire une seule saison (COCHARD et TYREE 1990, COCHARD *et al.* 1992).

L'anatomie des cernes suivant l'émondage peut être mise en correspondance avec ce fonctionnement. Il existe un lien entre le développement du bois initial et celui du bois final antérieur. Le premier se rétablit après que le second augmente et la quasi absence de bois final est suivie d'une zone initiale constituée de pores de petit diamètre. Cette absence est probablement indicatrice d'une perte importante des réserves mais également d'une circulation imparfaite. Le premier cerne après l'émondage est constitué principalement de gros vaisseaux sujets à une embolie ou une cavitation qui peut les rendre non fonctionnels (COCHARD *et al.* 1992). On peut remarquer que les zones poreuses suivantes sont composées de vaisseaux plus petits (fig. 160) dont la durée de fonctionnement peut être jugée plus longue. De même, le bois final des 2e, 3e et 4e cernes après l'émondage comporte d'assez nombreux vaisseaux de petit diamètre.

L'émondage occasionne donc un stress qui implique une reconstitution des réserves mais on peut également remarquer que la réduction de diamètre des vaisseaux induit une modification de la capacité de conduction de la sève brute qui va dans le sens d'un allongement de la durée de fonctionnement des vaisseaux.

## 2.2 Périodicité des coupes et dendrochronologie

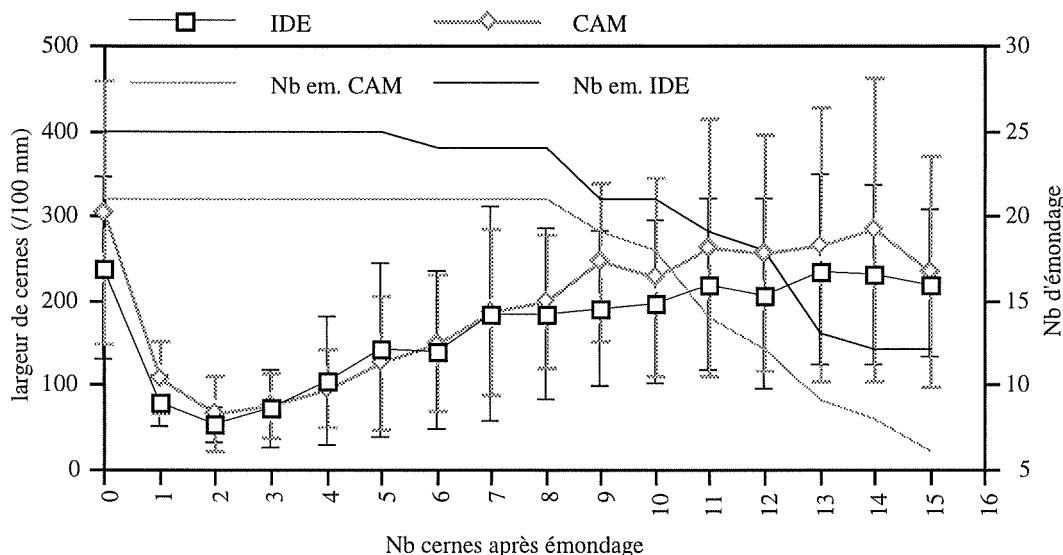


Figure 161 : largeur brute moyenne des cernes consécutifs des émondages. Barre : écart-type

L'émondage se traduit par une chute de la largeur de cerne observable sur les graphiques de croissance sous forme d'une "cuvette" dont le bord antérieur est plus raide que le bord postérieur (fig. 164). La figure 161 représente la largeur brute moyenne des cernes consécutifs d'un émondage, ayant lieu après l'élaboration du cerne 0. Les coupes sont diversement espacées dans le temps (cf. *infra*) et la pratique est progressivement abandonnée ce qui permet de représenter la croissance au-delà de la période type, mais en perdant une

part de la représentativité. Le nombre d'émondages considéré reste supérieur à 6 (fig. 161). Les placettes des îles de Camer et d'Errand ont été regroupées. Sur la première île, les arbres ont encore une forme typiquement en têtard, alors que, sur la seconde, les houppiers sont plus étalés et les billes plus élevées. Il n'apparaît pas de différence dans les conséquences de l'émondage entre les deux conduites. En moyenne, la croissance avant le stress est très élevée, entre 200 /100 mm et 300 /100 mm. Pendant trois années consécutives à l'émondage, elle est inférieure à 100 /100 mm puis le recouvrement dure environ 10 ans. La croissance est en moyenne supérieure à Camer mais on remarque que pendant une période de 8 années consécutives aux émondages les largeurs sont très similaires.

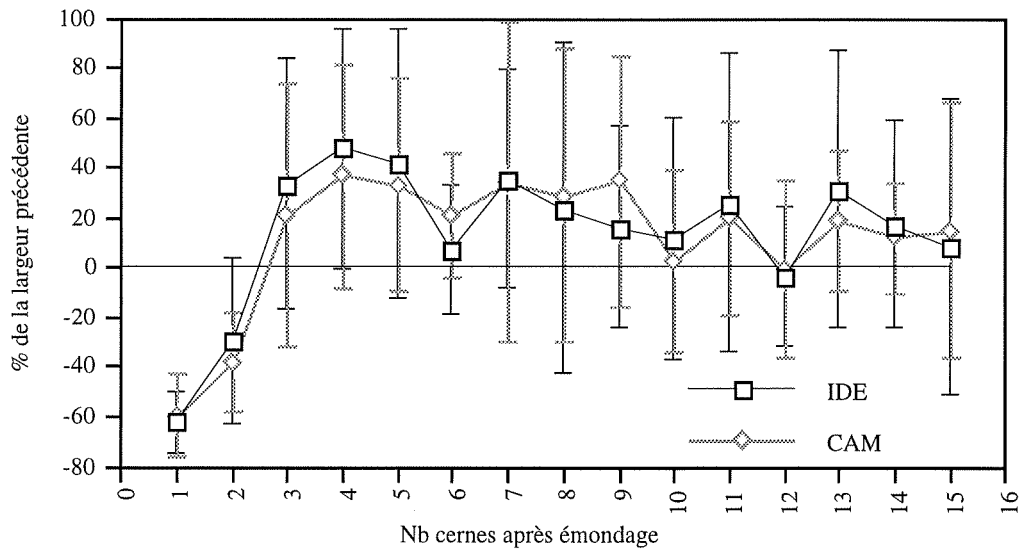


Figure 162 : variation interannuelle des cernes consécutifs des émondages. Barre : écart-type

Conformément à ce qui est décrit par RENAUDIN (1996), la variation de la largeur, exprimée en pourcentage de l'année précédente, apparaît négative deux années consécutives (fig. 162). A la 3e année, la largeur augmente, principalement par la production de bois final. La variation est encore nettement positive pour deux années. A partir de 6 ans après l'émondage, l'évolution de la largeur de cerne, en moyenne, est toujours positive mais plus faiblement. La moyenne réalisée ne tient pas compte des dates. L'évolution entre deux cernes consécutifs tend donc vers 0 avec une grande diversité lorsque l'effet du stress s'estompe, ce qui peut être observé à partir du 6e cerne. Cependant, l'arbre retrouve une production comparable à celle d'avant l'émondage uniquement après 9 à 10 années (fig. 163). En moyenne, à la fin de cette période, le stress peut être considéré recouvert. L'émondage semble

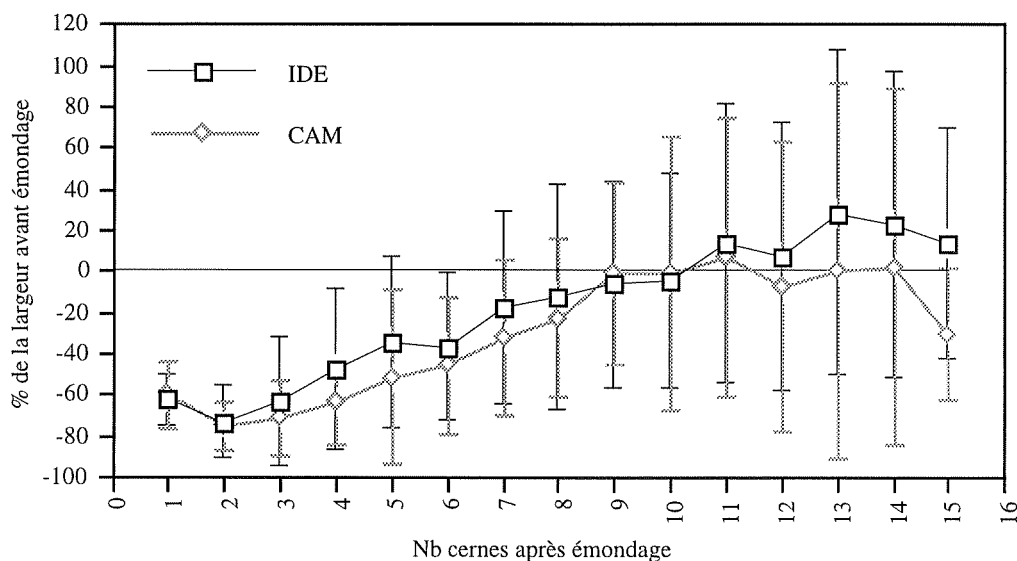


Figure 163 : valeur relative des cernes consécutifs des émondages par rapport à celui de l'année de coupe. Barre : écart-type



donc occasionner une période de désorganisation générale du fonctionnement, traduite par 4 cernes dont l'anatomie est particulière, suivie d'une récupération durant environ 5 à 6 années.

La coupe est répétée de façon régulière à Camer, en moyenne toutes les 11 années. Au plus 16 et au moins 7 ans séparent deux émondages. La périodicité subit plus de variations à l'Ile d'Errand, entre 5 et 20 ans, autour de 13 ans. Le développement d'un plus grand houppier est peut-être lié à cet espacement des coupes. Il apparaît donc que, dans la plupart des cas, les arbres sont en fin de recouvrement du stress alors que survient l'émondage suivant. De ce fait, les séries dendrochronologiques présentent très peu de variations interannuelles négatives en dehors du stress lui-même (fig. 164A et 165). Les largeurs représentent, pendant ces périodes, uniquement les effets de l'émondage et, très peu, les influences environnementales. Lorsque les coupes sont occasionnellement plus espacées, la croissance reste, en moyenne, en augmentation jusqu'à 15 ans après l'émondage (fig. 168). En effet, les arbres sont assez distants les uns des autres et ne subissent pas de concurrence. Ils restent donc très peu représentatifs des influences générales.

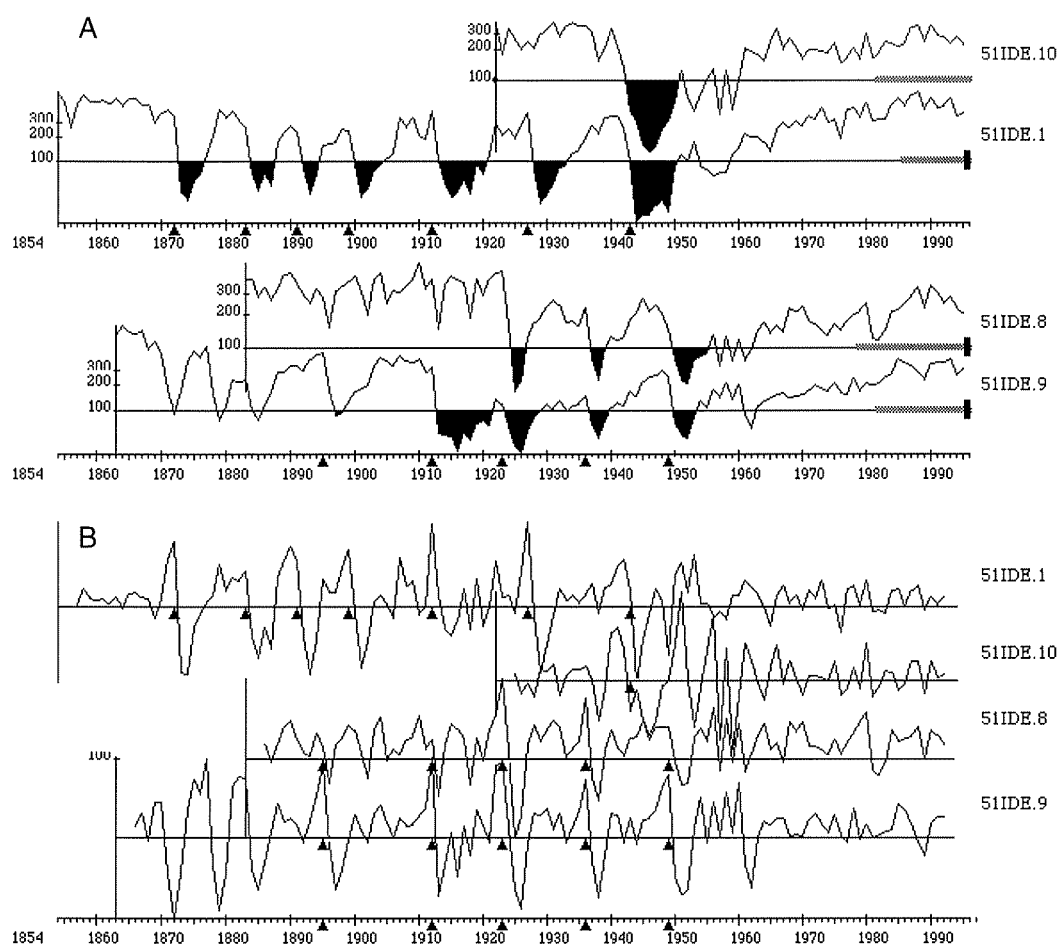


Figure 164 : largeurs de cernes de 4 arbres émondés à Ile d'Errand. Triangle : date d'émondage. A : valeurs brutes, B : indice Except

L'exploitation des branches est réalisée pour disposer de combustible. En fonction des propriétaires et de façon à gérer la ressource, il est donc rare que tous les arbres d'une même haie soient émondés en même temps. C'est particulièrement le cas à Camer. Les croissances sont donc très peu corrélées (fig. 165). Le coefficient moyen entre les séries de CAM2 s'élève à 0,10. Par contre, à Ile d'Errand, les arbres ont été exploités par bouquets. Il est possible de regrouper les croissances de ceux provenant de ces bouquets (fig. 164A). Cependant le synchronisme entre les groupes reste très faible. La standardisation des largeurs de cernes, ici en indice Except, ne permet pas de dégager d'avantage de signal commun aux

arbres des différentes provenances (fig. 164B). Lorsque les émondages sont réguliers, il est donc impossible d'interdater les séries à l'aide de leur corrélation. Ceci a déjà été observé par plusieurs auteurs à propos de matériel historique retrouvé dans des structures architecturales en pays bocagers (GUIBAL et PILCHER 1988, BERNARD 1997, DOUCERAIN et GIRARD CLOS 1998).

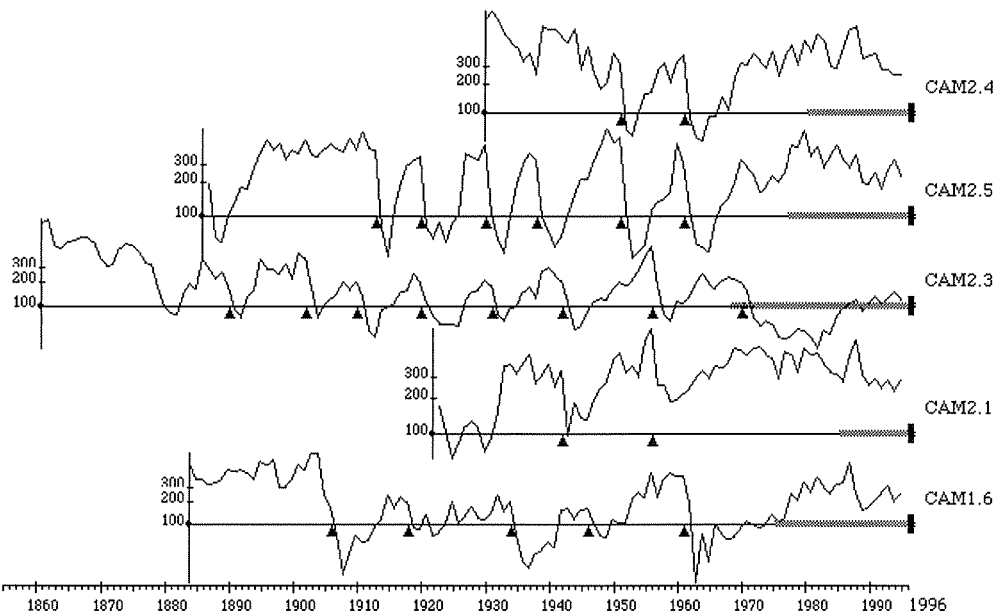


Figure 165 : largeurs de cernes de 5 arbres émondés à Camer. Triangle : date d'émondage

### 2.3 Chronologie des émondages

A la suite de modifications socio-économiques, l'émondage régulier de la totalité des arbres a été abandonné. Il est possible de dater cet abandon vers 1950, pour les arbres échantillonnés à Ile d'Errand (fig. 166). Cette dernière exploitation fait suite à une coupe réalisée en 1943 sur plusieurs individus qui n'avaient, en majorité, jamais été émondés alors que l'âge de certains devait le permettre. D'autres arbres d'âges comparables n'ont jamais subi de coupes induisant d'arrêt de croissance. L'émondage de cette haie apparaît donc peu régulier, hormis les 3 plus anciens arbres exploités de façon assez périodique depuis la fin du XIXe.

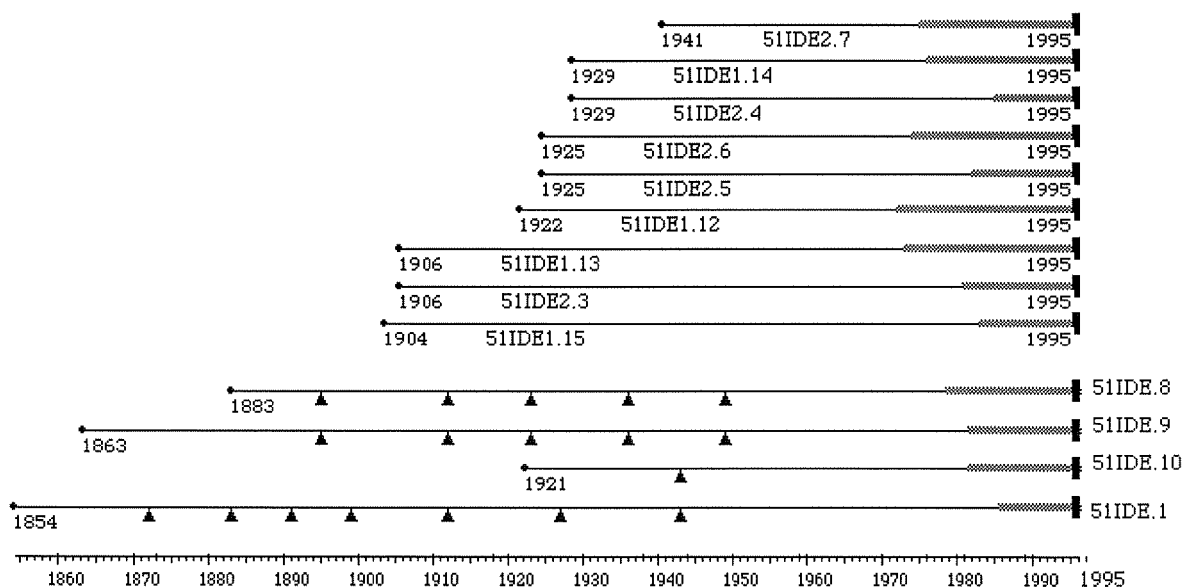


Figure 166 : bloc diagramme des arbres échantillonnés à Ile d'Errand. Triangle : date d'émondage

Les arbres échantillonnés sur les deux placettes de Camer sont plus directement accessibles, bordant des prairies et un chemin. Les arbres âgés sont régulièrement émondés depuis la fin du XIXe siècle (fig. 167). La haie est enrichie de quelques individus plus jeunes qui sont également exploités dès leur 25 à 30e année. Les dates de prélèvement sont décalées selon les arbres pour obtenir une rotation de durée plus courte. L'échantillon représente donc une exploitation plus structurée que pour le peuplement d'Errand. Toutefois, après 1961, d'une part, seul l'arbre CAM2.3 est taillé, alors que plusieurs individus auraient pu l'être vers 1970 et depuis ; et d'autre part, la haie est enrichie en jeunes arbres. L'émondage, sans être nettement abandonné comme à Errand, devient moins régulier et la haie se ferme.

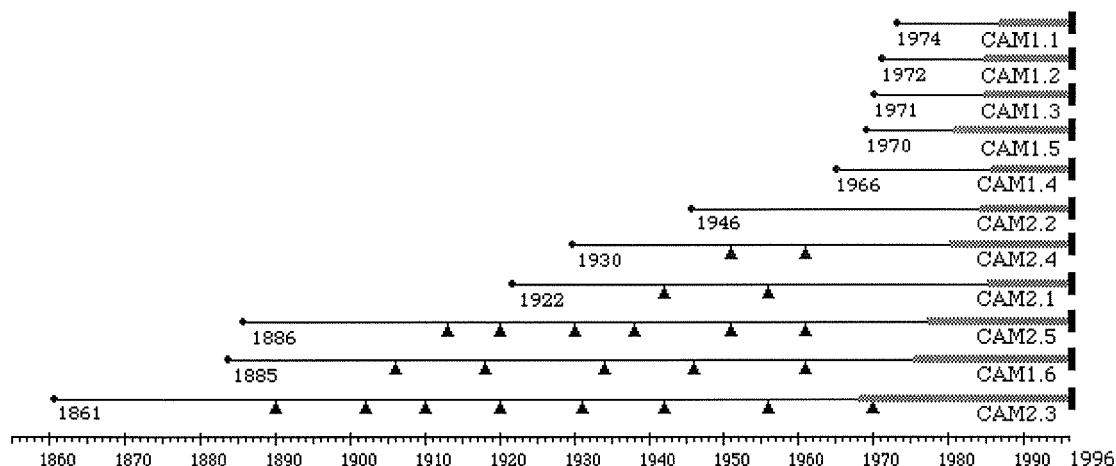


Figure 167 : bloc diagramme des arbres échantillonnés à Camer. Triangle : date d'émondage

La densification des peuplements peut être observée dans les largeurs de cernes consécutives aux dernières coupes. En effet, la largeur est, en moyenne, en augmentation pendant 20 ans à la suite du dernier stress puis elle stagne et diminue faiblement (fig. 168). Dans cette seconde période, les premiers effets de la compétition se font probablement sentir. Les cernes utilisés pour le graphe ont été élaborés à des âges différents mais une part de ce ralentissement peut probablement être aussi attribué à la sénescence des arbres.

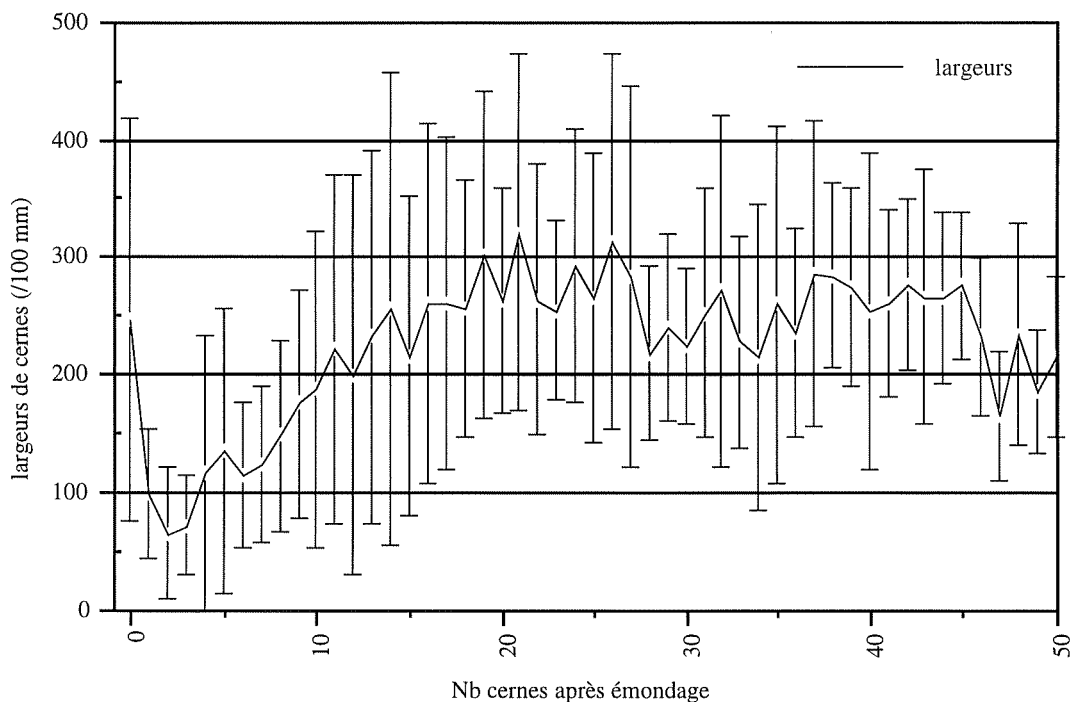


Figure 168 : largeurs brutes moyennes des cernes consécutifs du dernier émondage réalisé sur les arbres d'Île d'Errand et Camer. Barre : écart-type

### 3 Interdatation après troncation

A	CAM1	CAM2	51IDE1	51IDE2	VES1	VES2	VES3	CHAD1	CHAD2	CHAS1	CHAS2	GAV
CAM1		0,00	0,31	1,61	1,83	1,69	1,81	-0,28	2,34	0,53	<b>4,12</b>	1,07
CAM2	6		1,65	0,26	2,66	2,36	1,81	2,14	2,03	1,75	<b>3,09</b>	1,25
51IDE1	6	4		2,61	<b>3,44</b>	0,91	1,48	1,98	<b>3,59</b>	0,53	2,40	<b>3,81</b>
51IDE2	3	6	1		2,75	0,91	1,48	2,26	2,03	1,34	2,40	1,34
VES1	6	1	1	1		2,99	1,81	1,98	2,34	0,80	2,40	1,07
VES2	4	1	6	6	1		1,81	0,71	0,78	0,13	0,34	0,67
VES3	6	4	3	3	4	3		1,48	2,47	1,48	0,69	1,03
CHAD1	6	4	1	1	3	6	2		1,72	2,26	0,34	1,31
CHAD2	2	4	1	1	3	6	1	3		1,72	2,40	2,92
CHAS1	6	6	6	6	6	6	6	1	3		1,72	2,22
CHAS2	1	1	2	1	1	6	6	6	1	3		0,90
GAV	6	6	1	6	6	6	6	5	1	2	6	

B	CAM1	CAM2	51IDE1	51IDE2	VES1	VES2	VES3	CHAD1	CHAD2	CHAS1	CHAS2	GAV
CAM1		110	111	111	76	59	37	50	41	56	34	105
CAM2	50		133	133	75	58	37	49	41	55	34	126
51IDE1	53	57		132	76	59	37	50	41	56	34	134
51IDE2	57	52	61		76	59	37	50	41	56	34	125
VES1	60	65	69	65		59	37	50	41	56	34	71
VES2	61	65	55	55	69		37	49	41	55	34	55
VES3	64	64	62	62	64	64		37	37	34	34	34
CHAD1	48	65	64	66	64	55	62		41	50	34	47
CHAD2	68	65	78	65	68	56	70	63		41	34	41
CHAS1	53	61	53	58	55	50	62	66	63		34	52
CHAS2	85	76	70	70	70	52	55	52	70	64		34
GAV	55	55	66	56	56	54	58	59	73	65	58	

C	CAM1	CAM2	51IDE1	51IDE2	VES1	VES2	VES3	CHAD1	CHAD2	CHAS1	CHAS2	GAV
CAM1		-1,31	0,28	0,25	0,88	1,27	0,44	-1,20	-0,15	-1,49	1,23	-0,65
CAM2	6		-0,89	0,62	2,57	2,84	2,57	3,33	1,97	2,19	3,01	2,35
51IDE1	6	6		1,84	<b>3,49</b>	<b>3,39</b>	1,57	0,36	2,14	1,26	2,21	<b>3,76</b>
51IDE2	6	6	6		2,41	1,81	2,00	1,38	<b>4,43</b>	1,25	1,51	0,11
VES1	6	4	1	3		<b>6,43</b>	2,35	1,33	2,57	2,96	1,72	1,86
VES2	6	1	1	3	1		0,70	0,91	1,44	0,76	0,50	<b>3,56</b>
VES3	6	1	3	1	1	5		1,59	<b>5,35</b>	2,46	3,36	2,56
CHAD1	6	1	6	5	5	6	3		2,83	2,16	1,29	1,47
CHAD2	6	2	1	1	1	6	1	1		2,68	1,98	3,23
CHAS1	6	3	6	4	3	6	4	3	2		<b>4,28</b>	1,18
CHAS2	4	1	1	3	4	6	2	2	3	1		3,24
GAV	6	2	1	6	3	1	1	2	1	4	1	

Tableau 59 : interdatation des chronologies stationnelles en utilisant l'intégralité des chronologies. A : coefficient W (valeurs brutes) et rang de la proposition. B : chevauchement entre les séries en années et pourcentage de coïncidence (Gleichläufigkeit). C : valeur t de Student (indices Except) et rang de la proposition. Gras : coefficients significatifs au seuil 1%. Encadrés : stations comportant des arbres émondés.

Les chronologies moyennes de chaque station sont interdatées les unes par rapport aux autres. Les résultats obtenus avec la totalité des largeurs brutes utilisées dans un test de Eckstein sont particulièrement faibles pour les séries comportant des arbres émondés (tab. 59A). 5 coefficients significatifs au seuil de 1% sont observés entre des séquences non affectées par l'émondage. Le coefficient de la position relative des deux séries correspondant à la date d'échantillonnage est 19 fois, pour 66 paires, le plus élevé de la liste de tous les chevauchements possibles. Le synchronisme le plus élevé ne correspond donc pas, en moyenne, à la date attendue, ceci particulièrement pour les séries comportant des arbres émondés. Le synchronisme entre les séries exprimé par le coefficient de Eckstein est très faible pour plusieurs raisons. Le pourcentage de coïncidence des écarts entre deux cernes consécutifs (Gleichläufigkeit) est effectivement proche de 50, voire inférieur, pour les stations comportant des arbres émondés, comme CAM1-2 (tab. 59B). Toutefois, le coefficient est également faible pour des séries dont la coïncidence est assez éloignée de 50, par exemple

70% entre VES3 et CHAD2, mais qui comportent très peu de cernes, dans le même exemple 37 (tab. 59B). Dans ces conditions, le synchronisme entre les chronologies des stations de la Brière et la chronologie issue de la forêt de Gâvre est également très faible.

Lorsque l'interdatation est réalisée après standardisation des chronologies, en indice Except, et en utilisant le coefficient de corrélation, les résultats positifs sont plus nombreux. 8 coefficients sont significatifs au seuil de 1‰, et 21 sont les plus élevés de la liste de propositions (tab. 59C). L'augmentation est plus sensible pour les stations et les séquences non affectées par l'émondage. CAM1, ne comportant qu'un arbre émondé mais qui influence nettement la chronologie stationnelle, voit même ses résultats se dégrader. Le synchronisme avec la série de la forêt de Gâvre est nettement amélioré, toujours pour les stations sans émondage. La standardisation permet donc de dégager une plus grande part de signal régional, commun aux stations.

A	CAM1	CAM2	51IDE1	51IDE2	VES1	VES2	VES3	CHAD1	CHAD2	CHAS1	CHAS2	GAV
CAM1		<b>3,28</b>	2,92	2,92	2,92	1,09	2,55	1,46	<b>3,28</b>	1,46	<b>4,01</b>	2,50
CAM2	1		2,47	1,81	<b>4,11</b>	2,14	1,81	<b>3,12</b>	2,80	2,47	2,06	<b>4,12</b>
51IDE1	1	1		<b>4,05</b>	<b>3,58</b>	0,91	1,48	1,98	<b>3,59</b>	0,53	2,40	<b>3,49</b>
51IDE2	1	3	1		<b>3,21</b>	0,91	1,48	1,98	2,03	1,07	2,40	1,53
VES1	1	1	1	1		<b>2,99</b>	1,81	1,98	2,34	0,80	2,40	1,07
VES2	6	1	6	6	1		<b>1,81</b>	0,71	0,78	0,13	0,34	0,67
VES3	1	2	3	4	4	3		<b>1,48</b>	2,47	1,48	0,69	1,03
CHAD1	2	1	1	2	3	6	2		<b>1,72</b>	2,26	0,34	1,31
CHAD2	1	1	1	1	3	6	1	3		<b>1,72</b>	2,40	2,92
CHAS1	6	2	6	6	6	6	6	1	3		<b>1,72</b>	2,22
CHAS2	1	1	2	1	1	6	6	6	1	3		0,90
GAV	1	1	1	6	6	6	6	5	1	2	6	

B	CAM1	CAM2	51IDE1	51IDE2	VES1	VES2	VES3	CHAD1	CHAD2	CHAS1	CHAS2	GAV
CAM1		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
CAM2	80		37	37	37	37	37	37	37	37	34	37
51IDE1	76	70		88	75	59	37	50	41	56	34	84
51IDE2	76	64	71		76	59	37	50	41	56	34	84
VES1	76	83	70	68		59	37	50	41	56	34	71
VES2	60	67	55	55	69		37	49	41	55	34	55
VES3	73	64	62	62	64	64		37	37	37	34	34
CHAD1	63	75	64	64	64	55	62		41	50	34	47
CHAD2	80	72	78	65	68	56	70	63		41	34	41
CHAS1	63	70	53	57	55	50	62	66	63		34	52
CHAS2	86	67	70	70	70	52	55	52	70	64		34
GAV	74	85	69	58	56	54	58	59	73	65	58	

C	CAM1	CAM2	51IDE1	51IDE2	VES1	VES2	VES3	CHAD1	CHAD2	CHAS1	CHAS2	GAV
CAM1		<b>3,69</b>	1,97	2,12	3,03	0,69	2,80	2,62	<b>4,31</b>	1,34	2,05	<b>3,78</b>
CAM2	1		1,76	1,60	2,84	2,19	2,94	<b>4,47</b>	2,89	3,29	2,72	<b>4,29</b>
51IDE1	1	1		<b>5,81</b>	3,05	<b>3,55</b>	1,59	-0,04	2,15	0,99	2,23	<b>3,61</b>
51IDE2	2	2	1		2,76	1,91	2,03	1,98	<b>4,51</b>	0,25	1,53	3,29
VES1	1	3	1	2		<b>6,43</b>	2,35	1,33	2,57	2,96	1,72	1,86
VES2	6	2	1	3	1		0,70	0,91	1,44	0,76	0,50	<b>3,56</b>
VES3	1	1	3	1	1	5		1,59	<b>5,35</b>	2,46	3,36	2,56
CHAD1	1	1	6	2	5	6	3		<b>2,83</b>	2,16	1,29	1,47
CHAD2	1	1	1	1	1	6	1	1		<b>2,68</b>	1,98	3,23
CHAS1	5	1	6	4	3	6	4	3	2		<b>4,28</b>	1,18
CHAS2	2	1	1	3	4	6	2	2	3	1		3,24
GAV	1	1	1	1	3	1	1	2	1	4	1	

Tableau 60 : interdatation des chronologies stationnelles après troncature des séquences émondées. A : coefficient W (valeurs brutes) et rang de la proposition. B : chevauchement entre les séries en années et pourcentage de coïncidence (Gleichläufigkeit). C : valeur t de Student (indices Except) et rang de la proposition. Gras : coefficients significatifs au seuil 1%.

Par contre, même si les séries individuelles sont correctement positionnées les unes par rapport aux autres, ici grâce au comptage des cernes, une chronologie moyenne influencée par les arbres émondés ne comporte pas de signal commun avec celles des autres stations. Les résultats après standardisation sont même inférieurs. Ils montrent que les écarts à un modèle, représentant la tendance de l'émondage, ne sont pas représentatifs de l'action de facteurs environnementaux. Les séries actuelles ne comportant pas d'information commune au groupe d'arbres analysés, il est très peu probable de parvenir à dater des séries historiques d'arbres émondés.

Les procédures sont répétées après élimination des séquences affectées par l'émondage. Dans ce cas, le nombre de cernes disponibles pour chaque station limite la synchronisation (tab. 60B). Il reste supérieur à 30, mais est le plus souvent inférieur à 50. La qualité du synchronisme entre les chronologies augmente nettement pour les stations CAM1-2 malgré une perte sévère en nombre de cernes. 12 coefficients *W* sont significatifs au seuil de 1‰ et 29 d'entre eux sont les premiers de la liste de propositions (tab. 60A). Toutefois, les coefficients *W* restent en moyenne peu élevés (2,04) car même si le coefficient de coïncidence atteint en moyenne 66%, la sécurité qui est associée à cette valeur est faible, environ 2%, en fonction du nombre de cernes. 66% apparaît comme une valeur assez forte, par rapport aux observations classiques, mais qui aurait dû être définie pour un nombre de cernes supérieur à 93 pour correspondre à un risque d'erreur de 1‰.

La standardisation des séries en indices Except permet d'obtenir un synchronisme de meilleure qualité : 13 coefficients sont significatifs au seuil de 1‰ et 33 sont les plus élevés de la liste (tab. 60 C). Toutefois de la même façon, le calcul de la valeur *t* de Student attribue une sécurité faible à une corrélation calculée avec peu de cernes. En moyenne, elle s'élève à 0,38, le risque associé pour 44 cernes est de 8 ‰. Le calcul aurait dû être réalisé avec 20 cernes de plus pour que le risque correspondant soit inférieur à 1‰.

Le synchronisme entre les séries stationnelles apparaît en fait assez variable. La valeur de l'écart-type des coefficients de corrélation entre toutes les stations est de 0,16 soit près de la moitié de la valeur moyenne. Des groupes peuvent être dégagés. Ils sont en partie liés à la situation des placettes (tab. 60). En plus de la jeunesse des individus, on peut attribuer cette variance au fait que les stations sont peu nombreuses et situées dans un transect de milieux assez diversifiés.

Les coefficients entre la série de la forêt de Gâvre et celles des stations briéronnes sont nettement augmentés par l'élimination des séquences émondées et par la standardisation.

	51IDE1	CAM2	VES1	VES2	CAM1	51IDE2	CHAD1	CHAD2	VES3	CHAS1	CHAS2	GAV
51IDE1		0,31	0,34	0,44	0,38	0,54	-0,01	0,35	0,28	0,14	0,40	0,37
CAM2	0,31		0,46	0,37	0,62	0,28	0,63	0,47	0,47	0,53	0,46	0,62
VES1	0,34	0,46		0,66	0,53	0,32	0,20	0,40	0,39	0,39	0,31	0,22
VES2	0,44	0,37	0,66		0,14	0,25	0,14	0,24	0,13	0,11	0,10	0,44
CAM1	0,38	0,62	0,53	0,14		0,40	0,48	0,67	0,51	0,28	0,39	0,62
51IDE2	0,54	0,28	0,32	0,25	0,40		0,29	0,61	0,35	0,04	0,28	0,34
CHAD1	-0,01	0,63	0,20	0,14	0,48	0,29		0,44	0,28	0,32	0,24	0,22
CHAD2	0,35	0,47	0,40	0,24	0,67	0,61	0,44		0,70	0,43	0,36	0,48
VES3	0,28	0,47	0,39	0,13	0,51	0,35	0,28	0,70		0,42	0,55	0,42
CHAS1	0,14	0,53	0,39	0,11	0,28	0,04	0,32	0,43	0,42		0,65	0,17
CHAS2	0,40	0,46	0,31	0,10	0,39	0,28	0,24	0,36	0,55	0,65		0,53
GAV	0,37	0,62	0,22	0,44	0,62	0,34	0,22	0,48	0,42	0,17	0,53	

Tableau 61 : coefficients de corrélation entre les séries stationnelles. Encadré : groupes de corrélation

Il est donc indispensable de purger les séries de l'influence des émondages pour analyser la relation entre les largeurs de cernes et les facteurs environnementaux. Il est préférable de maîtriser au mieux, par la standardisation, les différences de niveaux de croissance entre les arbres. Leur âge très faible, l'ouverture importante des peuplements, la dynamique de ces peuplements ainsi que la diversité des milieux prospectés créent des tendances qui masquent le signal commun et régional.

## II Homogénéisation des moyennes stationnelles

### 1 Synchronisme entre les séries individuelles

Les 62 individus provenant des stations briéronnes, deux à deux, permettent de calculer 1891 coefficients caractéristiques du synchronisme. Les distributions de ces coefficients, obtenus d'une part avec la procédure du test de Eckstein et d'autre part avec celle du test de Student (cf. partie 2), peuvent être comparées. Leur forme indique la qualité globale du synchronisme et les effets de la standardisation. Les coefficients sont obtenus dans les positions relatives correspondantes aux dates d'échantillonnage. Les distributions permettent donc de décrire le type de lien entre les croissances indépendamment d'une recherche par glissement comme dans le cas d'une datation de matériel ancien.

	W	t		W	t
moyenne :	1,18	1,35	écart-type :	1,07	1,35
mode :	1,12-1,63	0,6-1,12	aplatissement :	-1,61	2,67
médiane :	1,21	1,24	asymétrie :	-0,017	0,76

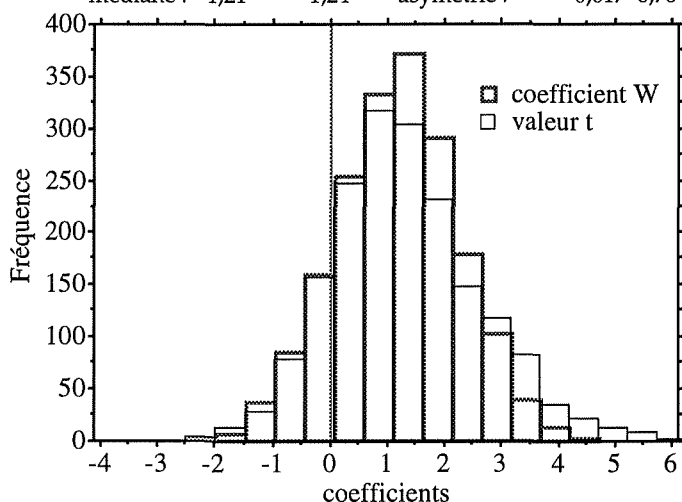


Figure 169 : distributions des coefficients W et des valeurs de Student calculés entre les individus.

Les limites de classes de fréquence (environ de 0,5 en 0,5) sont définies par la même procédure pour les coefficients W et les valeurs t. Les distributions peuvent donc être superposées. Toutefois, deux valeurs t extrêmes s'élevant à 7,2 et 12,1, ont été exclues des figures mais pas du calcul des paramètres.

Dans les deux cas, un seul mode est observé (fig. 169). La classe correspondante est supérieure pour la distribution de W : 1,12-1,63. Celle-ci se dégage d'avantage des autres que le

mode de la valeur t. Le coefficient d'aplatissement pour W est négatif (Kurtosis = -1,61) en correspondance avec le mode nettement supérieur en fréquence aux autres classes. Les valeurs moyenne et médiane de ce coefficient sont très proches, l'écart n'est que de 0,03, de plus elles sont incluses dans la classe la plus fréquente. En conséquence, l'asymétrie est proche de 0. Les caractéristiques de la distribution de W sont donc proches de celle d'une distribution normale. Elle est toutefois légèrement plus centrée.

A l'inverse, la distribution des valeurs t montre plus de diversité. L'écart-type est plus élevé. La médiane et la moyenne, dont la différence s'élève à 0,11, ne sont pas incluses dans le mode. Les paramètres qui l'éloignent le plus d'une distribution normale sont l'aplatissement et l'asymétrie (fig. 169). Les valeurs supérieures à la moyenne sont plus nombreuses que dans le cas d'une distribution normale.

La comparaison des deux graphiques permet de remarquer que les classes les plus basses, environ de -2,5 à 0,5, ont des fréquences très proches pour les deux estimateurs du synchronisme (fig. 169). Pour les classes voisines des modes, environ entre 0,5 et 2,5, les coefficients W sont plus abondants. Par contre, pour les classes les plus élevées, à partir de 2,5, la fréquence des valeurs t est toujours nettement supérieure à celle des W. Les paramètres des distributions traduisent bien ces observations. Il y a un lien entre W et la valeur t. Pour le corpus, le coefficient de corrélation entre les 1861 valeurs est de 0,5. Le synchronisme entre les individus, obtenu après standardisation, apparaît donc plus élevé pour des paires dont le coefficient W est moyen. Par contre, la standardisation ne permet pas, dans la majorité des cas, d'améliorer le synchronisme entre des séries dont la coïncidence des pentes est nettement inférieure au mode.

La standardisation apporte bien un gain en nombre de paires pour lesquelles la décision que deux individus sont contemporains peut être prise. Cette propriété est exploitée en datation. Cependant, pour ce corpus, les facteurs locaux et l'âge des arbres influencent fortement les relations et on peut penser qu'une grande part des séries n'aurait pas été incluse dans une chronologie de site.

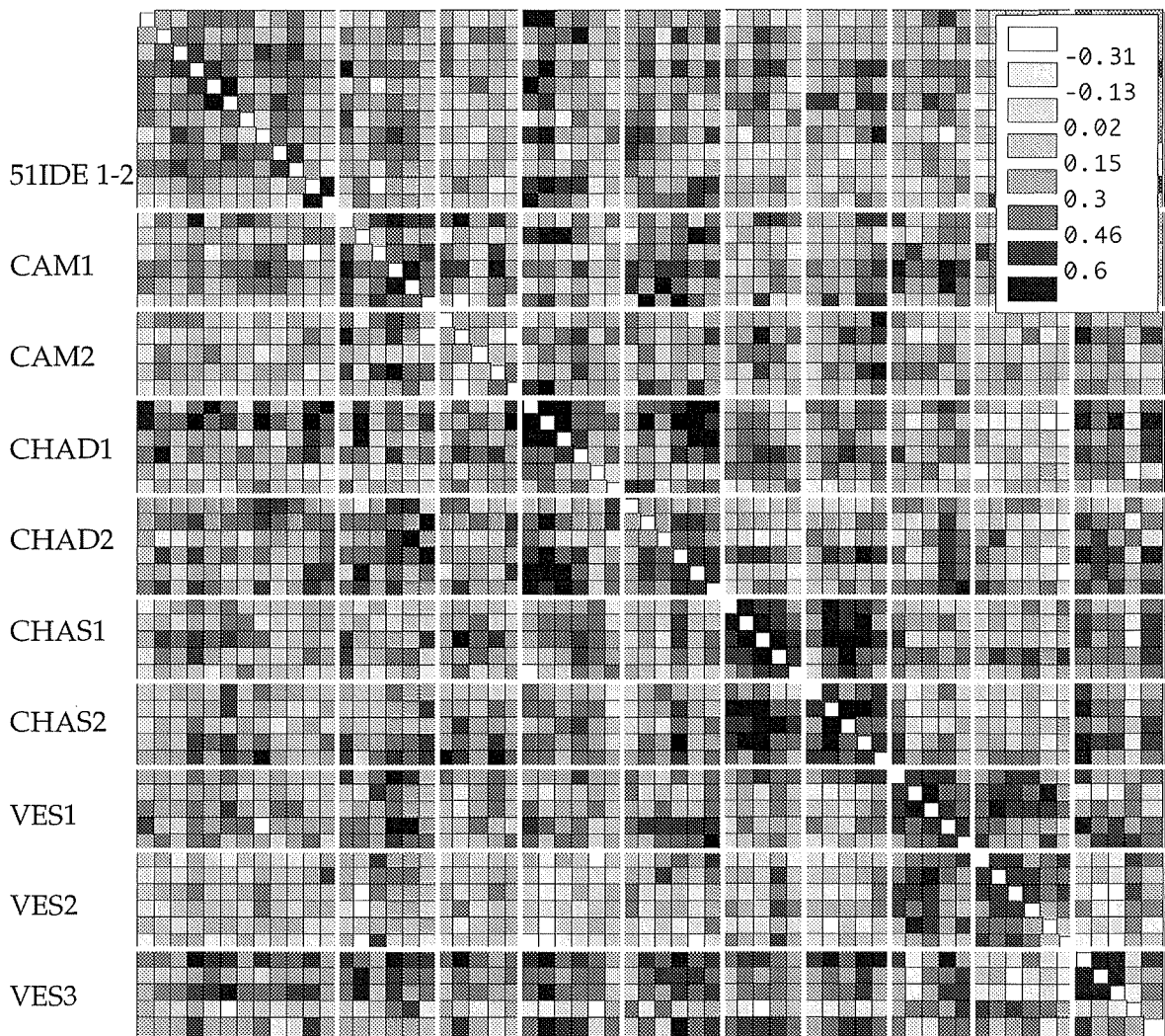


Figure 170 : matrice de corrélation entre les individus des stations briéronnes. Coefficient de corrélation, indice Except

En effet, les deux distributions indiquent un grand nombre de valeurs faibles, qui correspondent à une absence de synchronisme voire à des relations inverses. La matrice de corrélation entre les individus (fig. 170) montre qu'une part de cette diversité des croissances est liée à l'échantillonnage des arbres dans des conditions de milieu variées. Ainsi, pour



chaque station, des "amas" sombres, correspondant à des coefficients élevés, montrent que la corrélation est, en moyenne, plus forte dans une station. Ces amas sont aussi observables dans les relations entre les stations, ce qui préfigure une hiérarchisation de celles-ci. Cependant, la variabilité est également très élevée dans ces groupes, ce qui indique que les facteurs individuels ont un rôle très important dans la qualité du synchronisme. On peut supposer que c'est particulièrement le cas pour de jeunes populations.

## 2 Datation sur des références locales

La diversité des relations entre les séries individuelles étant très importante, on peut se demander, comme dans le cas de séries anciennes, si la chronologie moyenne incluant tous les individus est celle qui représente le mieux l'information régionale utilisée dans la confrontation avec les références.

Comme il a été réalisé lors de la datation de la chronologie des arbres de l'Age du Bronze, la matrice des corrélations entre les individus est ordonnée en fonction de la qualité du synchronisme d'un individu par rapport à tous les autres (cf. partie 2). La valeur  $t$  de Student médiane de chaque ligne et colonne est utilisée. La valeur  $t$  est alors globalement dégressive le long de la diagonale de la matrice (fig. 171).

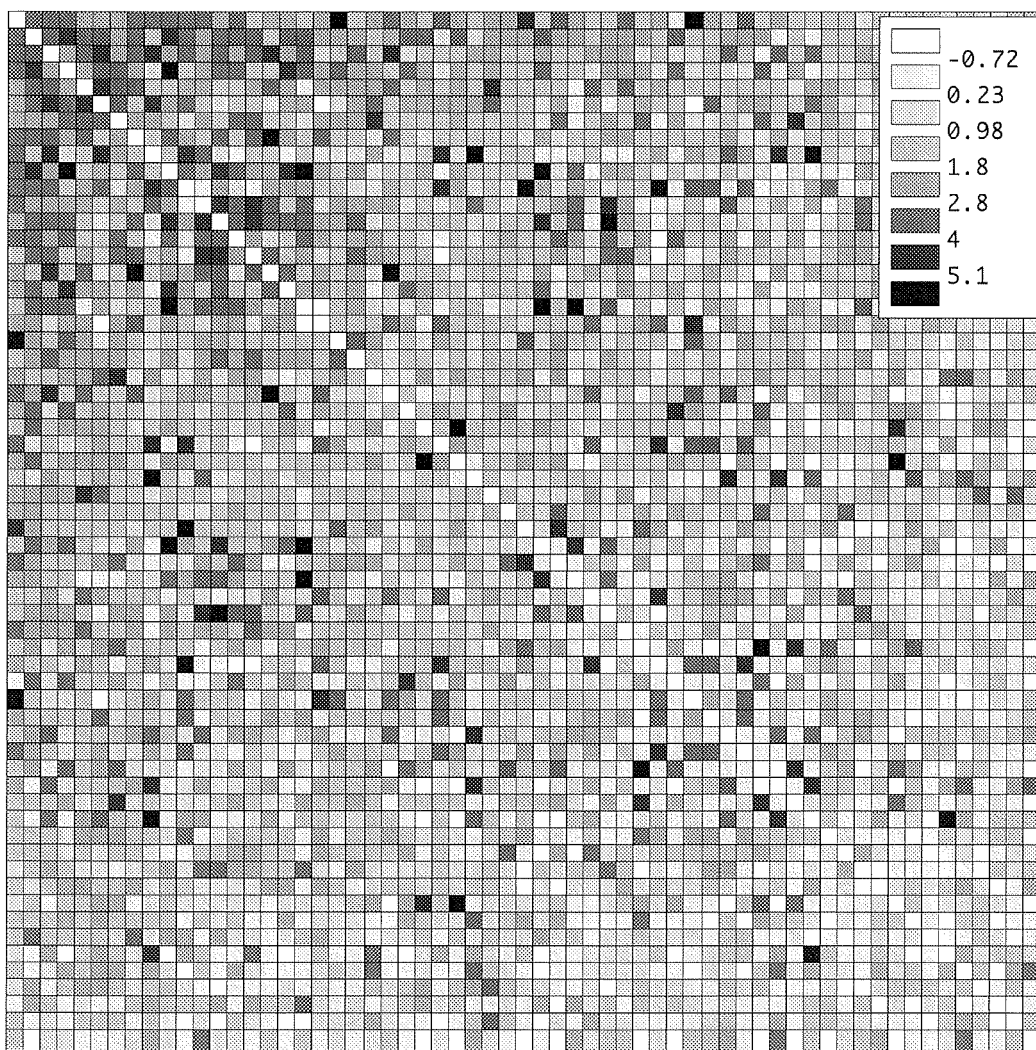


Figure 171 : matrice de corrélation entre les individus des stations briéronnes ordonnée par la médiane de la valeur  $t$  des lignes et colonnes. Coefficient de corrélation, indice Except

En suivant l'ordre défini, il est possible de constituer des chronologies moyennes comportant progressivement de plus en plus d'individus. La corrélation entre les séries intégrées à ces moyennes va en décroissant en fonction du nombre, l'EPS, dans le même sens, est croissante (fig. 172). Chaque individu apporte une contribution à la représentativité de la moyenne mais également participe à sa dispersion. Aucun d'entre eux n'induit de baisse de l'EPS. Dans ce cas, la perte du niveau de corrélation moyenne ne serait pas compensée par l'augmentation du nombre. Toutefois, on remarque qu'environ dès l'intégration de la 25e série l'EPS progresse très lentement. L'apport des bois supplémentaires augmente légèrement la représentation et induit une dispersion assez forte. L'EPS est supérieure à 0,85 à partir du 5e individu et supérieure à 0,90 au 10e alors que 20 individus sont nécessaires pour passer de 0,95 à 0,96. La corrélation moyenne est inférieure à 0,4 à la 26e série et à 0,3, que l'on peut considérer comme un seuil critique, après la 48e.

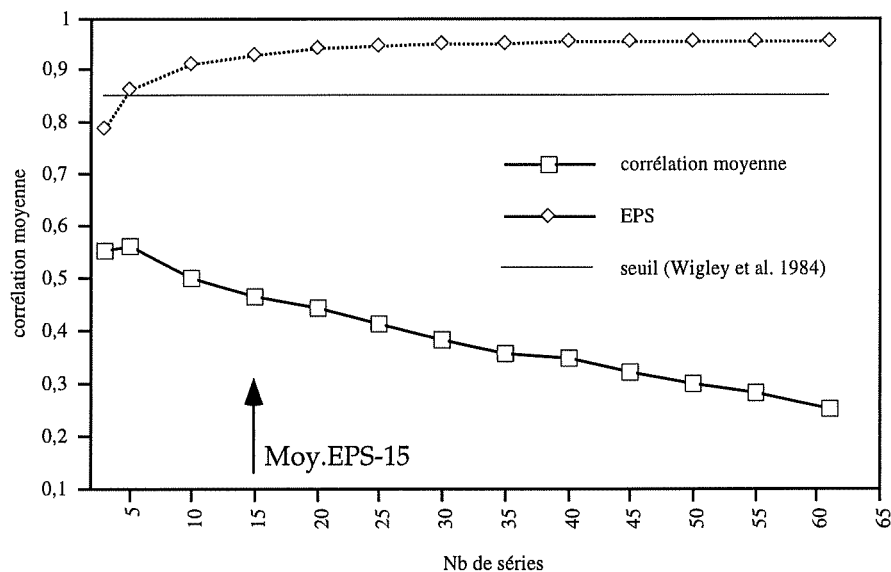


Figure 172 : évolution de la corrélation moyenne et de l'EPS en fonction du nombre de séries individuelles intégrées à la chronologie moyenne

La quantité d'information régionale comprise dans les largeurs de cernes des chronologies progressivement enrichies en individus peut être estimée par leur valeur du coefficient de corrélation avec les références. Les résultats portent sur 66 cernes. En rapport avec ce nombre, la sécurité attribuée à la corrélation entre ces chronologies et les références disponibles dans l'ouest de la France reste faible. La valeur la plus élevée est observée avec la chronologie de la forêt de Gâvre. Cette forêt est la plus proche des marais de Brière dont les largeurs de cernes sont disponibles. Les valeurs  $t$  entre la série de cette forêt et les références de l'ouest de la France sont comprises entre 5,10, avec une série de la forêt de Fontevraud, et 3,58, avec celle de la forêt du Perche (cf. partie 1 chap. 1). On peut donc penser qu'elle comporte une information régionale.

La valeur  $t$  de Student entre les séries en indices Except est la plus élevée pour la moyenne briéronne comportant 15 individus (fig. 173). Cette moyenne est celle qui présente le plus de points communs avec la référence d'un autre massif soumis à des conditions climatiques proches. On peut considérer que les arbres qui la compose représentent, au mieux, les influences régionales. La représentativité régionale de la chronologie briéronne est donc moins élevée d'une part lorsque le nombre d'arbres considérés est plus faible et d'autre part lorsque des individus qui dispersent trop la moyenne sont intégrés. La variation de la valeur  $t$  en fonction du nombre de composantes n'est cependant pas régulière (fig. 173).

La valeur maximum atteint 3,8, ce qui reste peu significatif (1,6%). Les jeunes arbres des peuplements dynamiques ne sont pas très représentatifs des influences régionales. Ils

auraient été délicats à dater également pour cette raison. Cette expérience montre également, dans une situation qui ne dépend pas de la recherche par synchronisme des cernes contemporains, que l'intégration de la totalité des séries individuelles dans une chronologie moyenne n'aboutit pas nécessairement à la série la plus représentative de l'information régionale. La constitution de chronologies moyennes intégrant progressivement les séries individuelles, en suivant l'évolution des paramètres corrélation moyenne et EPS, peut permettre de sélectionner des arbres plus représentatifs de l'influence régionale et ainsi d'améliorer la sécurité des datations.

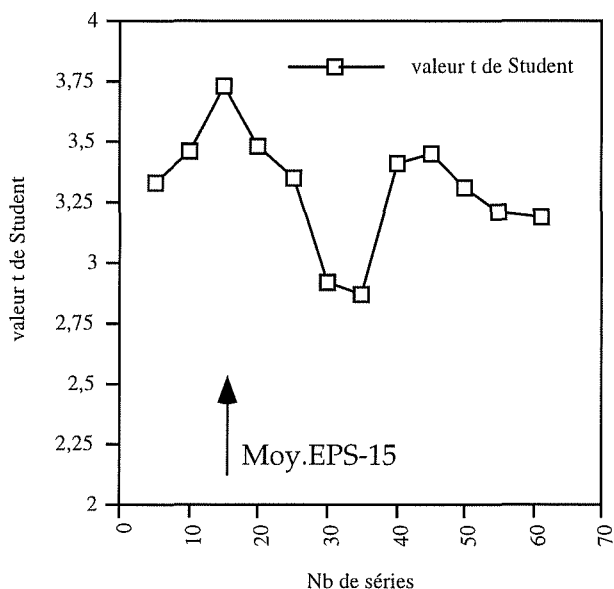


Figure 173 : valeur t entre la chronologie de la Forêt de Gâvre (indice Except) et celles de Brière en fonction du nombre de séries intégrées (Moy.EPS-15 comporte 15 séries individuelles)

### 3 Homogénéisation par station

Le synchronisme entre les séries est de qualité variable essentiellement car les arbres sont jeunes et proviennent de milieux assez différents. Pour montrer l'influence du fonctionnement hydrique du sol sur la croissance, les stations sont échantillonnées le long d'un transect. On cherche auparavant à vérifier que des facteurs individuels ne perturbent pas trop certaines séries à l'intérieur des stations.

Une analyse en composante principale (ACP) des séries individuelles peut être utilisée pour vérifier l'homogénéité des croissances station par station (GADBIN-HENRY 1994). Le tableau est constitué des arbres en colonnes et en ligne des années. Celui-ci ne peut pas comporter de valeurs absentes. Les analyses sont donc réalisées sur la période commune à la totalité des séries ce qui constitue une limite importante dans les conditions de la dendrochronologie. Lorsque les croissances corrélent, les séries contribuent toutes fortement à la première composante principale qui représente un fort pourcentage de l'inertie totale du nuage multidimensionnel. Pour des populations de Pin pignon, soumises à un climat méditerranéen, plus contraignant que celui de l'ouest de la France, GADBIN-HENRY (1994) observe que les stations peuvent être jugées homogènes alors que la première composante représente entre 39 et 76% de l'inertie totale. Inversement, la deuxième composante principale porte une inertie nettement plus faible. Dans les mêmes conditions que précédemment, GADBIN-HENRY (1994) indique que celle-ci représente entre 8 et 18% d'inertie. Les individus qui présentent des croissances particulières pour la station sont rejetés sur cet axe. La première composante représente la partie du signal commune aux arbres et la seconde la dispersion. Une homogénéisation peut être obtenue en supprimant les arbres contribuant le plus à la seconde composante.

L'ACP repose sur la matrice des coefficients de corrélation entre toutes les séries du tableau. De ce fait, celles-ci doivent vérifier au mieux les conditions d'utilisation du coefficient de corrélation. Notamment, elles doivent être stationnaires. Les largeurs de cernes sont donc standardisées avant l'analyse. L'analyse factorielle des correspondances (AFC) ne nécessite pas les mêmes exigences mais nous avons pu montrer que l'utilisation des largeurs brutes est très dépendante de la tendance d'âge et que la standardisation est indispensable pour que les relations avec les facteurs environnementaux soient analysées (GIRARDCLOS 1992). Les deux méthodes aboutissent à des classifications des arbres similaires.

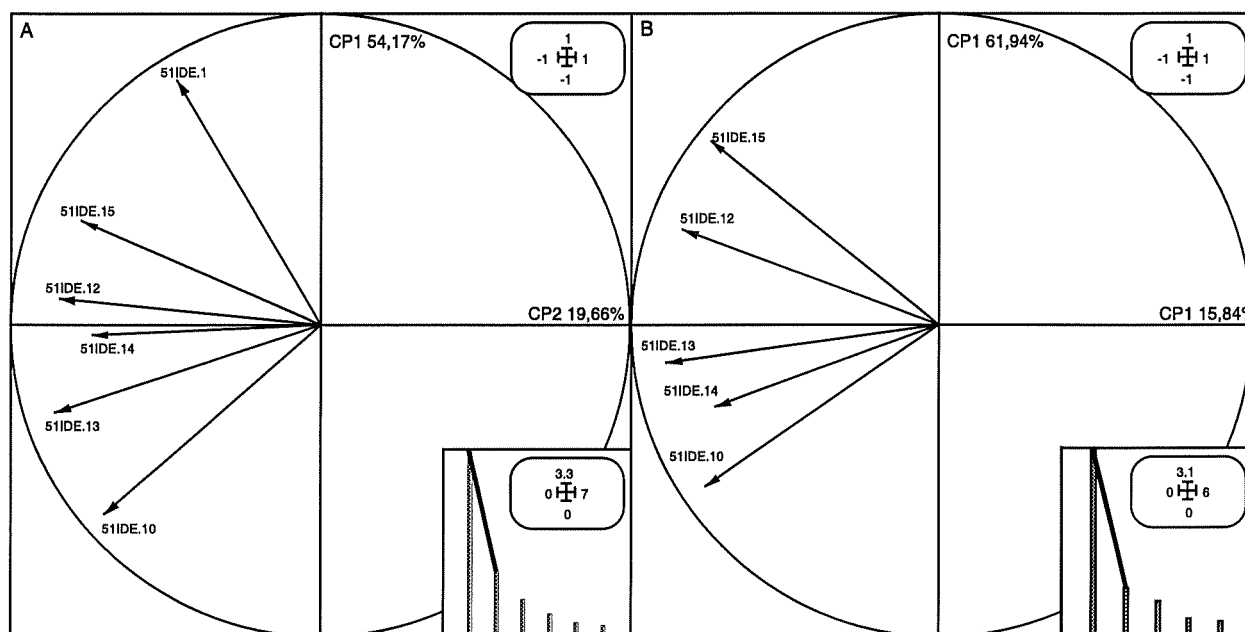


Figure 174 : cartes factorielles (1-2), point arbres. A : ACP des 6 individus de la station 51IDE.1. B : ACP après suppression de l'individu 51IDE.1.1

La station 51IDE.1 comporte 6 individus. Les indices Except sont communs aux 6 arbres pour la courte période comprise entre 1953 et 1992. La première composante principale représente 54,17% de l'inertie totale du nuage et la seconde 19,66%. Par rapport au corpus, la deuxième valeur propre est assez élevée (tab. 62). Les points arbres sur la carte factorielle des deux premières composantes montrent que l'individu 51IDE.1.1 contribue fortement à la formation de cette deuxième composante (fig. 174A). L'arbre se singularise des autres, il ne représente qu'imparfaitement les caractéristiques communes de la station. L'analyse est répétée après suppression de la série concernée. La première valeur propre représente alors 61,94% de l'inertie totale et la seconde plus que 15,84%. La carte factorielle ne montre plus d'individu singulier (fig. 174B). Les 5 séries restantes ont donc un signal en commun élevé. La corrélation moyenne, calculée à partir de la matrice de corrélation de l'ACP, permet d'estimer cette homogénéité. Elle s'élève à 0,52 et la suppression de l'individu 51IDE.1.1 induit une augmentation d'environ 0,1 (tab. 174). L'EPS est également augmentée. La chronologie moyenne est donc plus représentative des conditions stationnelles de croissance après élimination de cet individu. Des facteurs propres à celui-ci induisent en fait une forte augmentation de sa croissance à partir de 1960 (fig. 175) qui n'est pas complètement éliminée par la standardisation.

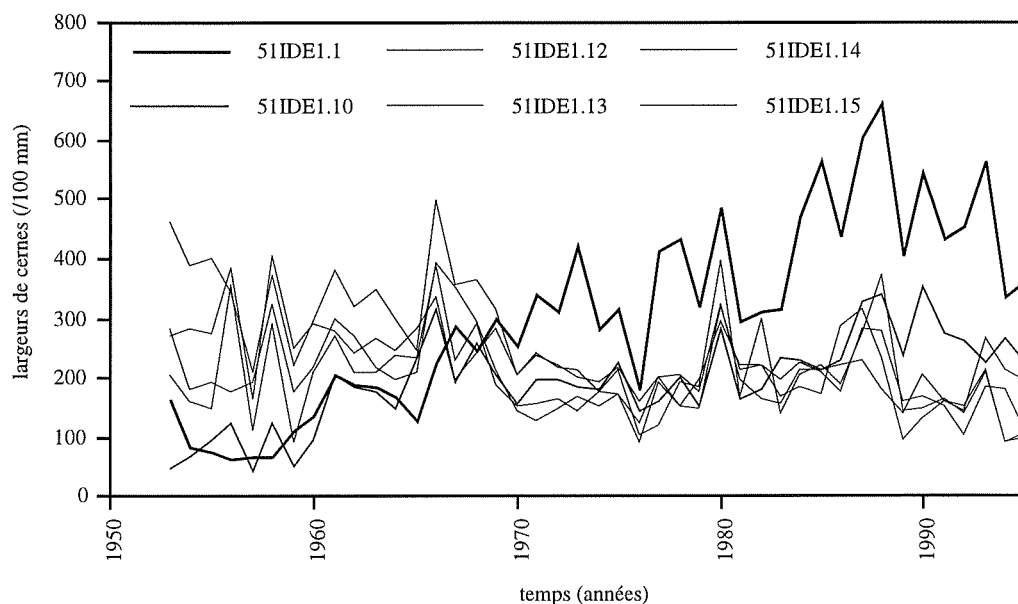


Figure 175 : Séries individuelles de la station 51IDE1 en largeurs brutes.

Les 11 stations du corpus sont homogénéisées en suivant cette procédure. Les arbres de la forêt de Gâvre sont également analysés de la même façon. Selon les stations, la première valeur propre représente entre 47,88% et 68,80% de l'inertie totale et la deuxième entre 24,53% et 8,43% (tab.62). Ces valeurs peuvent être jugées proche de celles observées par GADBINHENRY (1994) dans des conditions d'échantillonnage plus favorables. La suppression du corpus de 9 individus permet d'obtenir des chronologies stationnelles homogènes. La corrélation moyenne est alors comprise entre 0,38, à CAM2, et 0,61 à 51IDE2 et CHAS1. Toutefois, le nombre de séries étant faible, l'EPS bien que souvent proche de la valeur seuil, reste inférieure à 0,85. Les chronologies stationnelles reflètent donc imparfaitement les conditions de croissance du fait de ce petit nombre de bois. Les variations latérales très rapides des conditions de milieu et les peuplements nous ont contraints à réaliser des groupes aux dimensions minimales. Toutefois, une hiérarchisation basée sur des caractéristiques du milieu et les relevés de la végétation a montré que des ensembles de stations peuvent être constitués. La typologie des croissances permet également cette hiérarchisation et aboutira à la constitution de chronologies représentatives des conditions de développement des arbres.

	Nb. indiv.	Nb. c.	VP1 %	VP2 %	r moy	EPS	N° éliminés	VP1 %	VP2 %	r moy	EPS
51IDE1	6	46	54,17	19,66	0,43	0,82	1	61,94	15,84	0,52	0,84
51IDE2	7	40	50,59	20,24	0,29	0,74	8-9	69,19	11,25	0,61	0,89
CAM1	6	22	54,29	14,32	0,44	0,83	2	61,35	14,63	0,51	0,84
CAM2	5	24	51,89	24,53	0,38	0,76					
CHAD1	6	20	50,30	19,50	0,37	0,78	5-6	67,51	19,43	0,56	0,84
CHAD2	6	25	50,35	17,04	0,37	0,78	1	59,24	15,81	0,48	0,82
CHAS1	5	28	68,80	14,89	0,61	0,89					
CHAS2	5	29	66,34	16,78	0,57	0,87					
VES1	5	38	51,03	17,60	0,39	0,76					
VES2	6	38	47,88	18,41	0,35	0,76	5	55,55	17,65	0,44	0,80
VES3	5	21	55,46	22,07	0,31	0,69	5	68,90	21,38	0,57	0,84
FDG	9	137	64,05	8,43	0,59	0,93					

Tableau 62 : homogénéisation des chronologies stationnelles

## Chapitre 4

# RELATIONS ENTRE LA LARGEUR DE CERNE ET LES FACTEURS DU MILIEU

### I Tendance d'âge et effet de la compétition

#### 1 Estimation d'une loi de sénescence

L'âge de l'arbre au moment de l'élaboration d'un cerne explique une grande part de la largeur de celui-ci. De ce fait, pour comparer les largeurs de cernes d'une même date, il est indispensable de maîtriser cet effet, en standardisant la largeur. Dans le cadre des études de datations, deux procédures sont employées de façon classique. Soit, seule la pente entre deux cernes consécutifs est considérée (test de Eckstein), soit la tendance est estimée par un modèle puis retirée de la série par le rapport valeur observée / la valeur du modèle. Cette procédure, avec différents types de modélisation, est également utilisée pour la standardisation des séries dans les applications dendroclimatiques (COOK *et al.* 1990).

Le but principal de ces méthodes est de rendre le signal observé stationnaire (COOK *et al.* 1990). Toutes les sources de tendance possibles, telle l'action des facteurs biologiques dont l'âge, mais également les sources liées au peuplement, au site ou à l'individu, et surtout les effets des dérives à moyen et long terme de facteurs environnementaux, sont considérées

sans distinction comme du bruit. L'estimation d'une loi liant l'âge et la largeur de cerne devrait permettre de ne retirer des chronologies que l'effet de ce facteur. Le calcul de la largeur moyenne à un âge cambial donné permet cette estimation (FRITTS 1976).

Les séries sont alignées en fonction de l'âge de l'arbre au moment de la formation des cernes. L'estimation de cet âge, dit âge cambial, est donnée par la présence de la moelle. Toutefois, celle-ci n'est pas observable sur tous les échantillons. Il est donc indispensable d'évaluer le nombre de cernes non prélevés, à l'aide de la courbure des premières limites et des angles que forment les rayons. La largeur moyenne est ensuite calculée pour chaque âge cambial. L'évolution de cette moyenne montre principalement l'effet de ce facteur sur la croissance (fig. 178).

Toutefois, pour ne présenter aucun biais statistique, le calcul de la moyenne devrait prendre en compte un nombre constant de largeurs de cernes d'un âge cambial donné élaboré à toutes les dates considérées. Ceci n'est pas réalisable, car les cernes les plus récents d'un corpus ont toujours été formés, en moyenne, par des arbres plus âgés et inversement les cernes les plus anciens ont été élaborés par les arbres alors qu'ils étaient jeunes. C'est particulièrement le cas lorsque les échantillons proviennent d'individus d'âges similaires comme c'est le cas en dendrochronologie où les séries comportant moins de 50 cernes sont rarement datées.

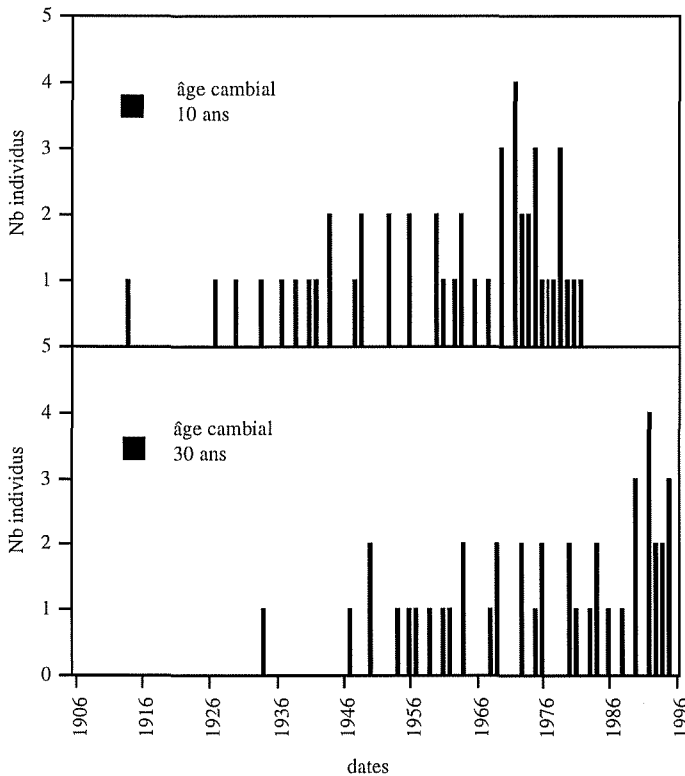


Figure 176 : effectif des cernes élaborés à un âge cambial de 10 et 30 ans en fonction de la date

Ainsi par exemple pour le corpus de la Brière, plus de cernes élaborés par des arbres âgés de 10 ans sont disponibles entre 1966 et 1976 que dans les autres périodes (fig. 176). Cette période a donc un poids supérieur aux autres dans le calcul de la production moyenne à l'âge cambial de 10 ans. D'une façon plus générale, la distribution de l'âge cambial en fonction des dates est déséquilibrée. Les jeunes âges, comme 10 ans, sont disponibles pour des dates plus anciennes que les âges plus élevés, comme 30 ans pour notre corpus d'individus en moyenne très jeunes (fig. 176). Cette dérive n'est pas régulière, selon l'âge des arbres présents dans les peuplements. Pour chaque date de la chronologie, regroupant tous les individus, l'âge cambial moyen peut être calculé. Celui-ci est croissant en fonction du temps (fig. 177). L'augmentation suit une droite, de pente égale à 1, dans les périodes où aucun individu plus jeune vient abaisser la moyenne. C'est le cas après 1975 et avant 1920. Lorsque de jeunes

individus entrent dans le calcul, la pente est inférieure à celle de cette droite. C'est le cas entre 1920 et 1945 et entre 1955 et 1975. Durant ces périodes, les apports d'individus jeunes compensent le vieillissement des précédents. Entre 1945 et 1955, l'augmentation de l'âge moyen est, par contre, plus forte que le simple vieillissement, car les cernes non perturbés des individus émondés sont pris en compte alors que leur âge est déjà élevé. La structure d'âge des données est donc complexe et on peut penser que c'est très souvent le cas dans les séries dendrochronologiques.

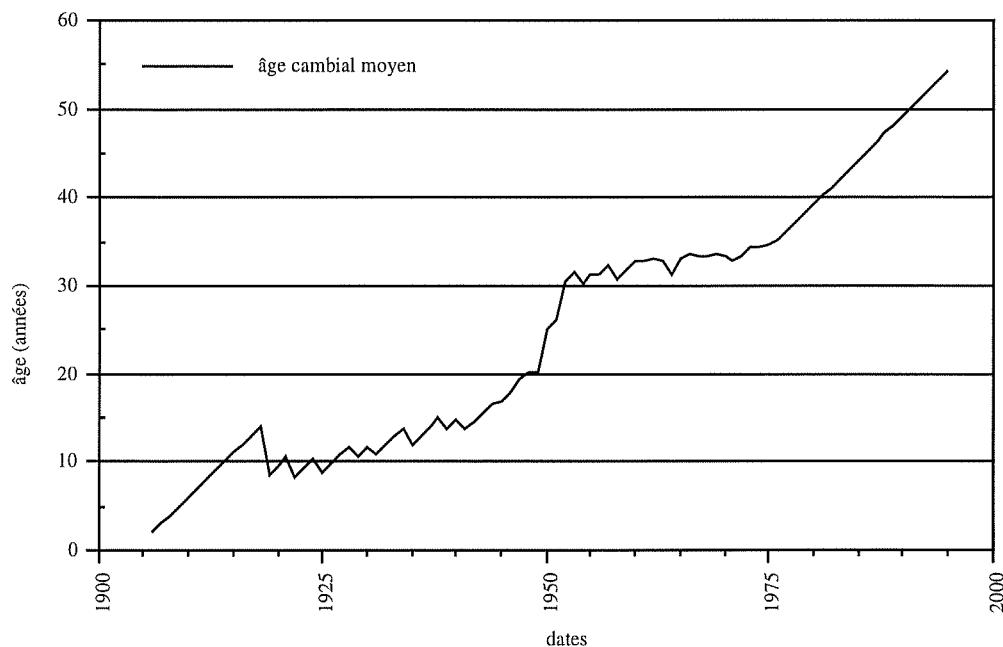


Figure 177 : âge cambial moyen en fonction de la date

Plusieurs études ont montré que la production moyenne à un âge donné n'est pas identique selon les périodes (BERT 1992, BADEAU 1995, LEBOURGEOIS 1995). Le déséquilibre des couples âge cambial / date de formation introduit donc un biais dans l'estimation de la production moyenne en fonction de l'âge. L'utilisation d'une pondération inverse à l'effectif permet de diminuer l'effet de ces déséquilibres (BADEAU 1995).

Ces études ont également montré que la loi de sénescence présente des différences en fonction des conditions générales de croissance. La loi de sénescence du Sapin pectiné établie pour les Vosges (BECKER 1987) n'est pas identique à celle observée pour cette espèce dans le Jura (BERT 1992). L'allure générale des courbes est comparable mais après l'âge de 25 ans, la production moyenne des sapins du Jura est supérieure à celle des sapins des Vosges. A 130 ans, les premiers produisent environ le double des seconds. La loi de sénescence apparaît donc propre à une région. Ces auteurs font l'hypothèse que les caractéristiques générales du Jura sont plus favorables à la croissance du Sapin que celles des Vosges. Les sols sont plus riches et le climat serait plus favorable, car les précipitations et les températures sont en général plus élevées dans le Jura.

En établissant la loi de sénescence en fonction de types de sylvicultures, lors des études de la croissance du Sapin dans le Jura (BERT 1992) et du Hêtre en Lorraine (BADEAU 1995) il a également été montré que les traitements réguliers au cours de la vie des arbres influencent leur production moyenne en fonction de l'âge.

Il n'existe donc pas une fonction de sénescence qui ne représenterait que l'action du facteur âge sur la croissance mais une évolution de la production moyenne en fonction de l'âge, ou "courbe âge" (LEBOURGEOIS 1997), propre aux conditions considérées.



---

Les analyses réalisées avec un grand nombre d'individus, parfois plus de 1000 dans les études citées, permettent de définir la loi de sénescence régionale pour un type de traitement donné qui s'approche au mieux des seuls effets internes. Lorsque la courbe est réalisée avec le même procédé à l'aide d'un échantillon de taille beaucoup plus modeste, à partir de 40 individus, des variations aléatoires importantes sont observées mais l'évolution du niveau moyen de production peut être comparée aux références établies avec les grands échantillons dans les diverses situations. Ce niveau d'information est accessible pour des peuplements anciens naturels et archéologiques. La comparaison entre les "courbes âge" obtenues pour le passé et celles observées dans les forêts actuelles permet alors de formuler des hypothèses quant à la dynamique ancienne des peuplements et donc se rapportant aux grands traits des sylvicultures ou plus généralement aux actions anthropiques.

## 2 Lois de sénescence de référence établies pour le Chêne

### 2.1 Conversion des TSF

On peut penser qu'avant le XIXe siècle, sans que les origines soient bien connues, les chênaies de Lorraine et, d'une façon plus générale, dans l'est de la France, étaient conduites en taillis-sous-futaie (TSF). Dans ce type de traitement, décrit par LANIER *et al.* (1994), le peuplement comporte deux strates verticales distinctes. La strate basse (le taillis) est exploitée régulièrement pratiquement en totalité. Les rotations sont en général comprises entre 25 et 35 ans. La strate haute est composée d'arbres (les réserves) peu espacés qui se développent à un niveau de compétition très faible. Le balivage permet de recruter parmi la strate inférieure les arbres d'avenir, appelés à rejoindre la strate dominante. En 1820 Lorentz, à Nancy, et précisément en forêt d'Amance, a montré que ce système de gestion présente des inconvénients majeurs qui se traduisent dans la quantité et la qualité du bois produit (LANIER *et al.* 1994). Le parti a donc été pris de convertir les TSF principalement en futaies régulières, pratiquement équiennes, dont la production en quantité et qualité est meilleure (LANIER *et al.* 1994). Dans ces peuplements, les coupes sont plus rapprochées dans le temps 8 à 10 ans et intéressent un volume de bois très inférieurs à celles du TSF. Elles permettent de gérer de façon plus modulée la compétition entre arbres. Globalement, celle-ci est plus forte et plus homogène au cours de la vie de l'arbre et permet d'obtenir des billes plus élevées et régulières.

La conversion a été engagée à grande échelle depuis la fin du XIXe siècle, progressivement, pour étaler les coûts, dans les forêts domaniales. Le niveau de compétition entre les arbres, particulièrement dans le cas des chênes, a donc globalement augmenté depuis cette période. Cependant, la conversion n'est pas toujours facilement réalisable dans des conditions de production difficiles et surtout, elle rencontre jusqu'au début du XXe siècle plusieurs résistances : des oppositions théoriques et liées aux coûts des opérations. Principalement dans les forêts communales, la conversion est plus lente, car la période d'attente, de vieillissement du peuplement, induit une baisse du produit que l'économie communale ne peut pas toujours supporter. De plus, le changement de traitement induit des changements de pratiques. Les coupes de TSF permettent une gestion aisée de l'affouage avec un niveau de spécialisation des intervenants moins élevé. La futaie produit moins de bois de feux qui apparaît plus difficile à récolter, ce qui est souvent contraire à l'intérêt des communes.

Les taillis-sous-futaies et les futaies régulières coexistent donc ainsi que plusieurs stades de conversion, ce qui ajoute à la complexité du passé sylvicole des arbres actuels.

## 2.2 Lois de sénescence en Lorraine

Les lois de sénescence de *Quercus petraea* et de *Quercus robur* ont été établies, dans un but dendroécologique, à partir de l'étude de la croissance de 505 chênes pédonculés et 529 chênes sessiles répartis dans les forêts d'Amance et de Champenoux, proches de Nancy en Lorraine (BECKER *et al.* 1994). Les placettes échantillonnées représentent la diversité des conditions de milieux de développement du Chêne dans cette région. Les conditions de sylviculture et de compétition entre les arbres sont variées et ont nécessité la mise au point d'un indice de correction particulier pour l'analyse dendroécologique (BECKER *et al.* 1994).

Toutefois, l'étude réalisée par NIEMINEN (1988) d'une partie de la population provenant de la forêt d'Amance, utilisée ensuite pour établir les lois de sénescence, indique que 65 % des chênes pédonculés (pour 341 individus) et 70% des chênes sessiles (pour 312 individus) proviennent de peuplements aménagés en futaies en 1982. D'une façon plus générale, entre 1867 et 1914, la plupart des TSF sont régénérés en futaies régulières (BECKER *et al.* 1994). Les lois de sénescence construites à partir de ces arbres montrent donc la production moyenne en fonction de l'âge dans des conditions de conversion avancée où les arbres de futaie sont majoritaires. Des individus âgés de TSF ont cependant été conservés et le déséquilibre entre les classes d'âge de chaque traitement a nécessité la mise au point de l'indice de correction (BADEAU 1995).

L'accroissement moyen en fonction de l'âge est calculé par les auteurs en surface terrière, car cette variable minimise les effets du vieillissement d'un point de vue géométrique (BECKER *et al.* 1994). Toutefois, la surface n'est pas couramment employée dans les applications dendrochronologiques où les comparaisons visuelles des graphiques de croissance sont basées sur les séries de largeurs. Les modèles proposés en surfaces ont donc été reconstruits en largeurs en utilisant la méthode de calcul des surfaces de cernes à partir des largeurs cumulées (BADEAU 1995).

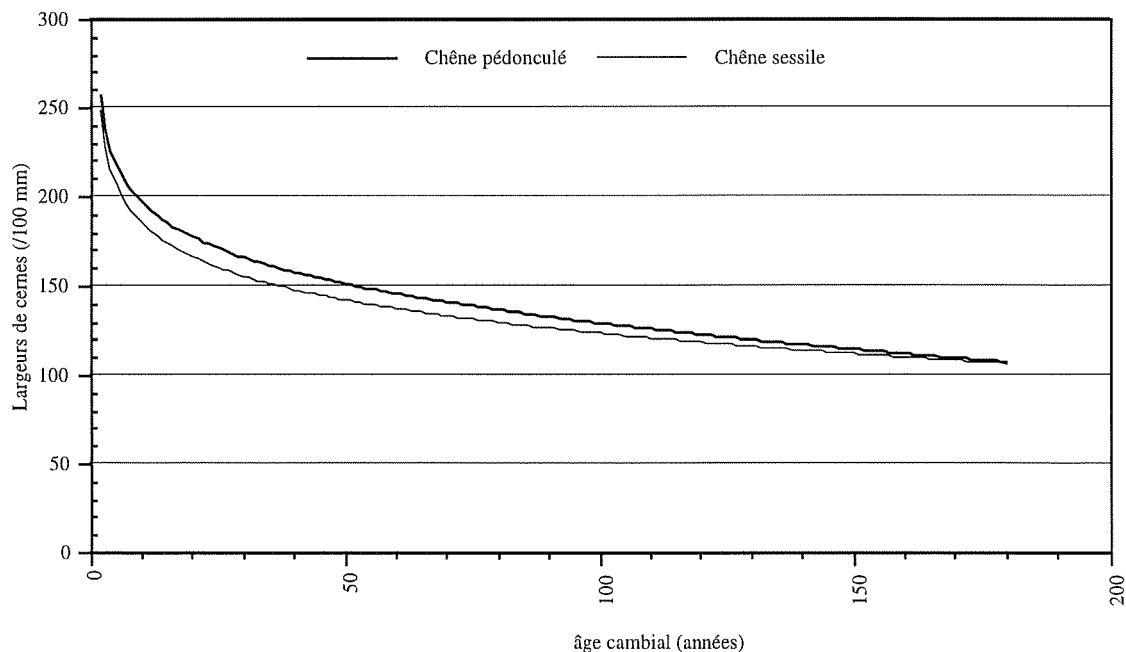


Figure 178 : loi de sénescence des chênes sessiles et pédonculés en Lorraine (BECKER *et al.* 1994)

Les modèles représentent les variations des largeurs dégagées des effets aléatoires dus aux différences d'échantillonnage. Ces variations sont par ailleurs faibles, car les nombres d'individus considérés sont élevés (BECKER *et al.* 1994). L'évolution de la largeur en fonction de l'âge est très similaire pour les deux espèces. A tout âge, le Chêne pédonculé produit cependant davantage que le Chêne sessile. Toutefois, les courbes sont séparées au plus de 12

/100 mm (vers 20 ans). La croissance moyenne à l'âge de 100 ans, obtenue avec les modèles, donc pour des arbres types, s'élève à 158 /100 mm pour le Chêne pédonculé, et à 149 /100 mm pour le Chêne sessile. Les caractéristiques anatomiques du bois, seules disponibles pour les restes anciens, ne permettent pas d'identifier les deux espèces. De même, l'écart entre les croissances moyennes, pour des peuplements mixtes existe, mais reste trop faible, quel que soit l'âge, pour permettre une identification de l'espèce.

A partir d'environ 250 /100 mm la croissance en fonction de l'âge diminue pour atteindre 150 /100 mm à environ 40 ans pour le Chêne sessile et à environ 50 ans pour le Chêne pédonculé. La largeur varie moins au delà de 50 ans et reste supérieure à 110 /100 mm vers 150 ans.

### 2.3 Loi de sénescence en Franche-Comté

Les diverses interventions du laboratoire de Chrono-écologie dans les forêts contemporaines de Franche-Comté permettent de regrouper 298 individus provenant des forêts collinéennes, utilisables pour estimer une loi de sénescence. Ces arbres proviennent de 31 stations de prélèvements localisées principalement dans la forêt domaniale de Chaux (39) et dans les forêts de la dépression périvosgienne, entre Lure (70) et Luxeuil (70). Les milieux de développement des arbres sont assez variés mais l'échantillonnage ne permet pas de recouvrir la diversité des types de stations forestières existant dans la région. Les peuplements sur sols à hydromorphie temporaire sont les plus représentés alors que les formations sur plateau calcaire sont plus rares, bien qu'elles soient très développées dans la région. Les chênes pédonculés et/ou sessiles dominent les stations de prélèvements, principalement en présence de Charme et de Hêtre. Toutefois certains peuplements plus hygrophiles ne comportent que du Chêne en étage supérieur. Celui-ci est associé à du Bouleau et/ou de l'Aulne dans les stations les plus hydromorphes de la forêt de Chaux ou des forêts de Lure et Quers (70). L'échantillon se décompose en 142 chênes sessiles, 116 chênes pédonculés et 40 indéterminés. La plupart de ces derniers proviennent de billes prélevées après exploitation. De façon à obtenir le lot le plus vaste, les deux espèces sont considérées sans distinction. Ce regroupement serait imposé dans le cas de matériel ancien.

moyenne : 112    mode : 93-103  
 médiane : 110    aplatissement : -0,11  
 minimum : 42    asymétrie : 0,44

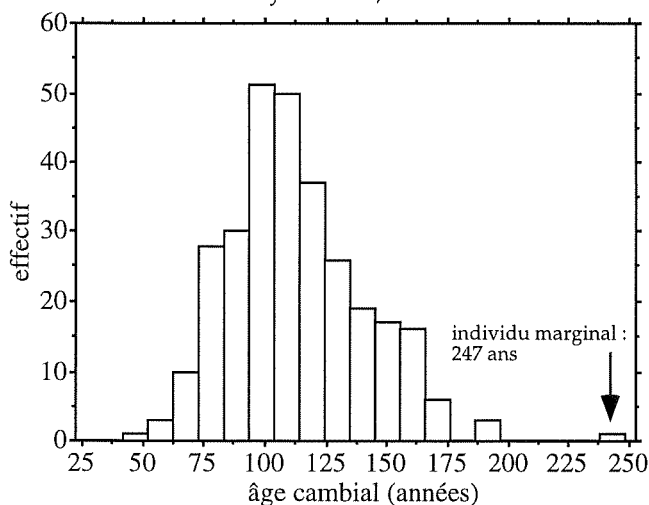


Figure 179 : effectif des classes d'âge. Les paramètres sont calculés sans prendre en compte l'individu de 247 ans

Les 298 individus sont âgés en moyenne de 112 ans. Les effectifs des classes d'âge montrent une forte représentation des séries comportant entre 93 et 113 cernes (fig. 179). Les paramètres descriptifs indiquent toutefois que l'âge est distribué de façon proche de la

normale dans l'échantillon. Les âges sont assez variés mais les individus de moins de 73 ans sont peu nombreux.

Les arbres prélevés proviennent de forêts communales, exception faite de ceux issus de la forêt domaniale de Chaux. Leur passé sylvicole est très probablement varié. Les mesures de la hauteur totale et du diamètre ont été réalisées sur un échantillon de 60 arbres du massif des Franches Communes, dans la dépression périvosgienne. Ces mesures ont permis d'estimer l'indice de compétition défini par BECKER (1992). Il se trouve dans chaque placette de prélèvements des arbres qui subissent une compétition plus ou moins forte qui a des répercussions importantes sur leur état sanitaire et leur croissance (GIRARDCLOS 1997).

Les parcelles qui ont été analysées dans le bois des Franches Communes posent des problèmes de régénération, liés à la présence de Molinie, et sont principalement exploitées pour l'affouage. Probablement en rapport avec ces conditions, les dernières coupes de TSF ont été réalisées dans le massif en 1956. Elles sont cependant actuellement en conversion ou réglées en futaies. Les arbres, âgés en moyenne de 80 ans, ont donc principalement été gérés en TSF.

A : date de coupe	Origine	TSF	TSF	TSF	conversion			amélioration	
P72	1861	1888	1918	1945	1965	1972	1987		
P95	1835	1895	1925		1959	1968	1977	1987	
P96	1837	1896	1926		1959	1973	1977		
P97	1867	1896	1926		1960	1981			
P212	1815	1879	1907	1937	1958	1979			
P213	1813	1879	1907	1937	1968	1979			
P664	1862	1891	1921	1949	1981				
P691	1862	1901	1931		1964	1969	1988		
P15	1870	1906	1936		1974	1986			
B : période entre coupes		TSF	TSF	TSF	conversion			amélioration	
P72		27	30	27	20	7	15		
P95		60	30		34	9	9	10	
P96		59	30		33	14	4		
P97		29	30		34	21			
P212		64	28	30	21	21			
P213		66	28	30	31	11			
P664		29	30	28	32				
P691		39	30		33	5	19		
P15		36	30		38	12			

Tableau 63 : A : dates de coupe et B : période entre les coupes dans les parcelles étudiées en F.D. de Chaux. (communication : BARDOZ ONF Dole)

D'une façon générale pour les forêts étudiées, les parcelles sont tardivement converties. C'est par exemple le cas en forêt domaniale de Chaux. Depuis le début du XIXe siècle, les coupes, dans les parcelles analysées, sont régulièrement espacées de 30 ans, avec une tolérance de quelques années (tab. 63). Les arbres les plus âgés au moment de la première coupe archivée ont, soit environ 30 ans, soit environ 60 ans. Compte tenu de l'estimation de l'âge, on peut supposer que le balivage se réalisait également vers 30 ans. La présence d'arbres de 60 ans au moment de la première coupe peut s'expliquer par la perte de dates d'interventions ou par un recrutement d'arbres dominés pendant une rotation. La dernière coupe de TSF est dans la plupart des cas reportée de quelques années. Ensuite, les exploitations sont plus rapprochées dans le temps et intéressent un volume de bois inférieur. Cependant, la conversion des parcelles P15, P72, P97, P212 et une partie de P213 est rendue délicate par la présence d'arbres dépérissants et de Molinie abondante. Les coupes ont donc été assez régulièrement espacées de 30 ans jusqu'à des dates parfois très récentes. Même si les volumes exploités depuis environ 1960 sont inférieurs, les arbres dont la croissance est analysée ont principalement été conduits en TSF.

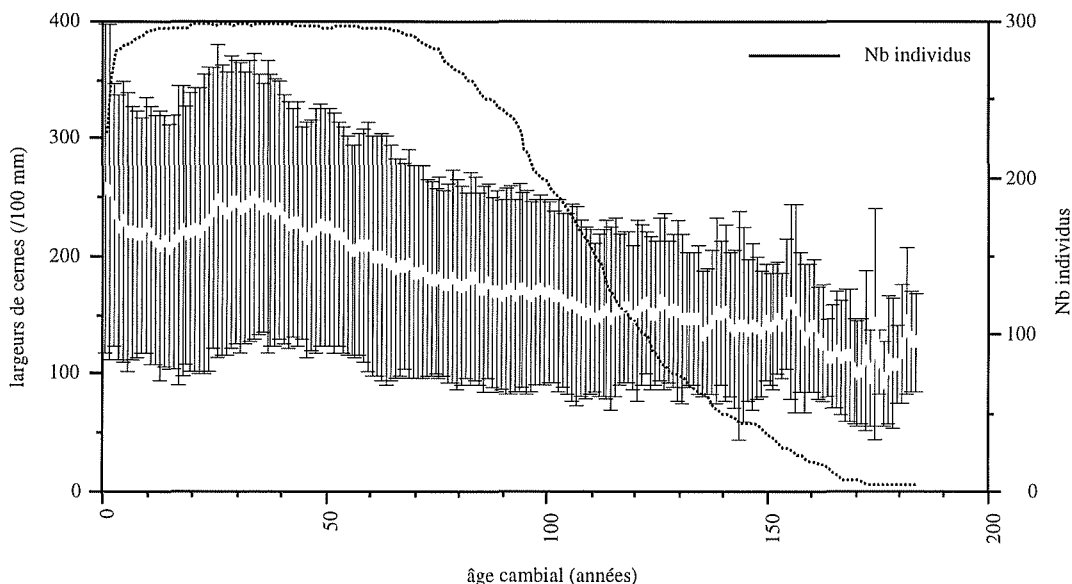


Figure 180 : loi de sénescence du Chêne en Franche-Comté. Barre : écart-type

La loi de sénescence obtenue montre donc l'évolution de la croissance moyenne en fonction de l'âge pour des peuplements franc-comtois dont la conversion est tardive (fig. 180). La courbe réalisée à partir des 298 individus présente peu de variations aléatoires jusque vers l'âge de 150 ans. Après cet âge, elle perd sa signification car l'effectif est très diminué. De même, le calcul de l'écart-type montre que les données sont stables jusqu'à 150 ans. La variabilité diminue avec l'âge et la largeur moyenne ce qui est classiquement observé.

L'évolution de la production en fonction de l'âge est plus complexe que dans le cas des modèles construits pour la Lorraine. La largeur est dans un premier temps de plus en plus étroite. A partir d'environ 250 /100 mm à un an, elle atteint 206 /100 mm à 15 ans soit une diminution de 18%. Cette largeur va ensuite en augmentant pour former un plateau vers 30 ans à environ 245 /100 mm. Après cet âge, la diminution de la production est régulière pour atteindre 150 /100 mm vers 110 ans.

Les différences observées entre les lois de sénescence établies pour la Lorraine et la Franche-Comté peuvent être expliquées par plusieurs hypothèses. L'échantillonnage bien que comportant 298 individus est moins diversifié, les milieux représentés sont moins nombreux et les classes d'âge sont plus déséquilibrées pour la courbe franc-comtoise. Toutefois, il a déjà été remarqué pour le Sapin (BERT 1992) et le Hêtre (BADEAU 1995) que la sylviculture influence l'évolution de la production en fonction de l'âge.

La loi de sénescence construite avec les chênes de TSF présente des points communs avec celle élaborée pour le Hêtre conduit de la même façon en Lorraine. Les ordres de grandeur de la production sont assez différents : le Hêtre produit environ 150 /100 mm au tout début de sa vie puis il atteint 250 /100 mm vers 50 ans et produit encore plus de 200 /100 mm au delà de 130 ans. Toutefois, les hêtres de TSF perdent 13 % de leur production moyenne durant leur 13 à 14 premières années puis atteignent un maximum de production, vers 50 ans, suivi d'une diminution progressive. En dehors des ordres de grandeur, les courbes présentent les mêmes variations.

Les opérations réalisées à différentes étapes de la conduite du TSF peuvent expliquer ces variations. Lors de la coupe du taillis, les espèces secondaires, menées en taillis, comme le Charme, ainsi que les rejets de souche de Chêne sont totalement récoltés. Dans le même temps, les baliveaux, généralement issus de semences, sont réservés. Le balivage sur souche,

qui consiste à sélectionner l'arbre d'avenir dans une cépée, n'est pas typiquement pratiqué, mais peut être envisagé pour compléter un peuplement. Les pieds francs germent après la mise en lumière. Durant leurs premières années, ils sont soumis à une forte concurrence des rejets. La vigueur du taillis, à la suite de la révolution, lui permet de dominer les pieds francs qui ne seront libérés qu'à la rotation suivante. Cette domination peut expliquer que la production est plus faible avant l'âge de 30 ans. A cet âge, la baisse de la compétition se traduit par un plateau de forte production puis la concurrence croît de nouveau.

La rotation suivante, théoriquement réalisée vers 60 ans, ne se traduit pas par une augmentation significative de la courbe âge obtenue avec les 298 arbres. Ceci peut s'expliquer par des durées de rotations différentes selon les massifs et surtout par une baisse de la pression exercée par le taillis.

Si l'on sélectionne parmi les arbres prélevés en forêt de Chaux les stations où le taillis est bien présent, en évitant les futaies claires (peu dense), la loi de sénescence obtenue montre 3 augmentations de la production en relation avec la périodicité des rotations (fig. 181).

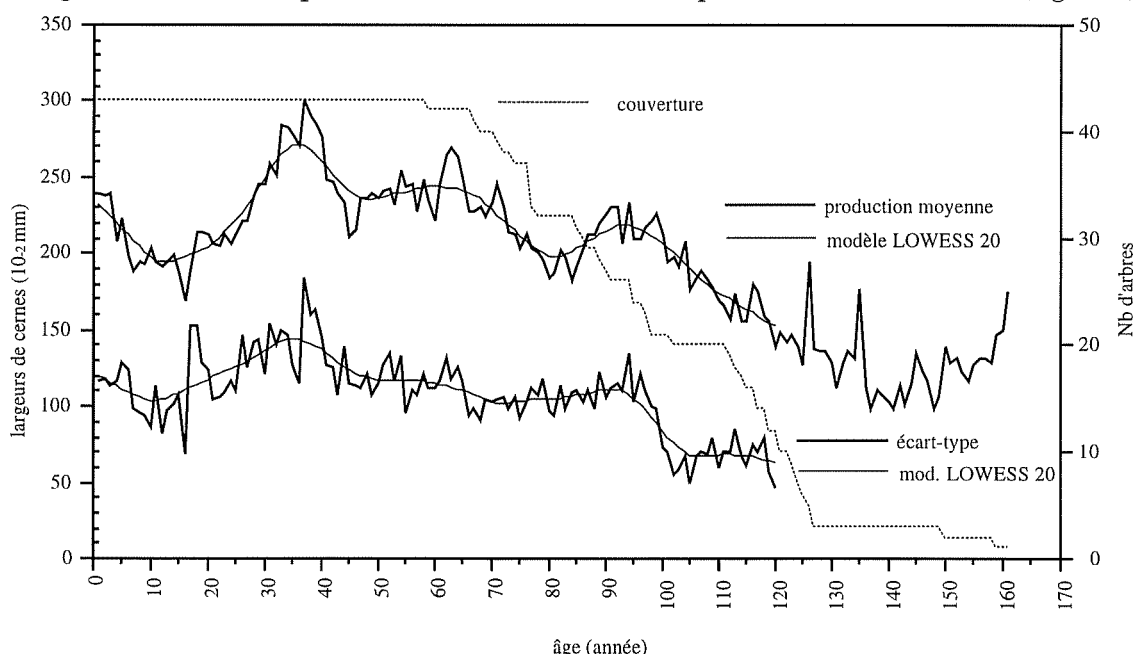


Figure 181 : loi de sénescence du Chêne traité en TSF en forêt de Chaux

Cette courbe est constituée de 43 individus dont les âges sont assez voisins et les milieux de provenance peu diversifiés. De ce fait, les variations aléatoires (de quelques années) prennent une part beaucoup plus importante dans l'évolution de la production que précédemment. Une modélisation (ici LOWESS 20 voisins cf. partie 2) permet cependant de dégager des variations qui peuvent être comparées aux courbes constituées à partir de nombreux individus. Cette courbe ne peut constituer une bonne approximation de la loi de sénescence qui, pour être utilisée en dendroécologie, doit refléter principalement l'action de l'âge sur la production. Toutefois, elle permet de bien indiquer les variations de compétition au sein du peuplement. Celles-ci sont ici principalement en rapport avec les pratiques sylvicoles propres à la conduite en TSF.

D'une façon plus générale, la sylviculture de la seconde moitié du XIXe et du XXe siècle peut être considérée comme une gestion de plus en plus propre à chaque individu de la compétition entre les arbres du peuplement. Les courbes âge permettent de formuler des hypothèses quant aux opérations qui sont pratiquées pour réaliser cette gestion. On peut donc supposer que, pour des niveaux de représentativité comparables, soit environ 40 arbres dont on peut estimer l'âge, d'autres types de peuplements peuvent être décrits par ce procédé.

Pour des lots anciens, archéologiques ou en dépôt naturel, les courbes construites dans des conditions de gestion connues peuvent servir de référence. Par comparaison, le niveau des interventions, les âges auxquels elles sont réalisées, éventuellement le mode de sélection, sur souche ou de pieds francs peut être reconnu. Ceci permet d'apporter une information nouvelle sur l'évolution des pratiques sylvicoles anciennes.

### 3 Loi de sénescence des arbres actuels en Brière

Pour les peuplements échantillonnés en Brière, le système de gestion n'est pas archivé. Cependant, les photographies aériennes, la végétation, le développement des strates dans les formations, l'abandon plus ou moins marqué de l'émondage et l'absence d'observation de traces de coupes, comme des souches (en dehors d'une récolte à blanc de bois de feux à la Chapelle) tendent à montrer que très peu de gestion sylvicole est entreprise. Les peuplements peuvent donc être considérés en dynamique naturelle de colonisation d'espaces parfois totalement nouveaux ou beaucoup moins denses anciennement qu'à l'heure actuelle.

En suivant les mêmes procédés que précédemment, la loi de sénescence de 48 individus de Brière, dont l'âge est estimable, est construite (fig. 182). Les arbres émondés ne sont pas considérés, car leur âge est plus élevé et ils ne reflètent pas les conditions de dynamique récente. Ces arbres ne sont pas assez nombreux pour qu'une loi de sénescence particulière soit construite.

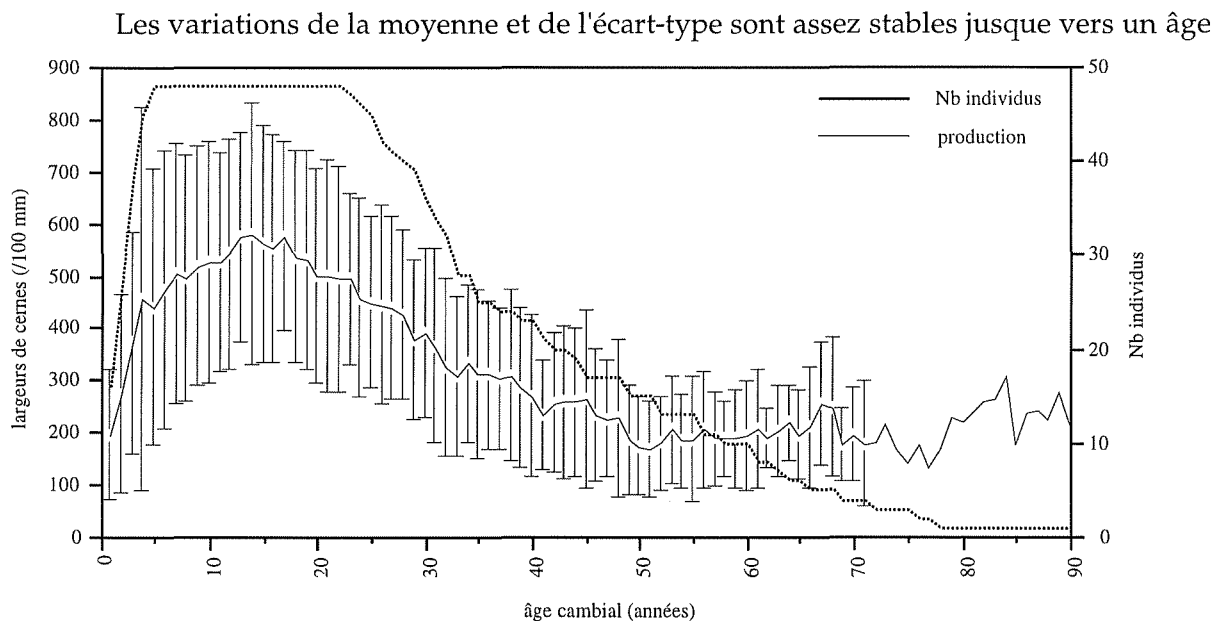


Figure 182 : loi de sénescence du Chêne pédonculé en Brière. Barre : écart-type

cambial de 60 ans. La courbe peut donc être interprétée jusqu'à ce niveau. Celle-ci peut être décomposée en trois phases : dans un premier temps, la production est en forte augmentation, elle diminue rapidement et se stabilise. Pendant les 14 premières années, la croissance passe de 194 /100 mm à 578 /100 mm, soit une augmentation de près de 300 %. Après 50 ans, la largeur moyenne semble se stabiliser vers 200 /100 mm. La perte, en environ 35 ans, est donc de 65 %.

---

La courbe permet donc de supposer que les arbres subissent une concurrence très faible pendant 14 à 20 ans pendant lesquelles leur croissance est rapidement très élevée et reste quelques années très forte. Les ordres de grandeur représentent entre le double et le triple de ce qui est observé pour les formations forestières - types. La croissance à 20 ans dans le modèle du Chêne pédonculé de Lorraine s'élève à 178 /100 mm alors que pour une gestion en TSF, elle est maximale à 30 ans vers 250 /100 mm. Après 20 ans, la perte de production est rapide on peut supposer que la compétition entre les arbres devient importante. La structure du peuplement se stabilise par la suite, les arbres sélectionnés sont dominants.

Il est toutefois délicat de considérer la part de ces variations liée simplement à l'âge. La baisse de production observée dans les modèles de Lorraine entre 20 et 50 ans est d'environ 15%. La perte observée en Brière est bien supérieure (65%). Elle ne peut être expliquée que par la sénescence. L'absence de gestion des peuplements néoformés qui deviennent rapidement plus denses qu'une futaie équienne gérée induit une forte compétition entre les arbres. De même, la période de très forte production est probablement en rapport avec la colonisation de zones très ouvertes dans et entre les haies. Ces zones peuvent même être herbacées, comme tend à le montrer la présence d'espèces prairiales dans les relevés.

Les arbres analysés proviennent très probablement de semences. En effet, leur collet est droit et il n'a pas été observé de stade en cépées ou de souches rejetant. Cependant, la courbe âge ne présente pas une période de largeur de cernes en diminution comme dans le cas d'un TSF. Les arbres en colonisation, ne subissent pas la concurrence d'un taillis "avantagé" par un système racinaire déjà en place.

Les observations faites sur la courbe de sénescence peuvent donc facilement être mises en rapport avec celles faites à partir des autres sources (photographies aériennes, végétation, émondage). La loi de sénescence observée peut donc être considérée caractéristique de peuplements très ouverts dont la densité croît très vite en absence de contrainte et de gestion. Pour les arbres qui sont dans l'étage supérieur, la compétition devient forte en environ 20 ans et limite leur croissance.

## II Relations entre le milieu et la croissance

### 1 Typologie des stations

Les séries de largeurs de cernes peuvent être considérées comme des descripteurs des conditions écologiques stationnelles. Par analogie avec les relevés floristiques ou avec les variables de description du milieu, utilisés précédemment, il est possible de vérifier qu'une typologie des stations basée sur la croissance peut être dégagée. Si les stations peuvent être hiérarchisées en fonction des largeurs de cernes, ceci revient à montrer que, le long de la topo - séquence, la croissance présente des caractéristiques propres à des types de stations "dendrologiques". La typologie des stations de Brière a déjà été réalisée à l'aide des relevés floristiques et des variables descriptives du milieu (cf. chap. 2). Celles-ci peuvent donc être ordonnées par trois voies, floristique, mésologique et dendrochronologique. Si les trois typologies ont des points communs alors, on peut supposer que leur origine est commune et réside dans les facteurs écologiques(cf. annexe 1).



## 1.1 Typologie des séries stationnelles

La chronologie constituée pour une station est utilisée comme un enregistrement la caractérisant. De ce fait, les chronologies sont considérées comme des variables et les années comme des réalisations (ou échantillons) de celles-ci. Les chronologies sont donc en colonnes dans le tableau analysé.

Les largeurs de cernes ne peuvent être utilisées brutes car la tendance, exprimée par une autocorrélation significative, implique que le signal n'est pas stationnaire. L'analyse factorielle des correspondances (AFC) ne pose pas comme condition que les variables soient stationnaires. Toutefois, l'utilisation des largeurs brutes montre que l'âge a l'effet le plus structurant sur les données et masque les autres relations (GIRARDCLOS 1992). L'utilisation de fréquences de classes de largeurs permet de dégager une relation entre la croissance et des facteurs environnementaux, notamment climatiques. C'est le cas pour le Pin d'Alep (SERRE 1977) ou le Cèdre de l'Atlas dans le sud-est de la France (GUIBAL 1984). Les chronologies peuvent être employées sous leur forme continue après standardisation en indices. L'AFC de séries d'indices provenant d'arbres de stations soumises à un même climat montre que les croissances peuvent être ordonnées en types de stations dendrologiques eux-mêmes en rapport avec des ensembles de types de stations forestières, définis par les cortèges floristiques (GIRARDCLOS 1992). Toutefois, la nature continue des largeurs de cernes ou des indices relève plus typiquement de l'analyse en composante principale (ACP). La méthode étant basée (dans le cas d'ACP centrées normées) sur le coefficient de corrélation entre les séries, il est aussi préférable de les standardiser. Ici, elles sont transformées en indices Except. L'ACP des séries de cernes conduit, de façon générale en dendrochronologie, à vérifier que la part de signal commun aux séries est largement supérieure à l'hétérogénéité. D'éventuelles sélections de séries peuvent être réalisées pour optimiser la représentation du lot (PETERS *et al.* 1981, GADBIN-HENRY 1994).

Les relevés floristiques et de variables du milieu n'ont pas pu être réalisés sur les deux stations d'Ile d'Errand. Les deux séries sont donc considérées comme variables supplémentaires dans l'analyse. Elles ne participent pas à la définition des composantes principales. Par contre, elles peuvent être représentées dans l'espace défini par les autres variables pour justifier leur intégration au corpus.

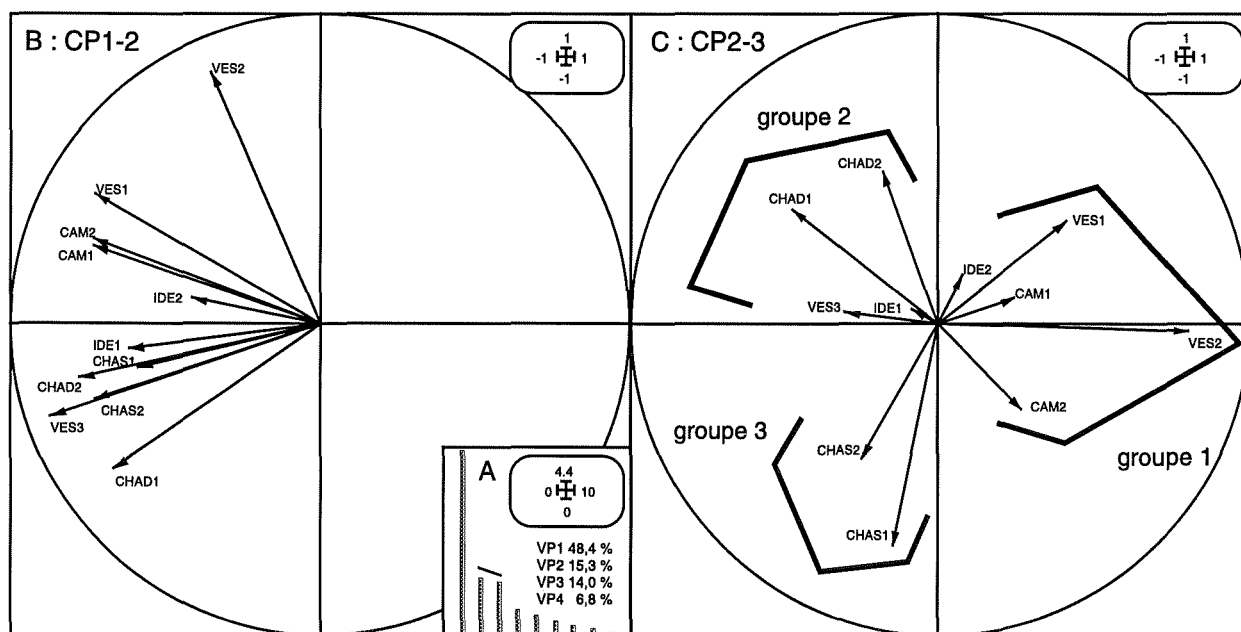


Figure 183 : Résultats d'ACP du tableau de chronologies stationnelles. A : graphe des valeurs propres. B : projection des points stations sur le plan CP1-2. C : projection des points stations sur le plan CP2-3.

Les stations étant soumises au même climat régional, la grande majorité des séries présentent deux à deux une corrélation positive. Dans l'ACP, les points représentant les stations sont donc rejetés à une extrémité du premier axe défini par la première composante principale (fig. 183B). La valeur propre de cette composante représente 48,4 % de la variance totale. Les stations contribuent toutes à sa formation. De même, IDE 1 et 2, variables supplémentaires, sont proches de l'axe. Les séries briéronnes comportent donc un signal commun, ceci malgré l'âge faible et les divers milieux de provenance des arbres. Ce signal représente le caractère le plus important des données vis-à-vis de l'ACP.

La deuxième et la troisième composantes principales représentent une variance nettement plus faible que la première, s'élevant à 15,3 % et 14,1 %. Toutefois, le graphe des valeurs propres montre qu'elles se dégagent des suivantes (fig. 183A). La quatrième valeur ne représente plus que 6,8 % de l'inertie. Sur le plan CP2-3, les vecteurs représentant les stations actives dans l'analyse peuvent être regroupés en trois faisceaux. Les groupes constitués sont en rapport avec la topo - séquence. Les stations du premier groupe, CAM2, VES1, VES2 et dans une moindre mesure CAM1, sont les plus élevées sur les îles. Le troisième comporte celles qui sont les plus avancées dans le marais et le deuxième des peuplements intermédiaires. IDE 1 et 2, inactives dans l'analyse, se rapprochent respectivement plus du groupe 2 et 1. Ceci correspond aux altitudes relatives des deux peuplements. Leur intégration aux groupes est moins significative que pour les autres stations : le vecteur de IDE 2 a une direction assez éloignée de celle du vecteur de CAM2 et le point représentant d'IDE 1 est très proche de l'origine.

D'une façon plus générale, le degré d'appartenance de chaque station à un groupe peut être estimé en comparant la corrélation moyenne entre la série et les autres séries de son groupe, d'une part et entre la série et celles des autres groupes, d'autre part (tab. 64). VES2 qui est représentée par le point le plus éloigné de l'origine, présente une différence marquée entre les corrélations moyennes intra et inter groupe. Par contre, IDE 2 pourrait être intégrée au second groupe. En tenant compte de toutes les valeurs, il apparaît que le groupe 1 est le plus diversifié et le moins bien individualisé. Également, il présente plus de relations avec le groupe 2 qu'avec le troisième

	CAM2	VES2	CAM1	VES1	IDE2	CHAD2	CHAD1	VES3	IDE1	CHAS2	CHAS1
groupe1	0,42	0,31	0,46	0,52	<b>0,31</b>	0,39	0,23	0,4	<b>0,44</b>	0,31	0,24
groupe2	0,37	0,08	0,44	0,50	<b>0,43</b>	<b>0,64</b>	<b>0,59</b>	<b>0,66</b>	<b>0,50</b>	0,47	0,32
groupe3	0,49	0,14	0,35	0,22	<b>0,16</b>	0,28	0,32	0,59	<b>0,4</b>	0,67	0,67

Tableau 64 : corrélation moyenne entre les chronologies stationnelles et celles des trois groupes définis dans l'ACP. Gras : stations supplémentaires. Encadré : corrélations intra-groupe

L'AFC du même tableau est réalisée. Les valeurs propres des deux premiers facteurs correspondent à 34,1 % et 23,6 % de l'inertie (fig. 184A). La troisième valeur propre représente encore 15,9 % de celle-ci mais le troisième facteur ne semble pas pertinent pour l'analyse. Cette valeur est assez élevée car les dimensions du tableau sont restreintes. La projection des points représentant les stations sur les deux premiers facteurs montre une ordination comparable à celle obtenue sur le plan CP2-3 de l'ACP (fig. 184B et fig. 184C). Les groupes définis précédemment présentent les mêmes caractéristiques. Le premier est assez hétérogène, du fait de CAM2, probablement car la station est la plus élevée. Le groupe 2, constitué de stations "intermédiaires" est le plus homogène et les stations les plus avancées dans le marais sont rejetées. L'organisation des points dans le plan de l'AFC permet en plus de mieux montrer, que dans le cas de l'ACP, la répartition des stations le long de la topo - séquence structure les données. Les points peuvent en effet être reliés par une figure proche d'un "U" caractéristique d'un continuum. Les stations présentent, en fait, toutes des différences mais relativement à cette topo - séquence, trois groupes peuvent être proposés.

Lors d'une AFC les profils de chaque colonne sont comparés au profil moyen du tableau pour produire une matrice de distance (cf. annexe 1). Ces distances représentent les relations entre les variables. Dans l'ACP, les coefficients de corrélation entre les colonnes sont les estimateurs des relations entre les variables. Les distances de l'AFC n'ont donc qu'une valeur relative par rapport à l'analyse alors que les coefficients de corrélation ont une valeur intrinsèque par rapport à 0. De ce fait, l'AFC ne permet pas facilement de montrer qu'en dendrochronologie, les séries sont typiquement synchrones ou "proches", comme le propose la première composante de l'ACP. Cette composante permet de montrer que les séries dépendent de facteurs communs alors que l'AFC permet de juger principalement des sources de différences entre les croissances en fonction du corpus constitué.

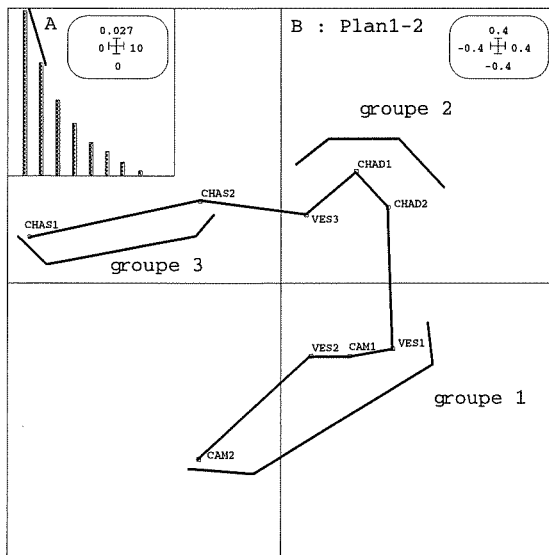


Figure 184 : Résultats d'AFC du tableau de chronologies stationnelles. A : graphe des valeurs propres. B : projection des points stations sur le plan 1-2.

Les chronologies représentatives des stations permettent donc de les ordonner. Les groupes formés peuvent être mis en relation avec la topo - séquence de prélèvements. Des séries de cernes présentent, relativement aux autres, plus de points communs. On peut penser que plus de facteurs influençant la croissance sont communs aux arbres de ces stations. Ces ensembles de facteurs homogènes définissent 3 types de stations dendrologiques dans la topo - séquence de prélèvement.

## 1.2 Couplage des tableaux floristique et dendrochronologique

Pour comparer les typologies produites par les analyses des relevés floristiques et des chronologies stationnelles, la co-structure des deux tableaux est testée en couplant les analyses initiales de chaque tableau (cf. annexe 1).

Dans l'ACP du tableau de chronologies stationnelles, la première composante principale, qui représente le facteur le plus important pour décrire le corpus, indique que celui-ci est commun à toutes les chronologies. Les stations sont soumises au même climat, qui peut être tenu responsable de la corrélation des séries. Les différences de croissance en fonction des milieux, qui permettent d'ordonner des stations, sont donc représentées par des composantes principales auxquelles la variance associée est plus faible. Vis-à-vis de l'ACP, l'unité des chronologies est plus importante que leurs différences. Ceci apparaît caractéristique des lots dendrochronologiques. Des résultats comparables sont obtenus dans d'autres situations avec cette méthode. C'est le cas du Pin pignon (*Pinus pinea*) dans le sud-est de la France (GADBIN-HENRY 1994) ou encore de *Picea glauca* dans la forêt-tundra du Yukon (Canada) (PETERS *et al.* 1981).

Le but est de comparer les typologies des stations obtenues par plusieurs types de variables. L'ACP des indices de croissance n'apparaît pas comme la méthode la plus appropriée puisqu'elle relègue cette typologie en second plan. Les analyses de la co-structure des tableaux, développée plus avant, sont donc réalisées en couplant l'AFC du tableau de chronologies stationnelles et l'AFC du tableau floristique d'une part et l'Analyse factorielle des Correspondances Multiples (ACM cf. annexe 1) du tableau mésologique d'autre part. Les couplages ACPcernes-AFCvégétation et ACPcernes-ACMmilieu réalisés par ailleurs, ont

livré des résultats comparables mais de qualité inférieure à ceux obtenus avec l'AFCcernes.

Les deux analyses propres à chaque tableau ont été présentées (cf. II.3.3 pour la végétation et IV.2.1.1 pour la largeur de cernes). Le but est de montrer que ces deux analyses aboutissent à ordonner les stations d'une façon comparable ce qui permet de supposer que la source de cette ordination est commune et que les tableaux sont deux images des facteurs écologiques stationnels.

Pour calculer la co-inertie des deux tableaux, leurs lignes doivent se correspondre et avoir le même système de pondération (CHESSEL et THIOULOUSE 1996). Elles représentent les stations et les colonnes sont les variables descriptives de celles-ci. Lorsque ces conditions sont remplies, un tableau croisé est construit (cf. annexe 1). L'analyse de ce tableau produit 27 valeurs propres dont les deux premières, qui représentent 51,1% et 25,1% de l'inertie totale, se dégagent (fig. 185A). Ces deux valeurs propres incitent à retenir deux axes de co-inertie. Ces axes sont définis pour représenter au mieux la co-structure des deux tableaux initiaux.

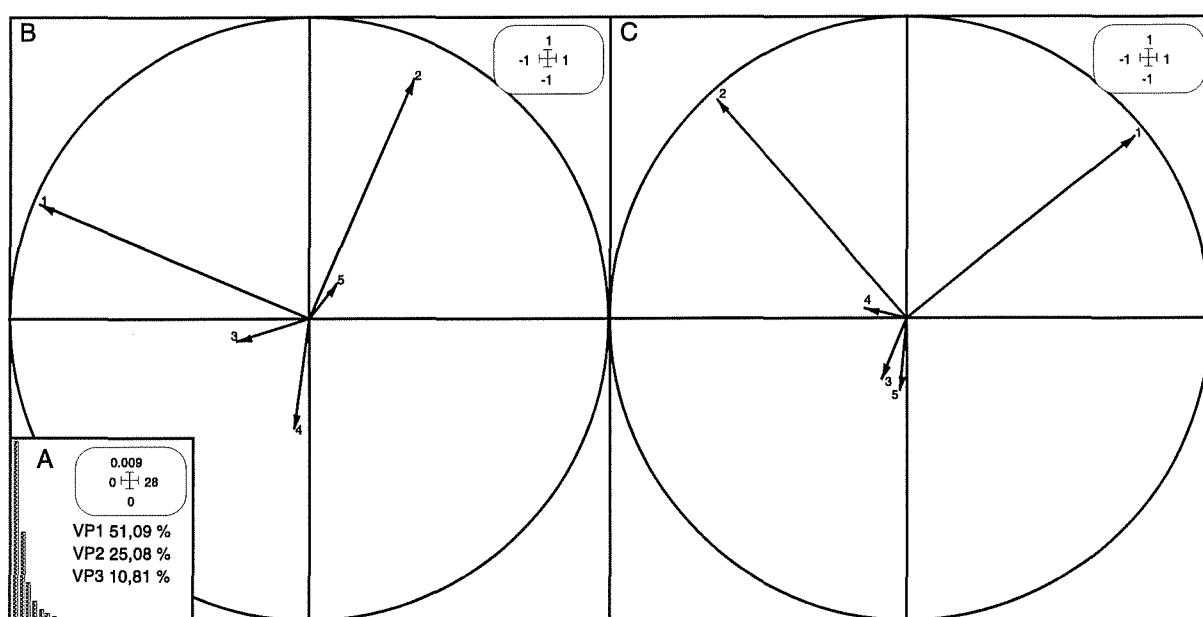


Figure 185 : A : valeurs propres de l'analyse de co-inertie. B : projection des axes d'inertie du tableau cernes sur les axes de co-inertie. C : projection des axes d'inertie du tableau végétation sur les axes de co-inertie

La qualité de la co-inertie peut être testée en la comparant à celles obtenues pour un grand nombre d'appariements des deux tableaux réalisés de façon aléatoire. Les lignes des tableaux sont permutées 100 fois. La somme des valeurs propres obtenues dans chaque cas représente la co-inertie globale. Cette somme s'élève à 0,0174 lorsque les lignes sont en correspondance. Cette valeur est dépassée 3 fois lorsque 100 permutations des lignes sont réalisées. Le test est donc significatif à un taux proche de 3% (fig. 186). Il existe une co-structure entre les deux tableaux qui peut être interprétée.

Les deux tableaux initiaux permettent de définir deux systèmes d'axes, dits d'inertie, sur lesquels les deux nuages sont représentés au mieux. La valeur de l'inertie projetée sur ces axes est reportée dans les colonnes INER du tableau 65. Ces valeurs représentent l'inertie maximale qui peut être exploitée dans la co-inertie. L'analyse du tableau croisé permet de définir un nouveau système d'axes dit de co-inertie. Dans la colonne Varian1 (tab. 65), on remarque que la valeur de l'inertie projetée sur les deux premiers axes de co-inertie (0,022 et 0,019) est voisine de celle observée pour l'AFC du tableau de cernes (0,026 et 0,018). La même observation peut être faite pour le tableau de végétation. 0,47 et 0,43 ainsi que 0,34 et 0,30 sont voisins. Les plans 1-2 de co-inertie sont donc de qualité proche de celle des plans 1-2 des



Les paramètres décrits précédemment peuvent être illustrés par les cartes factorielles construites à chaque étape. Les analyses initiales permettent de définir les typologies des stations qui ont déjà été commentées (fig. 187A et B). Les nuages exploités dans l'analyse de co-inertie présentent peu de distorsion par rapport aux nuages initiaux. Ils sont principalement affectés de rotations et de symétries (fig. 187C et D). Les typologies des stations restent très proches. L'ordre des stations le long du gradient, défini par la topo - séquence, est identique sur les plans des l'analyses initiales et les projections sur les axes d'inertie. Une permutation entre les stations CAM1 et VES1 est notée dans l'analyse des cernes.

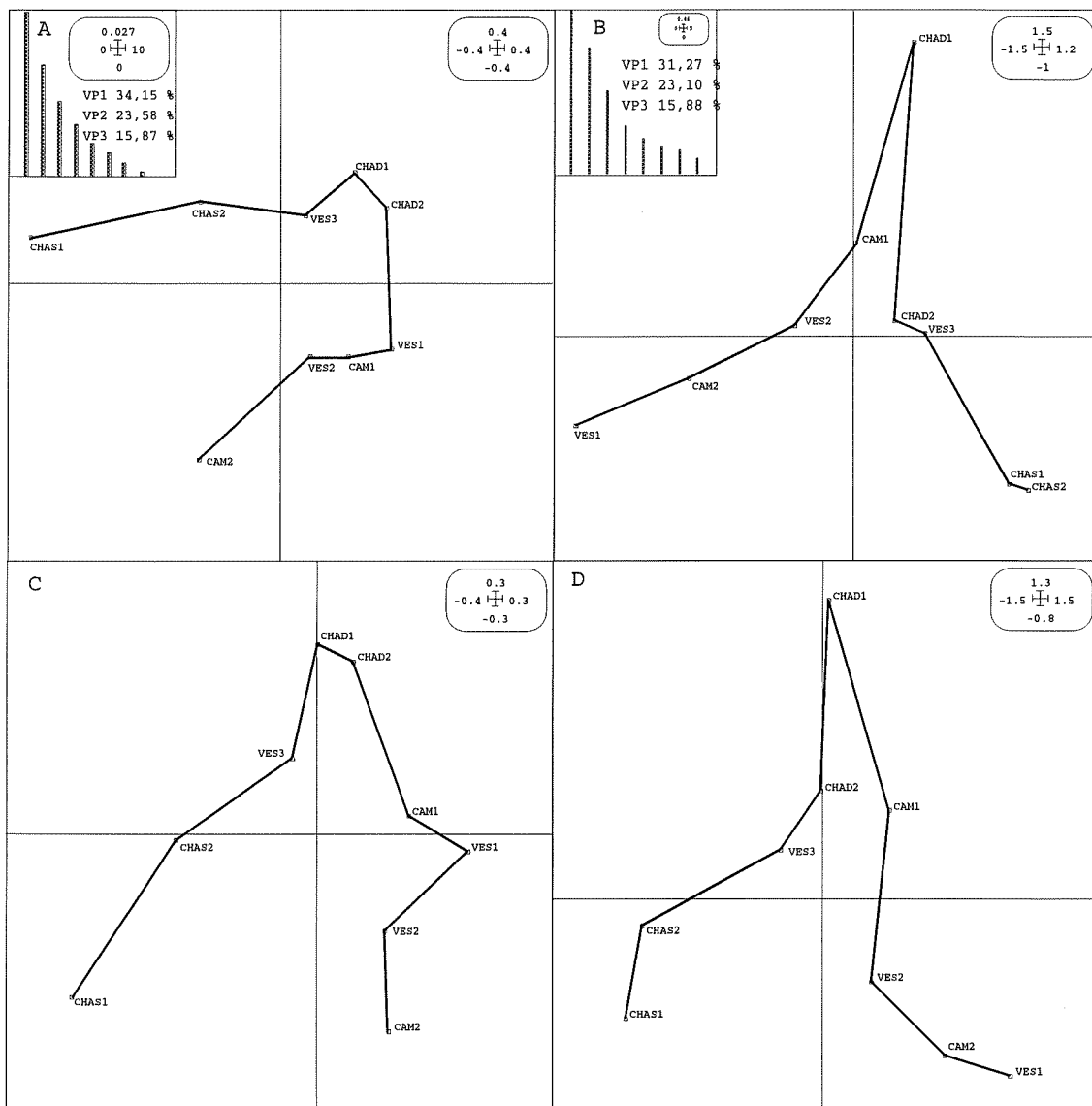


Figure 187 : cartes factorielles (plan 1-2, points stations) de l'analyse de la co-inertie de l'AFCcernes et de l'AFCvégétation. A et B : analyses initiales indépendantes des tableaux cernes et végétation. C et D : projection sur les axes d'inertie des points stations.

Enfin, les deux nuages sur les axes de co-inertie peuvent être unifiés en normalisant les coordonnées (CHESSEL et THIOULOUSE 1996) ce qui permet de représenter sur la même carte les stations en fonction des deux tableaux (fig. 188). L'origine des vecteurs indique la position des stations par rapport aux chronologies stationnelles et l'extrémité des vecteurs par rapport aux relevés floristiques. La confrontation des deux typologies montre qu'une part importante de la structure des données est commune aux deux tableaux. La station VES1 subit le plus de modification de position entre les deux typologies mais elle reste associée aux stations les plus élevées CAM2 et VES2. CAM1 présente un cortège floristique assez original qui la place dans une situation "intermédiaire" dans la topo - séquence mais la croissance sur

la station est plus proche de celle observée à une altitude plus élevée sur l'île. Les stations CHAD1 et 2 et VES3 sont plus typiquement "intermédiaires" selon les deux typologies. Enfin,

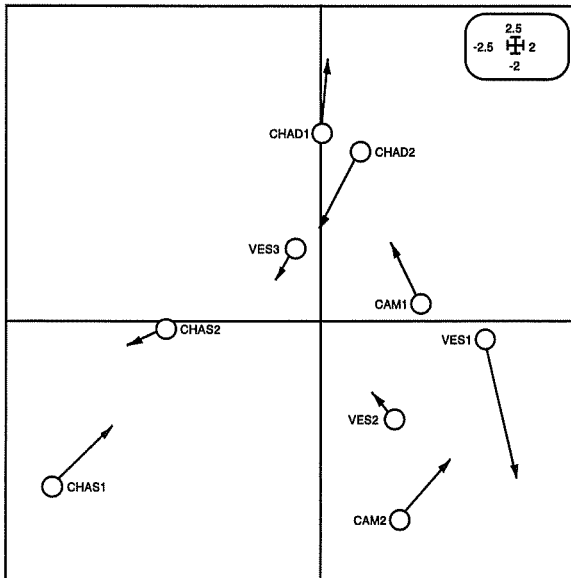


Figure 188 : confrontation des coordonnées des stations sur les plans 1-2 de l'analyse de co-inertie. Origine du vecteur : positions associées au tableau cernes. Extrémité du vecteur : positions associées au tableau végétation.

les stations les plus avancées dans le marais se distinguent par leur cortège floristique et leur croissance.

### 1.3 Couplage des tableaux mésologique et dendrochronologique

De même que précédemment avec le tableau floristique, il est possible de tester la co-structure des tableaux de variables descriptives du milieu et des chronologies stationnelles. Le couplage réalisé associe l'AFC du tableau cernes et l'ACM du tableau milieu.

Les lignes, représentant les stations, sont mises en correspondance et la pondération est rendue uniforme pour les deux analyses, conformément aux conditions imposées par la méthode. Le tableau croisé est construit et le calcul de la co-inertie aboutit au graphe des valeurs propres figure 189A. Les deux premières valeurs propres représentent 48,6% et 23,4% de l'inertie totale et se dégagent des autres. Ces deux valeurs propres incitent à retenir deux axes de co-inertie.

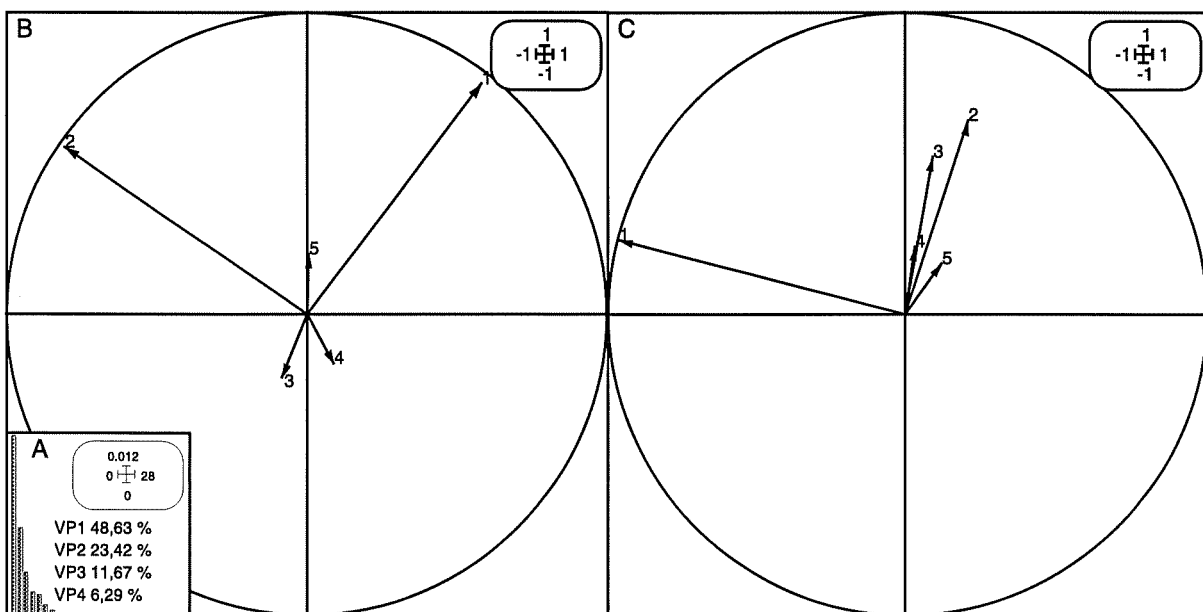


Figure 189 : A : valeurs propres de l'analyse de co-inertie. B : projection des axes d'inertie du tableau cernes sur les axes de co-inertie. C : projection des axes d'inertie du tableau milieu sur les axes de co-inertie.





La projection dans le système d'axes de co-inertie des axes d'inertie montre nettement que les deux premiers axes de l'AFC du tableau cernes participent fortement à la définition de la co-structure (fig. 189B). C'est également le cas du premier axe de l'ACM du tableau milieu (fig. 189C). Le deuxième axe de cette analyse se dégage moins nettement de ses suivants et prend une part inférieure aux précédents dans l'analyse. Les plans 1-2 d'inertie et de co-inertie sont toutefois en correspondance à des rotations près, les deux tableaux présentent une co-structure.

La confrontation des coordonnées normalisées des stations montre que les typologies issues des tableaux cernes et milieu présentent de nombreux points communs (fig. 191). L'origine des vecteurs indique la position des stations par rapport aux chronologies stationnelles et l'extrémité des vecteurs par rapport aux variables descriptives du milieu. Les deux stations les plus basses, CHAS1 et CHAS2, sont bien individualisées. Elles sont cependant plus proches du point de vue de la description du milieu que de la croissance. CAM2 apparaît plus originale que précédemment par rapport aux autres stations élevées. CAM1 présente des variables du milieu plus "intermédiaires" mais le type de croissance rapproche la station de VES1 et VES2, plus élevées sur l'île. VES3 est caractérisée par des variables du milieu particulières, la station était rejetée du continuum dans l'analyse initiale. Toutefois, elle reste assez proche des autres stations "intermédiaires", CHAD1 et CHAD2, sur le plan de co-inertie. L'analyse de la co-structure des tableaux a tendance à minimiser les individualités par rapport aux caractères communs des données. La participation de l'axe 2 de l'ACM du tableau milieu à cette co-structure est inférieure à celles des autres axes, probablement en rapport avec la position marginale de cette station dans l'analyse initiale.

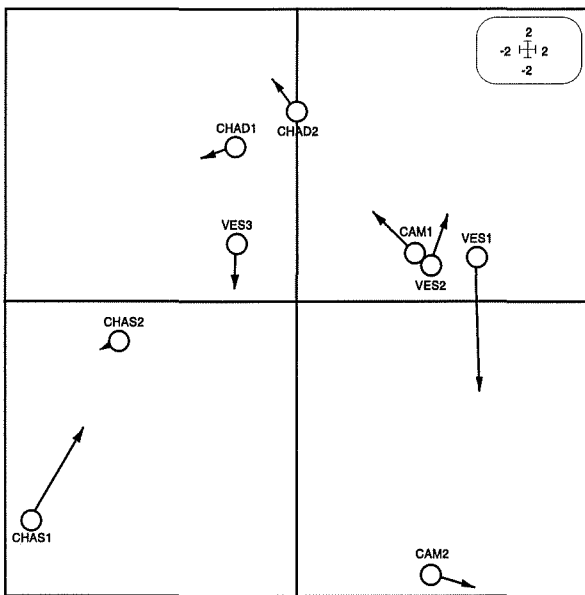


Figure 191 : confrontation des coordonnées des stations sur les plans 1-2 de l'analyse de co-inertie. Origine du vecteur : positions associées au tableau cernes. Extrémité du vecteur : positions associées au tableau de variables du milieu.

### 1.4 Conclusion

On peut montrer qu'il existe une co-structure entre le tableau dendrochronologique et les tableaux floristique et mésologique. La relation entre la végétation et les variables du milieu n'est pas abordée ici mais il existe également un lien entre ces deux tableaux. L'objectif n'est pas de rendre un des tableaux explicatif par rapport à un autre comme dans le cadre d'une analyse de distribution des espèces. La présence d'une co-structure montre ici que les tableaux de différentes natures sont en fait le reflet d'une même source de variations, les facteurs écologiques stationnels. Ces facteurs sont représentés par des variables mésologiques, ils sont responsables de la distribution des espèces végétales et ils jouent un rôle dans la croissance des chênes.

Nous pouvons montrer que les chronologies stationnelles présentent une corrélation assez élevée qui est en rapport avec les facteurs régionaux. Cependant, une typologie en types de stations dendrologiques peut être construite. Cette typologie présente des points communs avec celles réalisées à partir des relevés floristiques et de variables du milieu. Elle est donc bien en rapport avec des types stationnels au sens plus large représentant des ensembles homogènes de facteurs écologiques. Le corpus est échantillonné le long d'une topo - séquence transversale aux marais. Le gradient qu'elle définit est celui qui implique le plus de différences entre les stations. Il est identifiable à l'aide des trois tableaux de données. La typologie construite se rapporte donc uniquement à cette topo - séquence. L'ordre précis des stations le long de ce gradient diffère selon les variables descriptives. Cependant, on peut définir trois ensembles de stations le long de celui-ci, obtenus de la confrontation de toutes les données. Le premier groupe assemble les stations les plus élevées du corpus : CAM2, VES1, VES2 et CAM1 ; le deuxième des stations intermédiaires : CHAD1, CHAD2 et VES3 et le troisième comporte les stations les plus avancées en direction des peuplements spécialisés du marais : CHAS1 et CHAS2.

## 2 Croissance en fonction des types dendrologiques

### 2.1 Typologie des séries individuelles

La typologie des croissances repose sur les chronologies stationnelles, ce qui rend comparables les différents tableaux construits puisqu'ils ont le même nombre de lignes. Cependant en analysant les croissances individuelles, la cohésion des types de stations dendrologiques peut être comparée aux influences internes à ceux-ci. Des facteurs individuels, ou propres à une station, peuvent influencer davantage la croissance de certains individus que ceux qui se rapportent aux types dendrologiques.

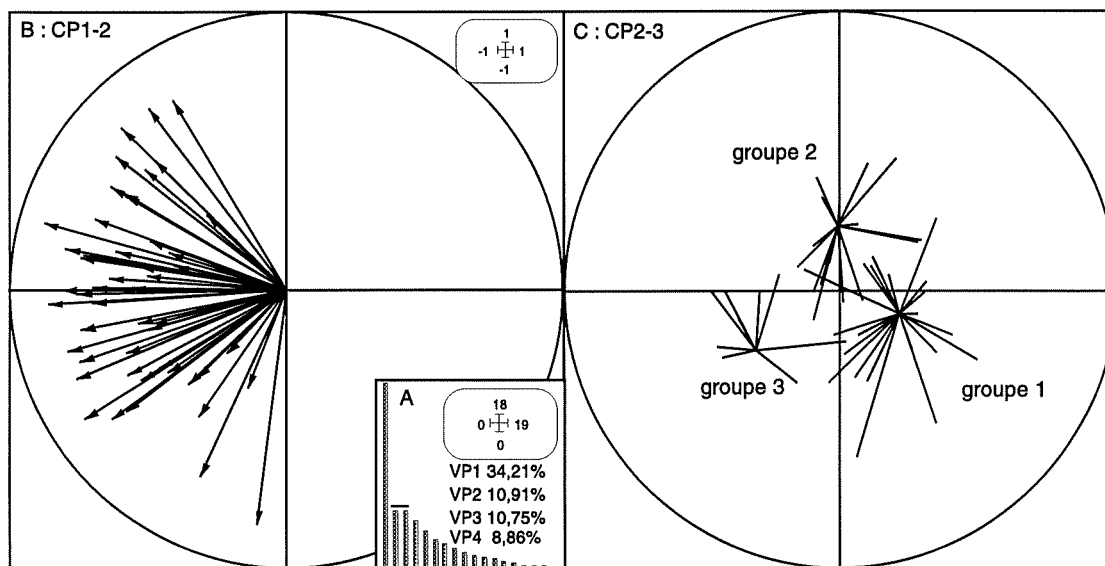


Figure 192 : résultats d'ACP des séries individuelles. A : graphe des valeurs propres. B : plan des deux premières composantes principales. C : plan des composantes principales 2 et 3.

Une ACP est réalisée sur les 52 séries individuelles standardisées en indices Except. Le graphe des valeurs propres montre nettement que la première représente la plus grande part de l'inertie totale (fig. 192A). Sur le plan des deux premières composantes, les points représentant les arbres sont tous rejetés à une extrémité de l'axe 1. De même que pour les chronologies stationnelles, les facteurs régionaux induisent une corrélation entre les séries individuelles. L'inertie projetée sur le premier axe représente 34% de l'inertie totale. Quelques

individus contribuent assez fortement à la formation de l'axe 2 qui représente 11% d'inertie. Toutefois, la différence entre les deux premières valeurs propres reste élevée. Le lot semble donc assez homogène pour ne pas exclure de séries (fig. 192B).

Les deuxième et troisième valeurs propres créent une rupture de pente dans le graphe de la figure 192A qui incite à observer le plan 2-3 de l'analyse. Ce plan montre des similitudes avec celui observé pour les chronologies stationnelles. Il est en effet possible d'unir les individus des stations en fonction de la typologie construite précédemment à partir de l'analyse des trois tableaux. Les trois groupes de points, reliés au barycentre propre à chaque ensemble, sont assez distincts sur le plan (fig. 192C). Toutefois, un individu du groupe 3, localisé près des points du groupe 1 ainsi qu'un du premier groupe, inclus dans le groupe 2, sont retirés du corpus. Leur croissance n'est pas caractéristique du type de station dont ils sont issus. On peut penser que des facteurs individuels perturbent les séries.

## 2.2 Chronologies moyennes par types de stations dendrologiques

Trois chronologies moyennes peuvent être construites à partir des individus des trois types dendrologiques.

	type 1	type 2	type 3
origine	1906	1922	1939
terme	1996	1996	1996
Nb. éch.	23	18	9
Nb. c./an	12	9	7
Nc. c.	91	75	58
âge moy.	48	36	41
c. moy.	341	358	334
e. typ.	89	134	163
r1	0,47	0,7	0,82
r2	0,37	0,69	0,7
75%	44	60	67
90%	38	46	38
rmoy	0,32	0,49	0,43
EPS	0,91	0,94	0,88

Tableau 67 : paramètres descriptifs des chronologies moyennes par types dendrologiques

Les arbres, jeunes, ont une croissance moyenne forte et variable, largement expliquée par l'autocorrélation, significative jusqu'au deuxième rang. La valeur des coefficients de corrélation est progressivement plus élevée dans l'ordre des types. Elle est particulièrement forte pour le type 3 (0,82). Les courbes en données brutes montrent nettement l'influence de la tendance à long terme dans les données (fig. 193). Celle-ci est partiellement liée à l'âge, mais également à la répartition des séries dans le temps et à l'aspect dynamique des peuplements. De façon à mieux observer le lien entre la croissance et les facteurs externes annuels comme le climat, la tendance est supprimée par la standardisation des séries individuelles. La procédure utilisée est la modélisation LOWESS avec une fenêtre de 10

cernes voisins (cf. partie 2). Le procédé revient à utiliser un filtre hautes fréquences, dont la bande passante est de 10 ans. Le modèle permet de supprimer totalement la tendance à long terme (fig. 193). La standardisation est réalisée entre 1954 et 1995 car les données instrumentales sont disponibles pour cette période.

Le synchronisme entre les chronologies est de bonne qualité malgré l'âge des arbres. Les taux de signatures sont élevés mais le faible nombre de séries influe sur ce résultat. La corrélation moyenne, calculée après la standardisation, reste supérieure à 0,3. Les taux d'années caractéristiques ainsi que la corrélation moyenne montrent que les séries du type 2 présentent le synchronisme de meilleure qualité et celles du type 1 le moins bon. Il est possible de mettre cette différence en rapport avec la plus grande variabilité observée entre les stations du type 1 qu'entre celles du type 2 dans toutes les analyses précédentes.

Les conditions d'échantillonnage, imposées par les peuplements, sont minimales aussi bien en nombre de cernes que d'individus. On peut cependant remarquer que la valeur d'EPS est supérieure à 0,85 (WIGLEY *et al.* 1984), y compris pour le type 3 le moins bien

représenté. Ce critère permet donc de juger les chronologies moyennes représentatives des conditions locales de croissance.

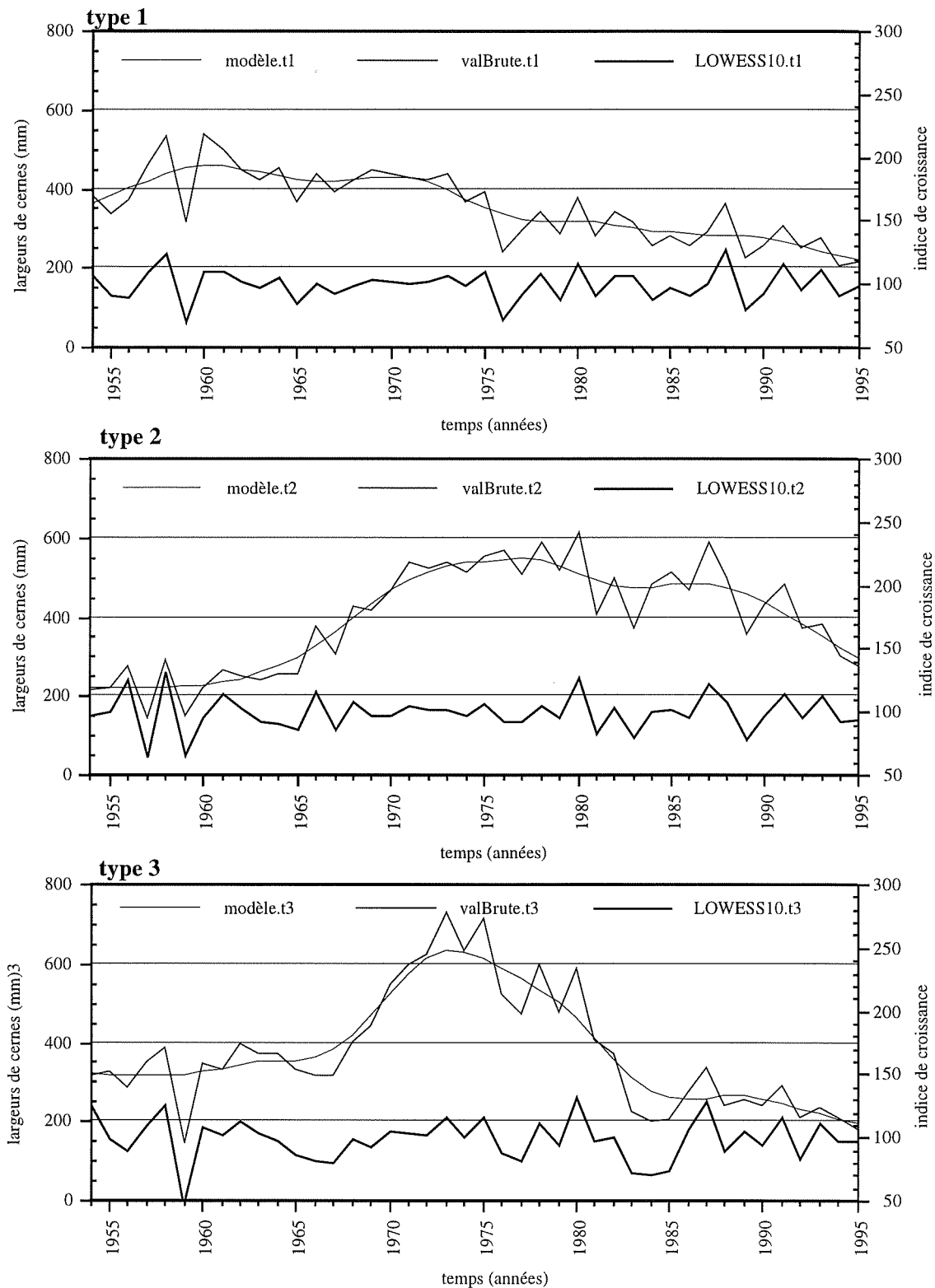


Figure 193 : chronologies par type dendrologique en données brutes et indicées (LOWESS 10 cernes voisins), pour la période entre 1954 et 1995

---

## III Relations entre les facteurs annuels et la croissance

### 1 Années caractéristiques

Une année est définie caractéristique (*pointer year* en anglais et *Weiserjahr* en allemand), au sens large, lorsqu'un événement quelconque affecte une grande part des individus interdatés (KAENNEL et SCHWEINGRUBER 1995). Ce peut être le cas d'une chute de la croissance, d'une blessure, de la formation de bois de réaction, ou de toutes autres observations anatomiques particulières qui se répètent à la même date sur la majorité des arbres analysés. Du fait que cet événement intéresse une grande part des individus la relation entre la croissance et les facteurs de l'environnement a un caractère extrême lors de ces années particulières (SCHWEINGRUBER *et al.* 1990).

Parmi les méthodes d'interdatation utilisées en datation dendrochronologique, un sens plus restrictif est admis à la suite de Huber et Giertz-Siebenlist (1969 in SCHWEINGRUBER *et al.* 1990). Une année est considérée caractéristique lorsque 75% des individus intégrés à la chronologie moyenne présentent un intervalle concordant entre l'année considérée et sa précédente. L'année caractéristique est donc définie par le sens de l'intervalle entre deux cernes consécutifs sans nécessairement tenir compte de l'amplitude de cet intervalle. Dans ce sens, le terme le plus exact pour décrire ce paramètre est intervalle caractéristique dont les correspondants anglais et allemand sont *pointer interval* et *Weiserinterval* (KAENNEL et SCHWEINGRUBER 1995). Toutefois, l'ambiguïté tend à persister dans l'usage en dendrochronologie. Le taux d'années caractéristiques d'une chronologie réfère au pourcentage d'années pour lesquelles le critère de Huber et Giertz-Siebenlist est vérifié.

#### 1.1 définition des années caractéristiques

Il apparaît en fait qu'une année donnée est définie comme caractéristique de façon relative à l'étude menée (SCHWEINGRUBER *et al.* 1990). La fréquence 75% est définie empiriquement comme seuil par Huber et Giertz-Siebenlist. D'autres auteurs comme MUNAUT (1966) préconisent 80%. Les programmes du laboratoire de Chrono-écologie (LAMBERT non publié) utilisent en routine deux fréquences, 75 et 90%, auxquelles peut être associée une amplitude minimale permettant de considérer l'écart ou de le rejeter s'il est trop faible. Si le sens de l'intervalle est le seul paramètre utilisé, la signification de la fréquence est fonction du nombre de séries utilisées (Eckstein et Bauch 1969 in SCHWEINGRUBER *et al.* 1990). Dans le cas d'indépendance des séries, la fréquence des écarts concordants tend vers 50%. Si la distribution du rapport est considérée normale, une limite peut être calculée en fonction d'un degré de sécurité et du nombre de séries (SCHWEINGRUBER *et al.* 1990) (fig. 194).

La figure 194 montre qu'une année peut être jugée caractéristique avec une probabilité de 99,9% uniquement à partir de 12 individus parfaitement concordants. Pour une probabilité nettement inférieure de 90%, 4 individus sont suffisants. Par rapport à ces limites, le critère de Huber et Giertz-Siebenlist revient à retenir plus d'années caractéristiques dans les lots entre 10 et 40 séries mais s'avère plus sévère lorsque ce nombre augmente. Sa définition repose sur la distribution dans le temps de repères utiles pour l'interdatation. L'utilisation conjointe au laboratoire de Chrono-écologie des seuils 75% et 90% permet effectivement d'observer que les années caractéristiques à 75% sont assez nombreuses et sûres pour guider la recherche de synchronisme entre les séries. C'est principalement le cas lors des vérifications

visuelles des propositions de dates. La fréquence des années caractéristiques à 90% est plus faible ce qui réduit leur intérêt pour l'interdatation. Les taux d'années caractéristiques à 75 et 90% sont également des estimateurs simples de la qualité du synchronisme (LAMBERT *et al.* 1988). Par contre, lorsque moins de 40 séries sont utilisées, le critère de Huber et Giertz-Siebenlist ne permet pas de déterminer correctement les années où la croissance peut être supposée influencée par des conditions particulières.

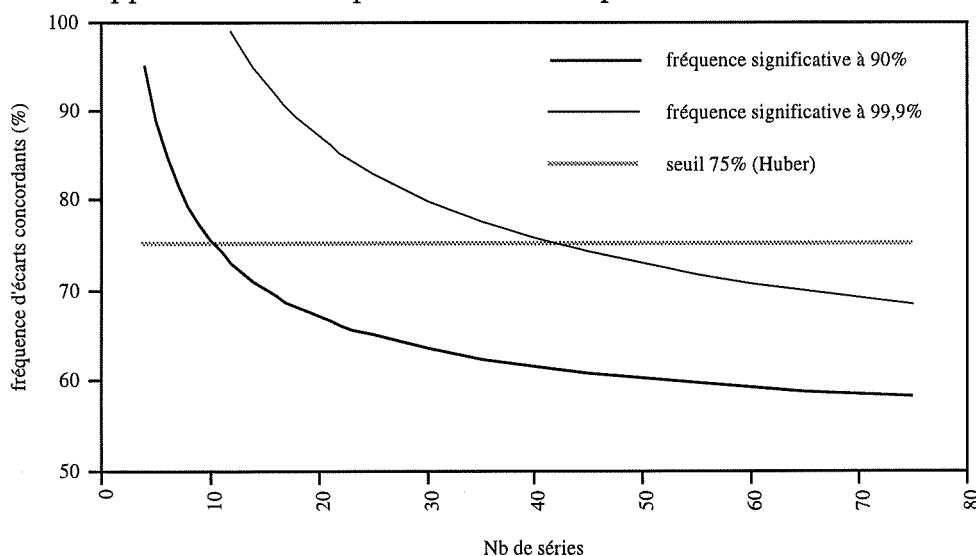


Figure 194 : Proportion de séries concordantes pour considérer une année caractéristique avec une probabilité de 99,9% et de 90% en fonction du nombre de séries individuelles utilisées.

Les chronologies moyennes représentant les types dendrologiques comportent entre 44 et 67% d'années caractéristiques à 75% dont 38 à 46% sont en fait caractéristiques à 90% (tab. 68). Ces taux sont élevés par rapport à ce qui est classiquement observé pour les chronologies moyennes de Chêne mais le nombre de séries utilisées est restreint. Il est donc indispensable de définir un critère adapté pour espérer sélectionner les années où la croissance peut être jugée particulière et en liaison avec des facteurs extrêmes. Ceci d'autant plus que le nombre de séries varie dans le temps et d'une chronologie à l'autre.

Les années caractéristiques sont définies par deux critères : la fréquence du sens de variation entre deux cernes consécutifs et l'amplitude de cette variation.

Pour une année, le sens de variation le plus représenté parmi les séries individuelles est dit concordant. Le sens minoritaire est dit discordant. Le pourcentage de concordance annuel peut être calculé en faisant le rapport nombre d'intervalles concordants sur nombre de discordants. Ce rapport varie de 50 à 100. A la suite de Eckstein et Bauch (1969 in SCHWEINGRUBER *et al.* 1990) la probabilité que le pourcentage soit différent de 50 est calculée en considérant la distribution du rapport normale. L'année est jugée caractéristique, lorsque cette probabilité dépasse 99,9%. Cette valeur ne peut être atteinte que si le nombre de cernes disponibles est supérieur à 12. Pour le type dendrologique 3 et la partie ancienne du type 2, le nombre d'individus est insuffisant, les années sont considérées caractéristiques lorsque le pourcentage de concordance est de 100 (tab. 68). La signification est alors de 99,62%.

Pour chaque série individuelle et entre chaque couple d'années  $n$  et  $n-1$ , l'écart entre les cernes est calculé. Cet écart est rapporté à la valeur de la largeur de l'année  $n-1$  pour obtenir une évolution relative de la croissance. La moyenne des rapports en pourcentage est ensuite réalisée par chronologie. La croissance varie en moyenne de 16%, 20% et 25% (en valeur absolue) entre deux cernes consécutifs dans l'ordre des types dendrologiques. La variation apparaît donc un peu supérieure pour le type 3 ce qui peut être vérifié sur la figure 195.

Les années définies comme caractéristiques à l'aide du sens de variation correspondent à des écarts toujours supérieurs à la moyenne. Toutefois, des écarts importants, tel que entre 1967 et 1966 pour le type 3 (gain de 88%), ne correspondent pas à une forte concordance des sens de variations (tab.68).

Seules les années alliant intervalles amples et concordants sont considérées caractéristiques. Deux exceptions sont retenues, 1958 et 1959 pour le type 3. L'amplitude de variation est importante et le pourcentage de concordance maximum mais le faible nombre de séries induit une baisse importante de la signification.

années caract.	indice			couverture			% de variation			% de concordance			probabilité		
	1	2	3	type1	type2	type3	type1	type2	type3	type1	type2	type3	type1	type2	type3
1954				106	97	126									
1955				91	100	99	12	8	5	-5	4	2	58	60	67
1956				90	126	89	13	8	5	9	28	-4	61	60	78
1957				109	64	110	13	9	5	30	-47	34	77	80	67
1958				124	131	126	16	9	6	26	108	22	74	100	78
- - - 1959				70	66	47	16	9	6	-40	-49	-62	100	100	100
+ + + 1960				110	96	109	16	9	6	64	52	140	96	100	100
1961				110	115	102	16	9	6	7	25	-2	65	89	56
1962				103	103	114	16	9	6	-7	-5	20	74	94	89
1963				97	93	103	17	10	7	-4	-3	-10	57	83	67
1964				105	90	97	17	10	8	6	5	8	70	67	78
1965				85	86	86	18	10	8	-19	5	-10	87	72	89
1966				101	117	81	20	10	8	25	48	-3	87	100	67
1967				93	86	81	20	11	8	-2	-18	88	83	94	67
1968				99	108	98	20	12	9	14	40	43	61	94	89
1969				103	97	92	20	12	9	10	-3	8	61	89	67
1970				102	97	105	21	13	9	1	7	37	65	56	78
1971				100	105	104	22	15	9	-1	14	10	61	89	67
1972				102	101	102	22	15	9	0	8	8	52	72	67
1973				107	101	116	22	15	9	1	2	19	61	61	78
1974				98	97	100	23	16	9	-10	-4	-13	74	89	78
1975				110	106	117	23	17	9	6	10	14	78	67	100
- - 1976				72	93	88	23	18	9	-36	-1	-27	100	78	100
1977				93	93	81	23	18	9	28	11	-11	83	67	78
1978				108	105	111	23	18	9	18	17	36	83	72	100
1979				88	96	94	23	18	9	-17	-6	-21	83	78	78
+ + + 1980				115	127	133	23	18	9	34	34	33	91	100	100
- - 1981				91	84	96	23	18	9	-18	-35	-33	70	94	100
1982				106	103	101	23	18	9	17	24	-11	65	83	78
- - 1983				107	80	72	23	18	9	3	-22	-38	65	90	100
1984				88	100	71	23	18	9	-18	29	-13	78	89	67
1985				98	102	74	23	18	9	14	4	-3	74	61	56
1986				90	96	107	23	18	9	-5	-3	41	65	50	100
+ + 1987				101	122	129	23	18	9	12	28	20	70	94	100
+ 1988				127	109	89	23	18	9	29	-11	-28	96	78	89
- - 1989				81	78	105	23	18	9	-35	-28	19	100	100	56
1990				93	97	95	23	18	9	16	20	-11	83	83	67
+ 1991				116	114	117	23	18	9	23	15	19	96	67	89
- - - 1992				95	96	83	23	18	9	-20	-21	-33	91	90	100
1993				112	113	112	23	18	9	14	13	35	74	72	67
1994				90	93	97	23	18	9	-21	-22	-18	74	78	78
1995				99	94	97	23	18	9	7	-5	-6	65	56	56
moyenne							16	20	25						

Tableau 68 : définition des années caractéristiques. Niveau de gras le plus élevé : années caractéristiques avec une probabilité de 99,9%. Niveau de gras : années caractéristiques avec une probabilité de 99,6% et pourcentages de variation supérieurs à la moyenne.

La figure 195 montre que les variations les plus caractéristiques de la croissance sont bien considérées par la procédure. 11 années sont conservées entre 1954 et 1995 soit un taux de 25% pour la période. Leur répartition dans le temps est très inégale. Après 1958-59, deux années isolées, le taux s'élève à 45% entre 1976 et 1995. 4 années (1959, 1960, 1980 et 1992) sont caractéristiques pour les 3 types dendrologiques. Ces années, l'action des facteurs sur la croissance va dans le même sens quel que soit le type de milieu. Dans les 7 autres cas, les facteurs agissent préférentiellement sur les arbres en fonction de leur avancement dans le marais (tab.68).

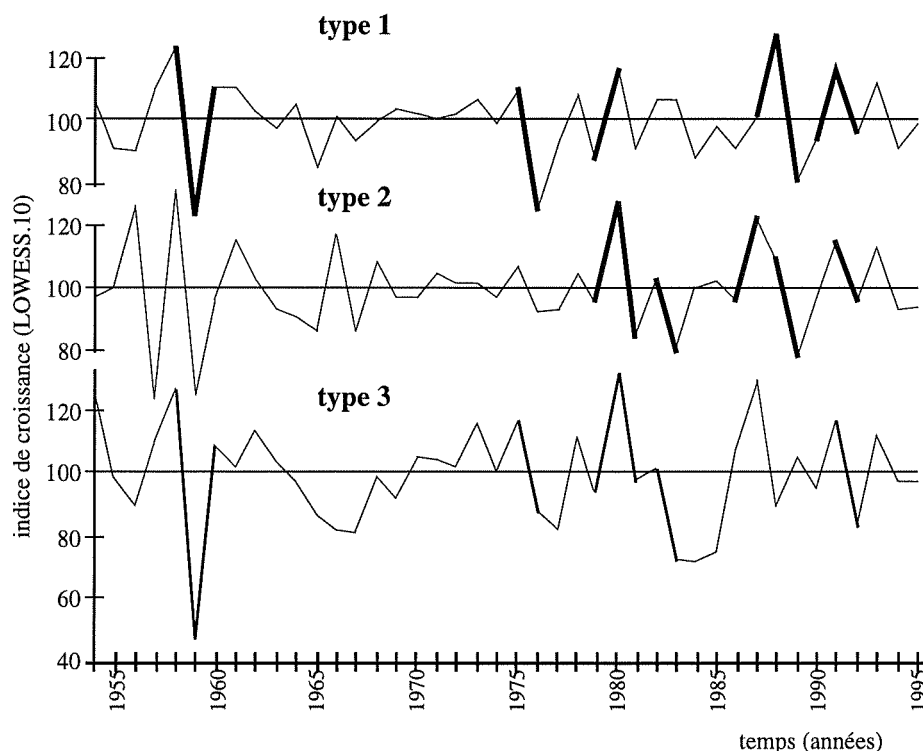


Figure 195 : chronologie moyenne des types dendrologiques. Niveau de gras le plus élevé : années caractéristiques avec une probabilité de 99,9%. Niveau de gras : années caractéristiques avec une probabilité de 99,6%

## 1.2 Climat et niveau d'eau des années caractéristiques

Les variables climatiques, bilan hydrique potentiel et températures, ainsi que le niveau d'eau en Grande Brière des années caractéristiques peuvent permettre de déterminer les facteurs qui agissent sur la croissance en situation extrême. Les variables pour ces années sont comparées aux cycles annuels moyens, calculés entre 1954 et 1995, en fonction de leur action, favorable ou de stress, sur la croissance (fig.196-197). Les mois sont ordonnés d'octobre à septembre de façon à s'approcher du cycle annuel de végétation déterminé par les mesures de la croissance en continu.

Durant la période entre octobre et fin mai les courbes du niveau d'eau en Grande Brière qui correspondent aux années caractéristiques favorables à la croissance occupent, ou dépassent localement, l'intervalle défini par l'écart-type autour de la moyenne (fig. 196). Le niveau en phase humide ne peut être mis en relation avec la formation de cernes caractéristiques larges. Par contre, à partir de fin mai jusqu'en septembre les courbes sont groupées et supérieures à la moyenne d'environ un écart-type. Le niveau élevé peut donc être



---

mis en relation avec les cernes larges. On peut supposer que la présence importante d'eau en Brière est indicatrice d'une meilleure disponibilité de l'eau pour les chênes lors du déficit hydrique estival. Cette plus grande disponibilité permettrait élaboration d'un cerne en général large et de taille supérieure au précédent pour la majorité de la population.

Ceci est particulièrement net en 1980 mais la relation n'est pas directe chaque année pour tous les types. En 1988, le niveau élevé en phase sèche se traduit par une perte de largeur peu significative dans les types 2 et 3 (tab. 68). Les arbres du type 1 profitent d'avantage que les autres en 1991, où le niveau estival est supérieur à la moyenne uniquement en juin et juillet. Le niveau de l'année 1960 est faiblement supérieur à la moyenne au printemps et en août. Le cerne correspondant est par contre nettement plus large que celui de 1959 pour tous les types dendrologiques. La largeur de 1959 est en fait particulièrement étroite. Les conditions de 1960 permettent donc de compenser le stress survenu en 1959. De plus, certaines années, comme 1977, le niveau est supérieur d'un écart-type à la moyenne mais la croissance n'est pas augmentée de façon caractéristique, probablement en raison d'une croissance déficitaire en 1976.

Le niveau d'eau dans le marais est donc supérieur à la moyenne en période sèche pendant les années caractéristiques favorables à la croissance. Cependant la variable ne représente qu'imparfaitement la disponibilité en eau, d'autres facteurs annuels et stationnels peuvent interagir ou encore, un cerne peut être plus large que son précédent, car ce dernier est particulièrement étroit.

Le niveau d'eau en Grande Brière correspondant aux années défavorables pour la croissance est inférieur à la moyenne pendant la phase hivernale à partir de janvier, cependant c'est en juillet et août que l'écart est le plus important, dépassant souvent un écart-type (fig. 146). Deux années font exceptions, 1981 et 1983. Le niveau des mois de mai et juin de ces années sont supérieurs au niveau maximum hivernal moyen. On peut donc penser que l'inondation a été sévère.

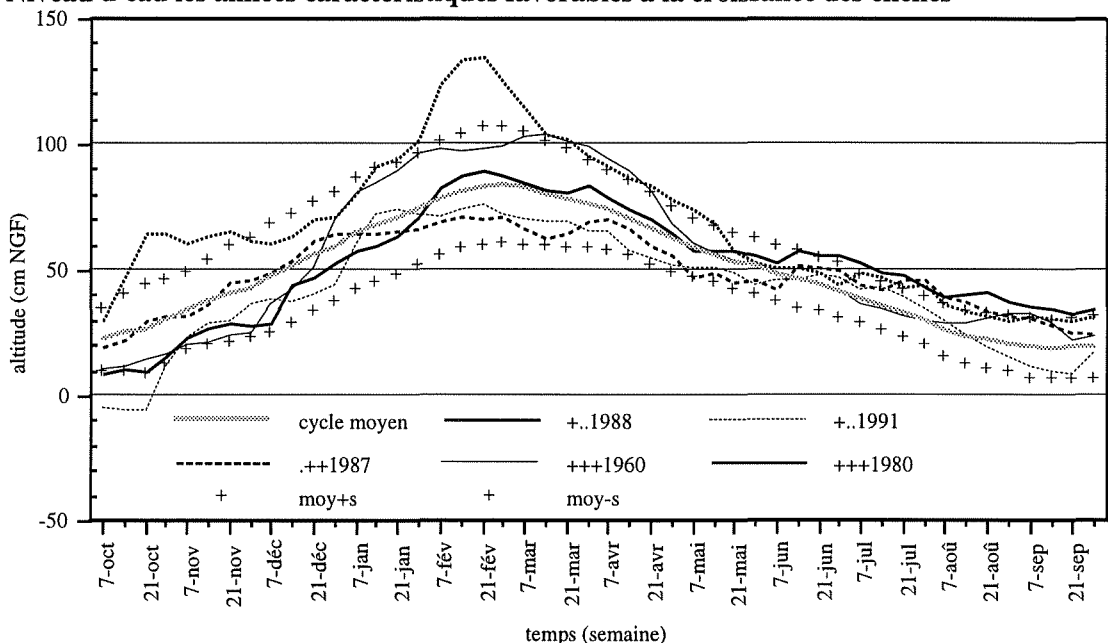
Deux types de variations annuelles du niveau correspondent donc aux cernes caractéristiques minces : un niveau élevé en mai - juin et un niveau bas en juillet - août. Le niveau bas en été peut, comme précédemment, être mis en relation avec la disponibilité en eau durant la période de déficit. Les années caractéristiques favorables et défavorables à la croissance permettent donc de montrer qu'il existe un lien direct entre le niveau et la largeur qui permet de supposer que le déficit hydrique estival est un facteur influençant la formation des cernes caractéristiques. Cependant, les niveaux observés en 1983 et 1981 stressent les arbres par excès d'eau. Ces deux années, les niveaux moyens entre avril et septembre sont les plus élevés de la série d'enregistrement. L'hypothèse d'une contrainte du développement racinaire par asphyxie peut être avancée.

La croissance des trois types dendrologiques est en relation directe avec les niveaux bas en 1989 et 1959. Le déficit hydrique affecte également les arbres avancés dans le marais, car, même s'ils disposent probablement d'eau phréatique, leur système racinaire est très traçant (cf. fig. 153). Cependant, en 1976 et 1989, les types 2 et 3, respectivement, ne sont pas significativement affectés par le déficit. De même, le niveau excessif observé en 1981-83 ne se traduit pas par un cerne caractéristique pour les arbres sur les sols les plus élevés (type 1) (tab. 68). Une interaction entre les facteurs annuels et du milieu est donc observable.

Le bilan hydrique potentiel des années favorables à la croissance indique de façon plus ponctuelle, par rapport au niveau d'eau, que les mois de juin et juillet de ces années sont particulièrement arrosés (fig. 197). Inversement, ces mois sont secs lorsque le cerne est étroit

(fig. 197). Au cours de la période de déficit hydrique, la croissance semble le plus directement liée à l'alimentation en eau de ces deux mois. En dehors de cette période, les courbes des figures 196 et 197 occupent de façon aléatoire l'intervalle défini par l'écart-type. Il ne semble donc pas y avoir de relation entre la variable et la formation des cernes caractéristiques.

#### Niveau d'eau les années caractéristiques favorables à la croissance des chênes



#### Niveau d'eau les années caractéristiques défavorables à la croissance des chênes

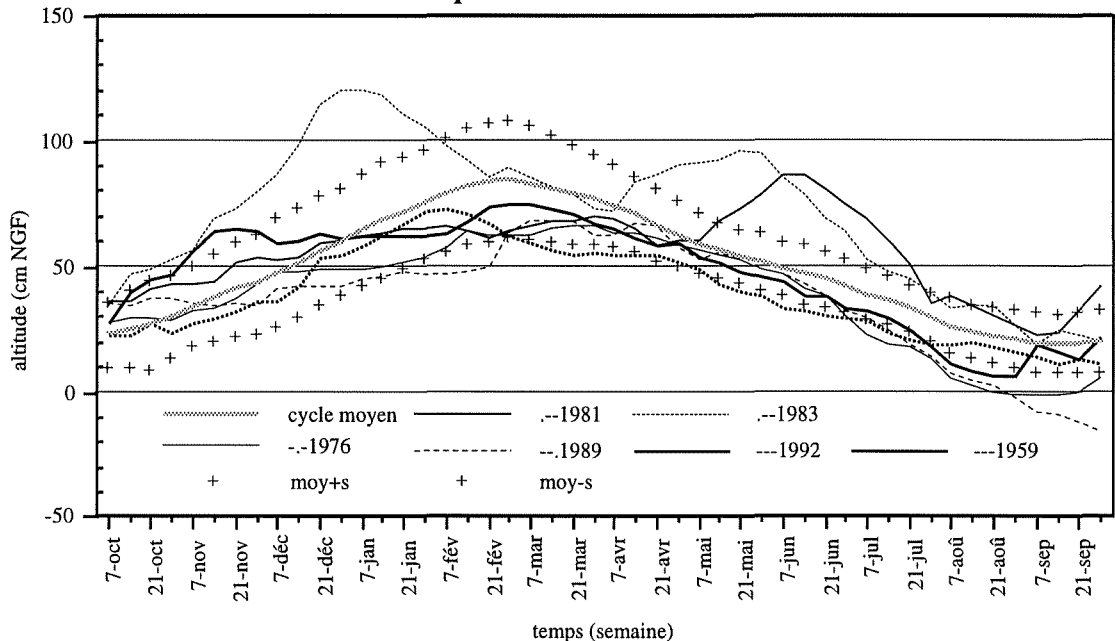


Figure 196 : évolution du niveau d'eau en Grande Brière les années où la croissance des chênes est caractéristique. + - et . : action respectivement positive, négative et non caractéristique des facteurs sur la croissance du type dendrologique correspondant à la place du signe.

Des exceptions peuvent être notées. Comme dans le cas du niveau d'eau, les conditions de 1960 sont peu différentes de la moyenne. La variation positive peut probablement s'expliquer par le rétablissement de 1959. L'année 1988 est régulièrement arrosée, sans excès, du printemps à septembre, exception faite du mois de juin déficitaire par rapport à la moyenne. La répartition des précipitations permet peut-être de compenser ce manque.

Le niveau d'eau en 1981-83 est élevé durant toute la phase sèche et atteint un maximum à la fin mai et mi-juin. Deux pics du bilan hydrique potentiel correspondants sont observés avec un décalage, en avril et mai. Le transit de l'eau dans le bassin versant et l'inertie de la masse d'eau induit un retard et une répartition dans le temps des variations du niveau. En effet, le bilan hydrique est nettement négatif (-100 mm) dès le mois de juin alors que le niveau reste supérieur à la moyenne d'un écart-type jusqu'en fin août. La croissance des arbres des types 2 et 3 est alors affectée défavorablement.

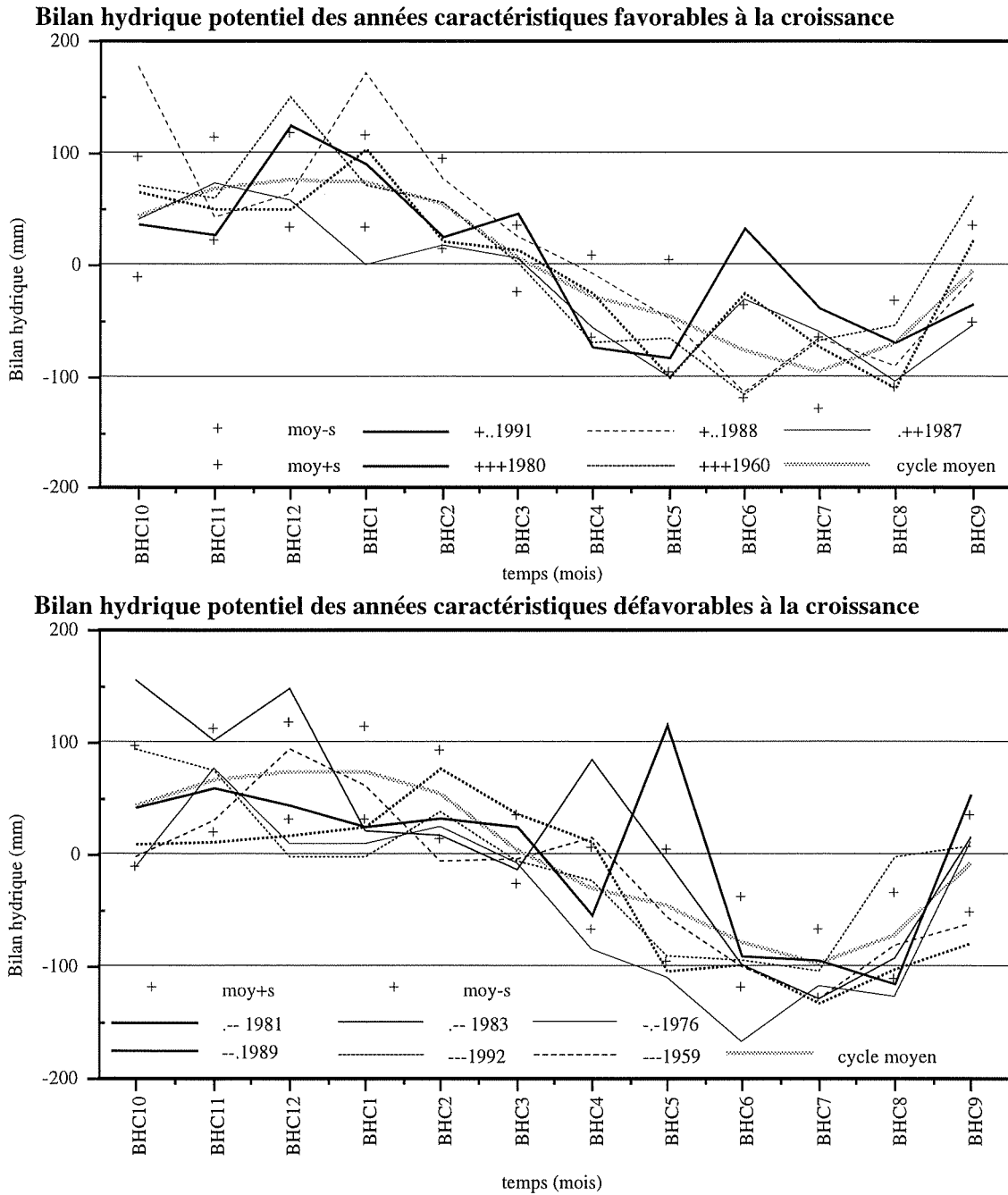


Figure 197 : évolution du bilan hydrique potentiel les années où la croissance des chênes est caractéristique. + - et . : action respectivement positive, négative et non caractéristique des facteurs sur la croissance du type dendrologique correspondant à la place du signe.

---

### 1.3 Conclusion

Les variables sont regroupées en 4 périodes. Une période de repos est comprise entre octobre et mars, puis la période de végétation est découpée de deux mois en deux mois. Les écarts à la moyenne des variables regroupées permettent de synthétiser les résultats (fig. 198).

Les années où les arbres sont stressés, le climat et le niveau d'eau en Brière sont soit particulièrement secs pendant la période de déficit hydrique potentiel, soit exceptionnellement humides au début de la période de végétation.

Les années 1959, 1976, 1989, 1992 correspondent à des sécheresses très marquées d'avril à septembre, les déficits hydriques et les températures de la plupart des périodes de ces années sont exceptionnels, ce qui est corroboré par des niveaux très bas. L'accentuation du déficit hydrique estival semble donc responsable de la formation de ces cernes étroits. Les précipitations hivernales de ces années sont, aussi, faibles. Le bilan hydrique cumulé d'octobre à mars 1975-76 ne représente que 103 mm d'équivalent précipitations. Ces précipitations s'avèrent probablement insuffisantes pour reconstituer la réserve utile des sols, au moins les plus profonds. Les valeurs pour les autres années de sécheresse, comprises entre 174 et 198 mm, sont parmi les plus faibles de la série. Un voire deux mois hivernaux, en 1992, sont déficitaires. Le niveau d'eau dans le marais correspondant est, par contre, plus proche de la normale. Ceci tend à montrer que la réserve d'un sol type, évaluable entre 100 et 150 mm serait tout de même reconstituée ces années.

Les précipitations d'avril - mai 1981 et 1983 sont, à l'inverse, exceptionnellement élevées. Ceci se traduit par un excès d'eau dans le marais jusqu'en juillet. Les températures de juin - juillet 1983 sont également très fortes. Les deux facteurs ont pu interagir dans la formation des cernes étroits. Les types dendrologiques montrent une nette différence de baisse de la croissance à la suite de ces années (fig. 195). Les arbres sur l'île (type 1) élaborent, en 1981, un cerne plus mince, que celui de 1980, mais non caractéristique puis en 1982-83, la croissance reste stable. Ceux plus avancés, des types 2 et 3 perdent 35 et 33% de leur production en 1981. Après une année stable, la chute se poursuit en 1983 (22 et 38%). Enfin, seuls les arbres les plus avancés dans le marais, sur les sols tourbeux les plus épais, ne peuvent recouvrir du stress de ces deux années avant 1986. L'excès d'eau dans le sol semble donc lié à la formation de ces cernes étroits.

Les années où les arbres ont une croissance particulièrement favorisée, le climat et le niveau sont plus humides que la moyenne pendant la période de déficit hydrique potentiel (fig. 198). Ceci confirme la relation directe entre la formation des cernes caractéristiques et l'équilibre hydrique de cette période.

Les précipitations exceptionnelles survenues en juin - juillet 1980 sont corroborées par un niveau élevé de juin à septembre mais restent favorables à la croissance. L'arrivée plus avancée dans la saison de végétation et une intensité moindre de celles-ci peuvent expliquer la différence de réaction des arbres.

Les caractéristiques hydriques de 1988 sont plus proches de la moyenne sauf pendant la période de repos. Par ailleurs, les températures de cette période ainsi que du printemps sont particulièrement clémentes. On peut donc supposer que la formation du cerne caractéristique large est d'avantage liée à un démarrage précoce de la croissance suivi de conditions moyennes.

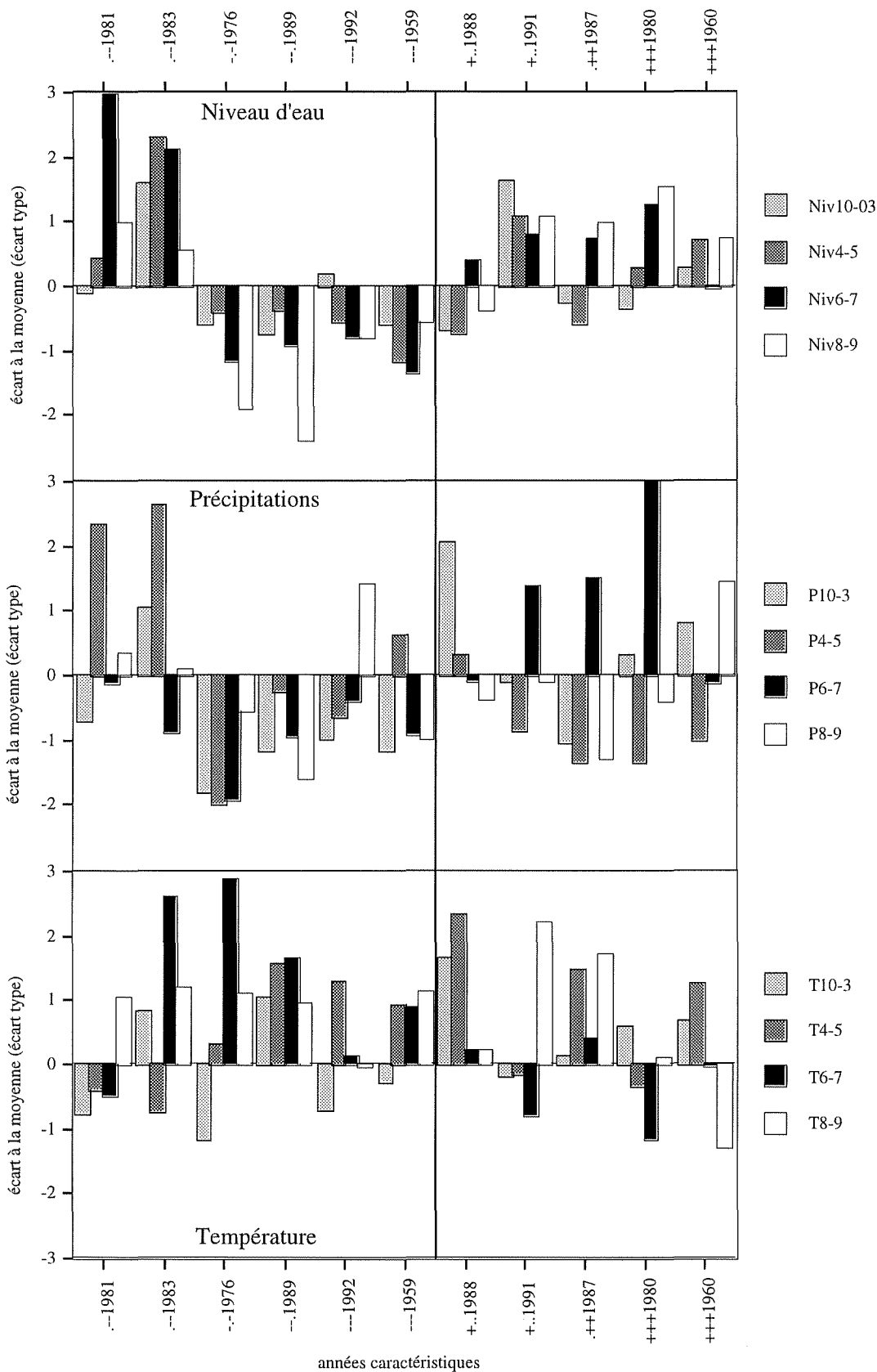


Figure 198 : différence entre la moyenne et la valeur des variables aux années caractéristiques exprimée en écart-type (déviatoin standard).

---

## 2 Relations entre les cerne et le climat

L'analyse des variables climatiques et de niveau d'eau des années où la croissance est caractéristique permet de montrer qu'il existe une relation entre le bilan hydrique estival et la largeur du cerne. D'autres facteurs sont également susceptibles d'influencer la croissance, c'est particulièrement le cas des précipitations printanières pour les arbres avancés dans le marais. Toutefois, en mettant en relation les largeurs caractéristiques et les variables climatiques, l'action conjointe de plusieurs facteurs n'est pas correctement prise en compte. De même, il n'est pas possible d'évaluer la part relative des différentes influences. L'établissement d'une fonction de réponse climatique à l'aide des méthodes de régression multiple permet de considérer de façon égale toutes les variables supposées explicatives au départ de l'analyse et de déterminer leur part dans l'explication de la croissance en tenant compte des effets conjoints de certaines d'entre elles. Le modèle construit ne permet par contre pas de juger d'éventuels effets de synergie ou d'antagonisme entre les variables ni de considérer des relations qui ne seraient pas linéaires.

Les conditions climatiques des années caractéristiques indiquent que les précipitations, et plus particulièrement l'engorgement du sol, peut avoir un effet dépresseur sur la croissance pour les arbres les plus avancés dans le marais. Les fonctions de réponse sont donc calculées pour chaque type dendrologique de façon à les comparer le long de la topo-séquence.

### 2.1 Variables climatiques explicatives

Les données mensuelles de températures, précipitations et ETP selon la formule de Penman du poste de Montoir-de-Bretagne nous ont été communiquées par la station météorologique Météo France de Nantes-Bouguenais. Ce poste est situé à 15 km des populations échantillonnées. Les données présentent une relation avec les variations de niveau d'eau enregistrées à Saint-Joachim en Grande Brière (cf. chap. 1). On peut donc penser qu'il représente correctement le climat dont dépendent les chênes analysés.

Grâce à leur disponibilité, les températures et les précipitations mensuelles sont les variables climatiques les plus utilisées en dendroclimatologie. Lors de la construction du modèle, ces variables sont en fait considérées représentatives des facteurs influençant la croissance dans lesquels le climat a une forte participation. Les températures, particulièrement en hiver, peuvent avoir un effet "direct" sur la croissance, dans le sens où la variable est proche du facteur biologique suspecté. Les précipitations, par contre, apparaissent plus "indirectement" représentatives de la disponibilité en eau pour l'arbre.

Les mesures en parallèle de la réserve utile en eau du sol et de l'accroissement en circonférence de chênes sessiles en Lorraine, à un pas de temps journalier, montrent que lorsque la réserve relative du sol atteint 40%, la croissance est stoppée (GRANIER *et al.* 1995). Le stress hydrique induisant l'arrêt de croissance est imparfaitement représenté par les précipitations mensuelles pour deux raisons. D'une part, plusieurs facteurs, principalement propres au milieu et au peuplement, sont impliqués dans la variation de la réserve utile au cours de l'année, et entre les années, en fonction de la pluie incidente. D'autre part, le pas de temps mensuel n'est pas suffisamment fin pour rendre compte correctement de la variation de ces pluies incidentes. Un modèle qui estime, entre autres, le déficit de réserve hydrique chaque jour, en tenant compte de facteurs du sol et du peuplement (GRANIER *et al.* 1985) montre que les déficits les plus sévères correspondent effectivement aux années où les précipitations sont les plus faibles. La part de représentation de la disponibilité en eau par les

---

précipitations peut être montrée. Cependant, la modélisation de la croissance radiale du hêtre en Lorraine à partir des données mensuelles d'une part et d'autre part de l'estimation du déficit de réserve indique que cette dernière variable est beaucoup plus explicative (BADEAU 1995). Le pourcentage de variance de l'indice de croissance du hêtre expliqué, par les modèles comportant aussi les températures et l'effet de retard, est respectivement de 50 % et 85% (BADEAU 1995). La modélisation de la croissance à partir des variables mensuelles se fait donc en considérant ces restrictions.

## 2.2 Nombre de régresseurs

Plus le modèle comporte de régresseurs plus celui-ci peut être ajusté aux données (BRIFFA 1987). Le coefficient de calibration est donc croissant lorsque des régresseurs supplémentaires sont ajoutés à un modèle. Cependant, inversement, l'introduction des régresseurs diminue la qualité de la vérification. Lorsque les variables sont corrélées, ou redondantes, la diminution atteint des proportions rapidement importantes. La régression orthogonalisée permet d'éviter cet inconvénient (GUIOT 1981, BRIFFA *et al.* 1983). En théorie, le nombre d'observations disponibles limite le nombre de régresseurs au degré de liberté. Cependant en pratique, on doit toujours chercher à limiter le nombre de régresseurs au minimum nécessaire pour expliquer le phénomène.

Toutefois, il est important de ne pas faire de sélection *a priori* des variables explicatives pour conserver l'indépendance de la démarche. Le nombre de régresseurs considérés de façon usuelle en dendroclimatologie obéit à ces principes. Une période de 12 mois, soit 24 régresseurs dans le cas de températures et précipitations, sont utilisés dans de nombreuses études en région méditerranéenne (NEFAOUI 1996). Cette période couvre les mois d'octobre à décembre de l'année civile antérieure à celle d'élaboration du cerne et les mois de l'année de formation jusqu'en septembre. Elle peut être divisée en deux périodes qui correspondent aux stades phénologiques généraux. D'octobre à mars, la végétation est au repos et le cerne est totalement élaboré entre avril et septembre. Ces stades définis pour la zone méditerranéenne (TESSIER 1984) semblent aussi adaptés à la période de végétation dans la moitié nord de la France. Les mesures d'un indice foliaire pour les Chênes sessile et pédonculé en Lorraine indiquent que la transpiration peut reprendre, selon les années, entre la fin avril et début mai. Toutefois, l'initiation de la croissance radiale est antérieure. La mesure de l'accroissement permet de la situer début avril (BREDA 1994). Les conditions climatiques plus proprement atlantiques ne semblent pas induire de contraintes particulières qui justifieraient un décalage de ces périodes.

L'utilisation de 24 régresseurs reste cependant trop élevée car nous ne disposons que de 41 observations. Il est donc proposé de réaliser des modèles séparés par type de variables. Les 12 mois de température et de précipitations sont confrontés à la croissance séparément. Le principe est étendu aux autres variables disponibles, l'ETP de Penman, le Bilan hydrique potentiel et le niveau d'eau en Grande Brière.

De plus, le fait que la transpiration des chênes débute alors qu'environ 40% de la largeur du cerne est déjà constitué (BREDA 1994), montrent que le Chêne initie sa croissance à partir des réserves accumulées une ou quelques saisons de végétations antérieures. Les conditions climatiques de ces quelques années influent donc sur la croissance en cours. La modélisation de la croissance des Chênes pédonculés et sessiles en Lorraine fait intervenir des variables climatiques décalées respectivement de 5 et 4 années (BECKER *et al.* 1994). Le nombre de régresseurs que représente la prise en compte de tels effets n'est pas envisageable à partir des 41 observations disponibles. Seul un décalage d'une année sera considéré. Les

---

variables climatiques de l'année de végétation antérieure sont confrontées à la croissance également 12 par 12.

L'utilisation du plus grand nombre de régresseurs a pour objectif de conserver un caractère exploratoire à la recherche des corrélations. Les variables sont évidemment redondantes mais en les utilisant toutes, la sélection de celles qui corréleront le plus aura lieu sans a priori.

Les modèles réalisés indépendamment ne peuvent cependant pas être interprétés ensemble. En effet, la variance expliquée par l'un d'eux peut être identique à celle expliquée par un autre. Ceci sera d'autant observé que les variables sont redondantes. Lorsque les variables de ces modèles sont regroupées dans le même, seules les plus corrélées restent explicatives. Il est donc indispensable, après la sélection et la diminution des régresseurs à un nombre en rapport avec les observations, de constituer un modèle regroupant les types de variables.

Les regroupements sont réalisés dans le temps, entre les mois dont les corrélations vont dans le même sens et par type de variables. Si les températures et précipitations sont explicatives et inversement corrélées, la variable synthétique bilan hydrique potentiel est testée.

### *2.3 Standardisation de la croissance*

Les fonctions de réponse obtenues à partir de trois types de données représentant la croissance sont comparées. Les données sont conservées brutes et transformées en pourcentages de variation entre deux cernes consécutifs et en indices résultant d'une modélisation LOWESS de la tendance avec une fenêtre de 10 cernes voisins. Les fonctions de réponse sont présentées pour deux séries moyennes, les chronologies Bri.Moy et Bri.MoyEPS-15. La chronologie complète (Bri.Moy) regroupe les 52 séries individuelles disponibles. On peut se demander si cette moyenne représente au mieux les relations entre les facteurs régionaux et la croissance. A cet effet, les séries individuelles ont été ordonnées en fonction de leur synchronisme avec toutes les autres composantes (cf. II). La chronologie moyenne comportant les 15 séries individuelles les plus corrélées aux autres présente la valeur t de Student la plus élevée avec celle construite pour la forêt de Gâvre (cf. II). Les deux séries étant soumises aux mêmes facteurs régionaux, on peut penser que Bri.moyEPS-15 représente mieux ces influences que la chronologie complète. Elle est constituée de 15 individus, provenant de façon équilibrée de toutes les stations, dont la corrélation moyenne s'élève à 0,46 et l'EPS à 0,93. La chronologie complète est nettement plus dispersée avec une corrélation moyenne de 0,25 et une EPS légèrement supérieure à celle de la moyenne partielle de 0,95.

Le rapport entre la moyenne et l'écart-type du coefficient bootstrap de vérification (RMV) ainsi que les codes des coefficients de régression partiels (cf. annexe 2) sont utilisés pour définir la qualité globale des fonctions de réponse (NEFAOUI 1996) selon la nature des données (tab. 69). Le coefficient de calibration n'est pas apparu pertinent car il est toujours nettement significatif.

Les résultats obtenus avec les deux chronologies moyennes sont similaires (tab. 69). Le nombre de mois significativement corrélés à la croissance est très souvent identique. Le rôle prépondérant des mois de juin et juillet est évident dans les deux cas. Les relations avec les variables en hiver présentent plus de différence selon les moyennes et selon le type de variables dépendantes. Cependant, le rapport RMV est en général supérieur avec la moyenne



partielle. C'est particulièrement le cas des fonctions de réponses établies avec les précipitations et les bilans hydriques potentiels. Le RMV est toutefois plus élevé pour la moyenne complète sous forme d'écart interannuels.

Les données brutes ne permettent pas de déterminer de fonctions de réponse globalement significatives, car la tendance perturbe les comparaisons. De même, aucune fonction significative n'est observée avec l'ETP révélant que la demande climatique en transpiration ne peut être limitante. Par contre, une faible corrélation négative est observée en juillet, correspondant probablement aux années particulièrement chaudes. Ces années sont beaucoup mieux représentées directement par les températures. Les fonctions sont significatives à un seuil de 10% après standardisation en indice ou en écarts interannuels.

Bri.MoyEPS-15.DB	P10	P11	P12	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	RMV
Bri.MoyEPS-15.L10	-2	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	0,59
Bri.MoyEPS-15.V1	.	.	.	.	.	.	.	-1	3	3	.	.	2,27
Bri.MoyEPS-15.V1	.	2	1	.	.	.	.	.	1	3	.	.	1,72
Bri.MoyEPS-15.DB	BHC10	BHC11	BHC12	BHC1	BHC2	BHC3	BHC4	BHC5	BHC6	BHC7	BHC8	BHC9	RMV
Bri.MoyEPS-15.L10	-2	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	0,22
Bri.MoyEPS-15.V1	.	.	.	.	.	.	.	-1	2	3	.	.	2,43
Bri.MoyEPS-15.V1	.	1	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	0,97
Bri.MoyEPS-15.DB	N10	N11	N12	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	RMV
Bri.MoyEPS-15.L10	.	.	.	-1	.	.	.	.	.	3	.	.	2,11
Bri.MoyEPS-15.V1	.	.	.	.	.	.	.	-2	.	2	.	.	1,01
Bri.MoyEPS-15.V1	-2	.	.	1	1	.	.	-2	.	3	3	.	1,93
Bri.MoyEPS-15.DB	ETP10	ETP11	ETP12	ETP1	ETP2	ETP3	ETP4	ETP5	ETP6	ETP7	ETP8	ETP9	RMV
Bri.MoyEPS-15.L10	-1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,00
Bri.MoyEPS-15.V1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-1	.	.	0,10
Bri.MoyEPS-15.V1	.	.	.	-1	.	.	.	.	.	.	.	.	0,27
Bri.MoyEPS-15.DB	T10	T11	T12	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	RMV
Bri.MoyEPS-15.L10	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-2	.	.	0,05
Bri.MoyEPS-15.V1	.	2	1	.	.	.	.	.	.	-3	.	.	1,73
Bri.MoyEPS-15.V1	2	3	1	.	.	.	.	.	.	-3	.	.	1,51
Bri.Moy.DB	P10	P11	P12	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	RMV
Bri.Moy.L10	1	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	0,17
Bri.Moy.V1	.	.	.	2	.	.	.	.	2	3	.	1	1,74
Bri.Moy.V1	.	1	2	.	.	.	.	.	2	2	.	.	2,10
Bri.Moy.DB	BHC10	BHC11	BHC12	BHC1	BHC2	BHC3	BHC4	BHC5	BHC6	BHC7	BHC8	BHC9	RMV
Bri.Moy.L10	-1	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	0,15
Bri.Moy.V1	.	.	.	2	.	.	.	.	2	3	.	.	1,45
Bri.Moy.V1	.	.	1	.	.	-1	.	.	2	1	.	.	1,69
Bri.Moy.DB	N10	N11	N12	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	RMV
Bri.Moy.L10	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	1,53
Bri.Moy.V1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	0,44
Bri.Moy.V1	-3	.	2	.	1	.	.	.	.	1	2	.	1,20
Bri.Moy.DB	ETP10	ETP11	ETP12	ETP1	ETP2	ETP3	ETP4	ETP5	ETP6	ETP7	ETP8	ETP9	RMV
Bri.Moy.L10	-2	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,27
Bri.Moy.V1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-2	.	.	0,00
Bri.Moy.V1	.	.	.	-1	.	.	1	.	.	-1	.	.	0,98
Bri.Moy.DB	T10	T11	T12	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	RMV
Bri.Moy.L10	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-2	.	.	0,09
Bri.Moy.V1	.	2	.	1	.	.	.	.	-1	-3	.	1	1,60
Bri.Moy.V1	2	2	.	1	.	.	.	.	.	-3	-1	.	1,96

Tableau 69 : fonctions de réponse codées, réalisées séparément pour chaque variable, à l'aide des moyennes complète (Bri.Moy) et partielle (Bri.MoyEPS-15). DB : données brutes, L10 : indice LOWESS 10 voisins, V1 : pourcentage de variation interannuel

---

Les fonctions les plus significatives sont observées entre les précipitations, les bilans hydriques et la série d'indices des 15 arbres (tab.69). La valeur de RMV dépasse 2, les fonctions sont donc globalement significatives au seuil de 5%. D'une façon générale, la standardisation en indice à partir de la modélisation LOWESS (10 voisins) permet de dégager la relation entre les variables climatiques et la croissance. Des résultats très similaires quoique moins fiables sont observés avec la variation entre deux cernes consécutifs.

#### *2.4 Fonctions de réponse selon les types dendrologiques*

Les modélisations réalisées à partir des chronologies moyennes représentatives des types dendrologiques confirment les résultats précédents. Les données brutes ne permettent pas de dégager de relations entre les variables climatiques et la croissance alors que les indices et les écarts aboutissent à des résultats très proches.

Le tableau 70 regroupe les résultats obtenus avec les indices. Les variables climatiques sont confrontées à la série dépendante dans la position de l'année de végétation et décalées d'une année.

Les fonctions obtenues sont indépendantes, cependant pour chacune, les conditions du mois de juillet apparaissent les plus liées à la croissance. Les coefficients sont presque tous significatifs quel que soit le type de croissance (tab.70). La relation est directe dans le cas des précipitations, du bilan hydrique et du niveau d'eau et inverse avec la température et l'ETP. Ces variables représentent toutes, de façon indépendante, l'action négative sur la croissance d'une accentuation du déficit hydrique estival, déjà montrée à l'aide des années caractéristiques. Décalées d'une année, ces variables sont également liées à la croissance. Le bilan hydrique suivi des précipitations et des températures présentent la relation la plus forte avec la croissance pour tous les types. Ils permettent très probablement de mieux représenter la disponibilité en eau pour l'arbre en juillet que le niveau d'eau dont les coefficients de corrélations partiels sont peu significatifs. L'ETP également représente mal les contraintes estivales, les fonctions observées n'étant jamais significatives.

Les coefficients de juillet sont parfois doublés de ceux de juin, qui présentent toujours le même sens de corrélation.

En mai, la relation est significative uniquement avec la série du type 3. Les précipitations et le bilan hydrique sont inversement corrélés à la croissance avec un seuil de 10%. Une relation directe entre l'ETP en avril et la série du type 2 est la seule à dépasser ce seuil pour ce mois. Les conditions du printemps n'affectent donc pas de façon aussi sévère que celles de l'été les arbres. Toutefois, le niveau d'eau, les précipitations et le bilan hydrique corréleront inversement avec la croissance moyenne.

Des corrélations significatives sont observées pour plusieurs variables et plusieurs mois dispersés pendant la période de repos. La majorité est directe, qu'il s'agisse de précipitations ou de températures.

C'est également le cas pour les températures et les précipitations d'août et septembre, exception faite pour le type dendrologique 3 (tab. 70).

Ces fonctions sont construites indépendamment, et les variables sont éminemment redondantes, plusieurs expliquent donc la même variance des indices de croissance. Il apparaît toutefois, que le bilan hydrique d'une part, suivi des précipitations et des

températures d'autre part sont les variables les plus corrélées. De plus, un découpage dans le temps peut être proposé. Les variables semblent avoir une action homogène, quoique pas toujours significative, sur la croissance pendant la phase de repos d'octobre à mars, puis au printemps, en avril - mai, en été de juin à juillet et en fin de saison, d'août à septembre.

ETP Penman	ETP10	ETP11	ETP12	ETP1	ETP2	ETP3	ETP4	ETP5	ETP6	ETP7	ETP8	ETP9
type1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
type2	-1	.	1	.	-1	.	1	.	-2	-1	.	.
type3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-1	.	.
Bri.Moy	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-1	.	.
	1ETP10	1ETP11	1ETP12	1ETP1	1ETP2	1ETP3	1ETP4	1ETP5	1ETP6	1ETP7	1ETP8	1ETP9
type1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-1	.	.
type2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-3	.	.
type3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-2	.	.
Bri.Moy	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-2	.	.

bilan hydrique	BHC10	BHC11	BHC12	BHC1	BHC2	BHC3	BHC4	BHC5	BHC6	BHC7	BHC8	BHC9
type1	.	1	.	1	.	.	.	.	.	3	.	.
type2	.	1	.	2	.	.	.	.	3	1	.	.
type3	-2	.	.	.	.	1	.	-1	2	3	-2	.
Bri.Moy	.	.	.	.	.	.	.	-1	2	3	.	.
	1BHC10	1BHC11	1BHC12	1BHC1	1BHC2	1BHC3	1BHC4	1BHC5	1BHC6	1BHC7	1BHC8	1BHC9
type1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	3	.	.
type2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.
type3	.	.	.	.	.	2	.	.	.	3	.	1
Bri.Moy	.	.	.	.	.	.	.	.	.	3	.	.

températures	T10	T11	T12	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
type1	.	2	.	1	.	.	.	.	.	-2	.	.
type2	.	.	.	1	.	-1	.	.	-1	-3	.	1
type3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-1	.	.
Bri.Moy	.	2	1	.	.	.	.	.	.	-3	.	.
	1T10	1T11	1T12	1T1	1T2	1T3	1T4	1T5	1T6	1T7	1T8	1T9
type1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-2	.	1
type2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-2	.	2
type3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-2	.	.
Bri.Moy	.	1	.	.	.	.	.	.	.	-3	.	.

précipitation	P10	P11	P12	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
type1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.
type2	.	1	.	2	.	.	.	.	3	2	.	.
type3	.	.	.	.	.	1	.	-1	2	2	-2	1
Bri.Moy	.	.	.	.	.	.	.	-1	3	3	.	.
	1P10	1P11	1P12	1P1	1P2	1P3	1P4	1P5	1P6	1P7	1P8	1P9
type1	.	.	.	.	.	1	.	.	.	2	.	1
type2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.
type3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	1
Bri.Moy	.	.	.	.	.	.	.	.	.	3	.	.

niveau d'eau	N10	N11	N12	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
type1	.	.	.	.	1	.	.	.	.	2	.	.
type2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.
type3	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.
Bri.Moy	.	.	.	.	.	.	.	-2	.	2	.	.
	1N10	1N11	1N12	1N1	1N2	1N3	1N4	1N5	1N6	1N7	1N8	1N9
type1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.
type2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
type3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Bri.Moy	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.

Tableau 70 : Fonctions de réponse codées par type dendrologique, établies séparément par variable. 1VariableMois : variables décalée d'une année de végétation.

## 2.5 Regroupement des variables

Les variables sont donc cumulées pour les regrouper sur les 4 périodes précédemment définies. En utilisant les précipitations et les températures, le nombre de régresseurs est alors réduit à 8. Ce nombre peut être considéré en rapport avec les 41 observations disponibles. Ces variables ont une action respectivement directe et inverse sur la croissance en juin - juillet. Or le coefficient de corrélation qui les unit est de -0,3. Pour éviter une redondance, précipitations et températures peuvent être unifiées en utilisant le bilan hydrique potentiel. De même, on peut se demander si le niveau en Grande Brière est une bonne représentation du déficit hydrique estival. L'influence sur les fonctions de réponse du choix des variables est estimée par les coefficients partiels et leur signification ainsi que par la qualité globale de la fonction. Pour déterminer cette qualité, deux paramètres sont utilisés. Le rapport RVM du coefficient bootstrap de vérification, et le rapport de la variance des observations et des estimations issues du modèle pour toute la période disponible. Ce calcul, proche du rapport de Pearson, inclut donc les années utilisées pour la calibration et pour la vérification.

	P6-7		T6-7	
	r partiel	r rapport	r partiel	r rapport
Type 1	0.407	3.83	-0.199	-1.31
Type 2	0.476	4.72	-0.354	-3.32
Type 3	0.386	3.74	-0.110	-0.92
moy.EPS-15	0.524	6.91	-0.343	-3.03

	BHC6-7	
	r partiel	r rapport
Type 1	0.448	3.32
Type 2	0.535	4.30
Type 3	0.419	2.99
moy.EPS-15	0.575	5.87

Tableau 71 : coefficient bootstrap de corrélation partiel et rapport moyenne sur écart-type des températures, des précipitations et du bilan hydrique potentiel dans les fonctions de réponse : 8 facteurs T+P et 7 facteurs T+P+ BHC6-7.

	A		8 régresseurs : T+P	
	RVM	RVO/M (%)	RVM	RVO/M (%)
Type 1	1,76	42,6		
Type 2	2,77	44,3		
Type 3	1,9	41,1		
moy.EPS-15	3,72	57,7		

	B		7 régresseurs : T+P+BHC6-7	
	RVM	RVO/M (%)	RVM	RVO/M (%)
Type 1	1,54	39,9		
Type 2	1,6	32,9		
Type 3	1,7	34,8		
moy.EPS-15	1,93	46		

	C		8 régresseurs : T+Niv	
	RVM	RVO/M (%)	RVM	RVO/M (%)
Type 1	2,14	40,1		
Type 2	0,38	-		
Type 3	0,1	-		
moy.EPS-15	2,14	41,5		

	D		
	RVM	RVO/M (%)	Nb facteurs
Type 1	1,81	43,7	4
Type 2	2,55	33,9	2
Type 3	1,77	43,6	4
moy.EPS-15	2,69	49,9	4

	E		
	RVM	RVO/M (%)	Nb facteurs
Type 1	1,97	43,3	5
Type 2	3,29	43	3
Type 3	2,25	41,7	5
moy.EPS-15	7,31	59,5	5

Tableau 72 : comparaison de la signification globale des fonctions de réponse selon les variables utilisées comme régresseurs. RVM : rapport de la moyenne et de l'écart-type du coefficient bootstrap de vérification. RVO/M : rapport de la variance des observations et de celle des estimations. Gras : modèle, par type dendrologique, permettant la reconstruction de la plus grande part de variance des observations.

Les coefficients partiels moyens sont plus élevés entre la variable synthétique et les séries, quel que soit le type dendrologique mais ils sont moins fiables que ceux observés avec les précipitations (tab. 71). Le remplacement de T6-7 et P6-7 par BHC6-7 induit une baisse de la qualité globale des fonctions de réponse assez nette si tous les régresseurs sont conservés (tab. 72A et B). La perte de la signification est observable par la baisse de RVM. Elle est corroborée par celle de la capacité d'estimation des observations. Parmi ces régresseurs, selon les types dendrologiques, certains ne sont pas significativement liés à la croissance (cf. infra). Lorsqu'ils sont retirés du modèle, la signification des fonctions et la qualité de reconstruction augmente. Les valeurs les plus élevés, donc les modèles les plus représentatifs, sont observées pour deux types dendrologiques (types 1 et 3) en utilisant le bilan hydrique, pour la moyenne avec uniquement les précipitations et températures significatives et pour le type deux en considérant les 8 régresseurs (tab. 72).

Le bilan hydrique potentiel est corrélé aux températures ( $r=-0,51$ ) et aux précipitations ( $r=0,93$ ) en juin - juillet. Il permet probablement de mieux représenter la disponibilité en eau durant la période de déficit que les températures et précipitations. Toutefois, selon les séries dépendantes ces dernières permettent de mieux estimer la croissance. Le niveau d'eau en Grande Brière ne permet pas de mieux représenter les conditions climatiques estivales. Les fonctions de réponse ne sont significatives que pour la moyenne et le type dendrologique 1.

Dans tous les cas considérés, la signification des fonctions de réponse reste supérieure au seuil de 10% et le pourcentage de variance reconstruite évolue entre 32,9 et 59,5. Les valeurs les plus basses sont observées avec le type 2 (tab. 72). Les modèles les plus représentatifs par type dendrologique permettent d'expliquer entre 43,6 et 59,5% de la variance initiale. Ces valeurs sont comparables à celles obtenues par d'autres auteurs dans des conditions voisines. C'est le cas des fonctions de réponses établies dans les îles Britanniques (JONES *et al.* 1984, BRIFFA *et al.* 1986, PILCHER *et al.* 1996).

Les relations entre la croissance et les variables climatiques représentatives de l'année de végétation antérieure sont apparues significatives lorsqu'elles sont calculées de façon indépendante de celles de l'année en cours. Les tentatives d'associer les deux types de variables dans les mêmes fonctions ont échoué. Les variables décalées perdent toute relation avec la croissance. Il est donc probable que celles-ci expliquaient dans les fonctions séparées une variance de la croissance qui se trouve déjà expliquée par les conditions de l'année en cours. Ceci tient probablement à l'autocorrélation toujours présente dans les séries d'indices.

Pour juger de l'influence de la croissance de l'année précédente dans la fonction de réponse, l'indice décalé d'une année a été introduit comme régresseur (FRITTS 1976).

		T10-3	T4-5	T6-7	T8-9	P10-3	P4-5	P6-7	P8-9	TD1-1	cal	ver
type 1	coeff	0.16	0.01	-0.17	0.09	0.26	0.10	0.37	0.17	-0.11	0.72	0.41
	rapport	1.44	0.09	-1.40	0.62	1.57	1.35	3.27	1.16	-0.73	15.63	1.60
		T10-3	T4-5	T6-7	T8-9	P10-3	P4-5	P6-7	P8-9	TD2-1	cal	ver
type 2	coeff	-0.01	0.17	-0.34	0.09	-0.02	0.01	0.50	0.10	-0.04	0.73	0.44
	rapport	-0.04	1.62	-3.61	0.89	-0.11	0.11	5.97	0.83	-0.28	17.50	3.01
		T10-3	T4-5	T6-7	T8-9	P10-3	P4-5	P6-7	P8-9	TD3-1	cal	ver
type3	coeff	0.14	-0.22	-0.08	0.14	-0.09	-0.33	0.37	0.08	-0.06	0.71	0.32
	rapport	1.00	-1.76	-0.67	1.01	-0.49	-2.73	3.29	0.67	-0.41	10.27	1.16
		T10-3	T4-5	T6-7	T8-9	P10-3	P4-5	P6-7	P8-9	MOY-1	cal	ver
moyEPS-15	coeff	0.15	0.11	-0.32	0.11	0.02	-0.13	0.52	0.18	-0.06	0.82	0.61
	rapport	1.38	0.87	-3.03	0.99	0.19	-1.67	7.41	1.31	-0.45	23.42	4.26

Tableau 73 : fonctions de réponse pour les différents types dendrologiques tenant compte de l'indice de l'année antérieure à la formation du cerne (encadré gras)

Le coefficient de corrélation partiel s'élève au plus à -0,11 dans le cas du type dendrologique 1. Il n'est jamais significatif au seuil de 10%. La qualité globale des fonctions est améliorée uniquement pour le type 2. Ces résultats tendent donc à montrer que la croissance de l'année antérieure n'interfère pas dans la relation entre le climat et les cernes. Toutefois, ceux-ci sont probablement très dépendant de la méthode de standardisation utilisée. L'objectif de cette analyse étant de déterminer la part relative des influences sur la croissance des facteurs climatique principaux et de déterminer si des différences peuvent être observées en fonction de l'avancement dans le marais, une seule standardisation a été testée.

## 2.6 Fonctions de réponse par type dendrologique après regroupement des variables

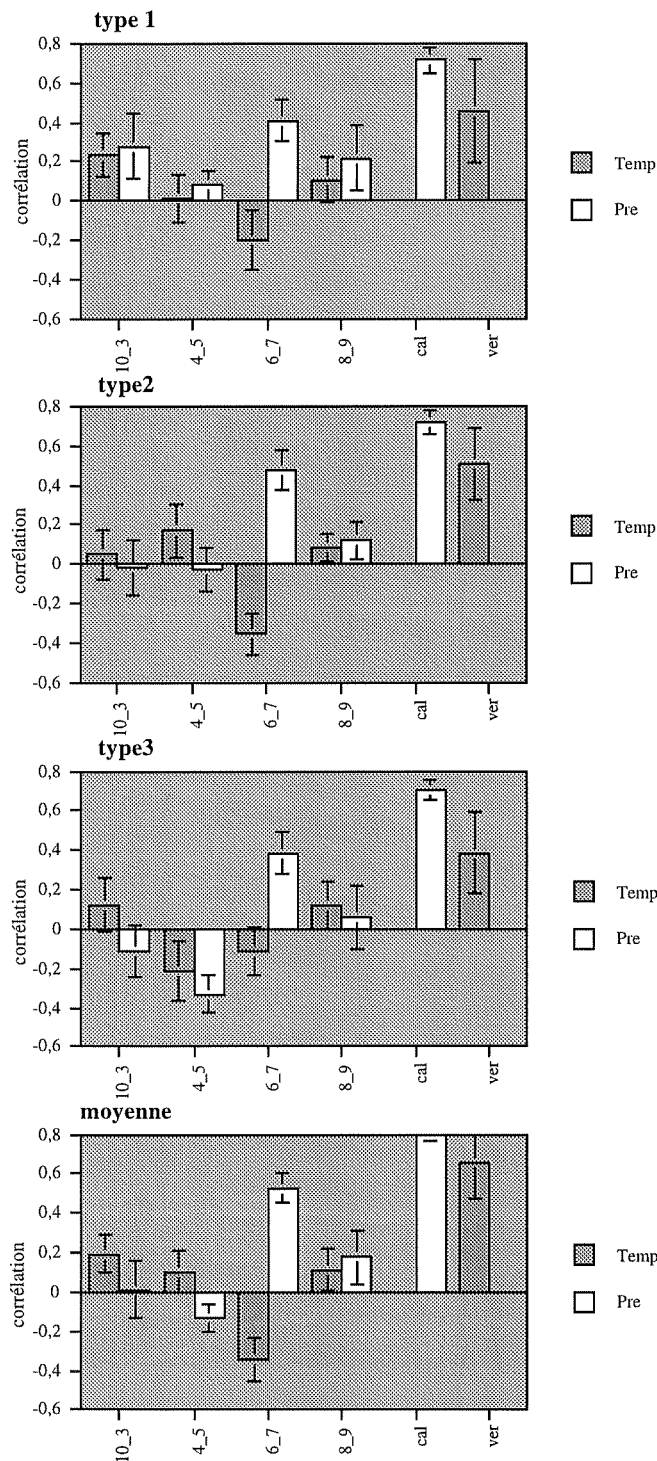


Figure 199 : fonctions de réponse selon les types dendrologique obtenues pour 8 facteurs T+P.

Les fonctions de réponse réalisées à partir des températures et précipitations sont comparées par type de milieu (fig. 199).

Pour les trois types, les précipitations de juin - juillet sont les plus corrélées à la croissance. Les températures sont également inversement corrélées mais non significativement pour le type 3. La réponse étant homogène, les liens de ces variables avec la série moyenne sont très significatifs. L'établissement des fonctions de réponse confirme que l'accentuation du déficit hydrique estival est le facteur climatique le plus préjudiciable à la croissance quel que soit le type de milieu.

La série représentative des arbres du type 2 est celle qui présente la relation avec le bilan hydrique potentiel, les précipitations et les températures la plus forte. Inversement, les autres variables, sauf les températures d'avril - mai, sont moins corrélées avec cette série. Il semble donc que ces arbres dépendent plus directement de la ressource en eau en été. On peut supposer que le système racinaire de ces arbres subit une contrainte liée à l'hydromorphie. Des gaines d'oxydation racinaire ont d'ailleurs été observées. L'enracinement est donc probablement plus superficiel que celui des arbres du type 1. Les arbres du type 3, plus avancés dans le marais, peuvent probablement bénéficier de

---

remontées phréatiques. Même si la contrainte à l'enracinement est beaucoup plus forte et le système racinaire plus superficiel, ces arbres sont moins affectés par la sécheresse.

Les conditions du printemps présentent un lien avec la croissance des arbres du type 2 et ceux du type 3. La relation est directe avec les températures dans le cas du type 2. Le démarrage précoce de la saison de végétation semble favorable à cette population. Par contre, des températures et des précipitations élevées sont en rapport avec la formation de cernes étroits lorsque les arbres sont avancés dans le marais. Le coefficient partiel moyen et sa signification observés entre P4-5 et la série du type 3 s'élèvent à -0,33 et -3,50, alors que les valeurs observées avec P6-7 sont de 0,39 et 3,74. La croissance de ces arbres semble donc dépendre, de façon assez similaire, des conditions printanières et estivales. Les précipitations abondantes en avril - mai signifient probablement que la nappe est élevée alors que la saison de végétation s'amorce. Le niveau d'eau en Grande Brière reste haut, ce qui tend à montrer que les sols restent particulièrement engorgés. Cependant, la série de niveau n'est pas en relation avec la croissance. La croissance des autres types dendrologiques ne présentent pas de relation, ou une relation directe, avec les conditions printanières. Il est donc très probable que les précipitations et la température ont une action négative sur la croissance uniquement dans des conditions d'hydromorphie très prononcées et il apparaît donc probable que, dans ces conditions, l'engorgement du sol est préjudiciable au développement racinaire nécessaire au démarrage de la croissance.

Les conditions durant la période de repos sont en relation avec la croissance des arbres du type 1. Les températures et précipitations sont directement corrélées à la série. L'utilisation des températures moyennes induit très probablement une mauvaise représentation de l'influence de cette variable en hiver. La relation observée tend toutefois à indiquer un rôle négatif de températures froides (corrélations directes). Les précipitations sont directement corrélées à la température. Le passage des dépressions atlantiques s'accompagne d'une remontée des températures alors que les situations anticycloniques sont froides et sèches. Ces dernières conditions sont défavorables à la croissance peut-être en relation avec la reconstitution de la réserve utile du sol.

De même que précédemment, les conditions de la fin de saison de végétation sont en relation avec la croissance des arbres du type 1. Seules les précipitations sont significativement corrélées. Elles permettraient de combler une part du déficit hydrique estival. Les températures sont corrélées, quoique de façon non significative, dans le même sens, ce qui indique peut-être que la croissance peut perdurer lorsque l'eau du sol et la température sont suffisantes.

---

## IV Conclusion

Les arbres qui colonisent actuellement les sols tourbeux proches des îles et de la limite des marais sont dans une situation qui présente des points communs avec celle des mortas vers 1000 av. J.-C. Certains individus se développent sur des sols où l'horizon tourbeux dépasse 1,5 m. L'hydromorphie est alors une contrainte importante à l'enracinement. Toutefois, le lot d'arbres vivants ne présente pas les mêmes garanties statistiques que celui de l'âge du Bronze. Les arbres sont jeunes et se développent dans des formations récentes qui ne sont pas encore stables. En conséquence, les séries comportent un nombre de cernes limite pour toutes investigations dendrochronologiques. Toutefois, il peut être dégagé des relations significatives entre la croissance de ces jeunes arbres et celle de chênes provenant d'une forêt voisine (FD de Gavre), ainsi qu'avec des variables climatiques. Ils sont donc au moins partiellement sensibles à des facteurs régionaux. La procédure d'homogénéisation des chronologies moyennes, utilisée pour dater les séries de l'âge du Bronze, permet d'améliorer la qualité du synchronisme entre les largeurs de cernes des arbres de Brière et de la forêt de Gavre. Également, la fonction de réponse obtenue avec 15 arbres sélectionnés par cette procédure présente une signification équivalente à celle observée pour les 52 séries disponibles.

La jeunesse des formations se traduit pas une forte influence de la compétition interindividuelle sur la production. La courbe d'âge, ou loi de sénescence, qui a pu être obtenue met nettement en évidence cette caractéristique. Elle présente des variations qui sont liées avec la gestion sylvicole. La gestion proprement dite de ces peuplements faisant défaut, la loi de sénescence peut être considérée comme représentative d'un peuplement qui colonise très rapidement un espace libre dans lequel seule la compétition interindividuelle est un vecteur de sélection. Cette évolution pourra probablement être comparée à des séries anciennes et permettre de faire des hypothèses quant à des techniques de gestion passées.

Les stations analysées peuvent être ordonnées par des caractéristiques mésologiques et floristiques. Les relevés de variables du milieu et de la végétation montrent qu'elles sont plus ou moins influencées par l'hydromorphie du sol. Les types de fonctionnements concernés sont très contrastés le long d'un transect partant de l'île vers le marais. Les largeurs de cernes, considérées également comme descriptives des conditions de milieu, permettent aussi d'ordonner les stations. Il existe des points communs entre les trois descriptions obtenues. Les trois tableaux de variables présentent une co-structure et seraient autant d'images des facteurs du milieu. Des chronologies de largeurs de cernes ont donc été constituées en fonction de types de stations plus ou moins influencés par l'hydromorphie.

Les variables climatiques indiquent que le déficit hydrique potentiel estival est relativement élevé en Brière. Le déficit cumulé, d'environ 300 mm, ne peut pas être recouvert par la réserve en eau d'un sol type. On peut même penser que les besoins en eau de la végétation en été sont assez élevés. Les précipitations excédentaires en automne - hiver et déficitaires au printemps - été induisent un cycle annuel de la hauteur de la nappe dans les marais. Le niveau d'eau enregistré en Grande Brière présente un lien direct avec les précipitations. L'altitude d'étiage en septembre est directement liée au bilan hydrique précédent, de mai à août et celle de crue, arrivant en moyenne en février, est fonction des précipitations depuis le mois d'octobre. Ces variations se répercutent sur les sols hydromorphes prospectés. Les zones échantillonnées sont inondées en hiver et, en juillet, la nappe a été observée à 35 cm de profondeur dans la station la plus tourbeuse.

La relation entre la largeur et les variables climatiques et de variation du niveau



---

d'eau en Grande Brière met en évidence, par deux méthodes (les années caractéristiques et la fonction de réponse), le rôle prépondérant du déficit hydrique estival dans l'élaboration du cerne. Les années caractéristiques négatives correspondent à des déficits marqués et les (années caractéristiques) positives à des excédents de précipitations. De même, la relation entre la largeur de cerne et les précipitations ou le bilan hydrique potentiel est directe et elle est inverse avec la température. L'influence de ce facteur est la plus nette pour toutes les variables et tous les types de station en juillet. On peut penser qu'elle est liée au caractère relativement déficitaire en été du climat régional. Les arbres les plus avancés sur les sols tourbeux (type 3) semblent, relativement aux autres, moins affectés par le déficit estival. On peut être surpris de ce résultat car la contrainte à l'enracinement de ces individus est forte. Celle-ci se traduit par une influence négative des précipitations et de la température au printemps. Une altitude particulièrement élevée du niveau d'eau en Grande Brière aux mois de mai - juin correspond à un cerne mince caractéristique pour les arbres du type 3. De même, uniquement pour ces arbres, la relation entre la largeur de cerne et les précipitations, ainsi que les températures, d'avril - mai est inverse. Ces arbres semblent coloniser un espace dans le sol qui leur permet de bénéficier d'apports phréatiques certains étés mais qui les expose à une asphyxie racinaire lors de printemps humides ou précoces. Cette relation est liée au type de station elle peut donc être rapprochée du caractère hydromorphe des sols.

Il apparaît donc que la croissance des arbres, qui sont dans la situation la plus proche de ceux qui vivaient en Brière vers 1000 av. J.-C., est affectée par les excédents de précipitations au printemps et un niveau de nappe élevé correspondant. Par contre, les précipitations ont une influence positive sur la largeur du cerne, y compris celle des arbres avancés sur la tourbe, lorsqu'elles arrivent en été pour combler une part du déficit potentiel qui est un caractère régional du climat. L'analyse dendroécologique des jeunes arbres de Brière tend donc à montrer que c'est au printemps, lorsque le développement des racines est indispensable pour assurer l'absorption d'eau, que les arbres sur les sols tourbeux sont sensibles à l'asphyxie racinaire.

Il reste cependant délicat de faire une transposition dans le temps de ces résultats. En effet, ils sont directement dépendants de l'existence, dans la période d'étude, des phénomènes enregistrés. Par exemple, les précipitations sont bénéfiques en été mais il reste probable que si elles atteignent un niveau exceptionnellement élevé, qui n'aurait pas été observé dans la série analysée, elles peuvent avoir une influence inverse.



## Partie 4

# Évolution du peuplement de Chêne et applications paléo-écologiques



---

## 1 Contextes des découvertes de troncs de Chêne

### 1.1 Peuplements de chêne sur sols tourbeux

Des restes de chêne ont été découverts dans des situations analogues de celle des marais de Brière principalement en Irlande et en Basse Saxe.

#### 1.1.1 Découvertes dans les îles britanniques

Le laboratoire de Belfast a exploité plus de 4000 échantillons de Chêne découverts dans des tourbières d'Irlande et d'Angleterre pour construire une ultra - longue chronologie s'étendant de -5289 à -200 av. J.-C. (BROWN *et al.* 1986). Bien que peu d'analyses palynologiques aient été conduites en parallèle avec les prélèvements dendrochronologiques, il apparaît que les troncs de Chêne sont découverts alors que les pollens indiquent une formation forestière dense (AP>90%) d'aulnes et de chênes (PILCHER 1990). Ce peuplement se trouve dans une succession qui peut être généralisée pour plusieurs tourbières d'Irlande. Il fait suite à une formation forestière dominée par l'Aulne. La phase à chênes est suivie d'une augmentation des pollens de *Betula* puis tous les pollens arboréens diminuent alors que ceux des *Phragmites*, des éricacées et les spores des Bryophytes dont *Sphagnum* augmentent et dominent les diagrammes (PILCHER 1990, PILCHER *et al.* 1996). L'état forestier disparaît alors au profit d'un marais. Il est donc probable que les chênes disparaissent suite à l'augmentation de l'acidité du milieu. Le Chêne peuple la tourbière une seule fois et semble inclus dans la séquence de peuplements conduisant d'une étendue d'eau ouverte à un bas marais (*fen*), puis vers une tourbière bombée (*raised bog*) ou couvrante (*blanket bog*) (PILCHER 1990). Les lacs laissés par la période de déglaciation évolueraient en majorité selon ce schéma, ce qui expliquerait que les chênes subfossiles ne sont pas découverts après 200 av. J.-C et avant -5500. Aucun marais ne présenterait, en dehors de ces dates, les conditions nécessaires au développement du Chêne alors que les enregistrements polliniques montrent qu'il est effectivement présent dans la région (PILCHER *et al.* 1996). Les sites archéologiques ont d'ailleurs fourni le matériel qui complète les références dendrochronologiques des îles britanniques.

Toutefois, dans d'autres tourbières, plusieurs niveaux de chênes sont repérés et, dans certains cas, les chênes représentent une chronologie très longue pouvant dépasser un millénaire. Dans ces cas, les chênaies ne peuvent être considérées comme un stade évolutif. PILCHER (1990) propose deux voies pour expliquer la pérennité du Chêne. La fraction minérale dans la tourbe (où il est découvert) reste toujours suffisante pour autoriser sa croissance et ne pas induire l'acidification du marais. Ces bassins reçoivent des minéraux par inondations. Autre hypothèse, les peuplements sont en fait en mosaïque et seules des lentilles ou les limites du marais restent suffisamment riches en minéraux. Des formations linéaires du même type sont envisagées par SHENNAN (1986) pour le marais de Fenland (GB) où l'alimentation en minéraux est également liée à l'ouverture sur la mer (cf. partie 1 chap. 2, fig. 24).

#### 1.1.2 Découvertes en Basse Saxe (D)

De même en Basse Saxe (LEUSCHNER et DELORME 1988) et aux Pays-Bas (JANSMA 1995) les dendrochronologues ont construit de très longues chronologies à partir de matériel analogue à celui trouvé en Brière. Les analyses palynologiques, sédimentologiques et dendrochronologiques permettent de décrire le contexte des découvertes de ces troncs (LEUSCHNER *et al.* 1987, LEUSCHNER 1992). Les glaciations anciennes (antérieures au Würm) ont laissé, en Basse Saxe, de nombreux dépôts sableux qui sont colonisés par le Chêne et le Bouleau au début de l'Holocène. En fonction de la topographie, cette végétation présente

une variation en faveur de l'Aulne et du Bouleau dans les points bas (LEUSCHNER *et al.* 1987). Des marais (*fen*) se sont développés dans ces zones à partir du Boréal et plus intensément à l'Atlantique. A cette période, les conditions climatiques plus humides, en accord avec l'augmentation du niveau marin qui induit un engorgement des sols de basse altitude, sont favorables au développement d'une formation dominée par l'Aulne en présence de Bouleau nommée *Alder carr* ou tourbière émergée (LEUSCHNER *et al.* 1987). Les courbes polliniques régionales sont donc caractérisées par l'augmentation des pollens d'Aulne à l'Atlantique. La croissance de la tourbe dans ces marais est assez lente et permet l'état boisé. Elle est en fait variable selon l'humidité du sol et, lors des périodes d'assèchement, les chênes colonisent la tourbière à partir de zones refuges plus élevées. Certaines tourbières boisées, ou zones particulières, évoluent vers une tourbière bombée mais l'acidification ne prend pas un caractère général comme dans les îles Britanniques. L'action du climat explique probablement la pérennité des tourbières boisées en Basse Saxe. Ceci se traduit par la limite récente de la chronologie construite par le laboratoire de Göttingen : 928 après J.-C (LEUSCHNER 1992). A partir du Haut Moyen Age, des tourbières sont défrichées en prairie humide ou mises en culture puis elles sont reboisées au 19e siècle avec du pin (*Pinus sylvestris*), si bien qu'il n'existe plus actuellement de véritable analogue de la végétation naturelle (LEUSCHNER *et al.* 1987). L'apparition des chênes sur les tourbières date de 6200 av. J.-C. est serait antérieure à celle des îles Britanniques, mais les chênes les plus anciens, datés par dendrochronologie, sont découverts dans les dépôts alluviaux des bassins du Main, du Rhin et du Danube, vers 7197 pour la chronologie de Göttingen, 7237 pour celle de Stuttgart (LEUSCHNER 1992) (cette dernière est extensible vers -8400 cf. partie 2 chap. 2). Il est probable que les sols alluviaux ont été colonisés dès le début du développement du Chêne après la déglaciation alors que les zones tourbeuses ont du s'édifier et s'assécher relativement avant de permettre son apparition.

### 1.2 La seconde génération de troncs en Brière

Le contexte général de découverte des troncs en Brière a été décrit dans le second chapitre de la partie 1 et leur localisation précise est présentée en tête du chapitre 3 de la partie 2.



Les troncs de Chêne, attribués à la seconde génération (cf. partie 1), sont découverts proches de la surface jusqu'à une profondeur de 0,6 m. Leur répartition spatiale dans les marais ne fait pas l'objet de publication. Cependant, des zones d'exploitations anciennes (VINCE 1965) sont connues. C'est le cas du lieu de prélèvement à Cabéno (cf. partie 2).

Figure 200 : arbres en coupe dans la berge du Brivet à la hauteur d'Ile Clidan

En septembre 1995, le bas niveau du Brivet nous a permis d'observer que localement les troncs peuvent être particulièrement nombreux (fig. 200). Un arbre de diamètre supérieur à 30 cm pouvait être observé environ tous les 10 m en coupe dans la berge à la hauteur d'Ile Clidan.

De même, les travaux pour réaliser un petit étang d'une surface d'environ 5 ares (par Mr Moillon) nous ont permis d'obtenir 15 échantillons (IDE 3). La densité qui peut être extrapolée s'élève à 300 individus de 20 à 50 cm de diamètre par hectare. Les arbres ne sont pas strictement contemporains, et les variations latérales peuvent être très rapides. Cette densité (LANIER *et al.* 1994) montre que la formation atteint très probablement un stade forestier. Toutefois, plusieurs indices (cf. *infra*) observables dans la croissance indiquent que la forêt reste, au moins localement, assez ouverte.

Les arbres découverts sont très probablement localisés sur le lieu de leur vie. En effet, les variations d'altitudes dans le bassin du Brivet, dont l'ampleur ne dépasse pas quelques mètres, ne permettent pas facilement le transport de troncs atteignant assez fréquemment 50 cm de diamètre. Plusieurs individus présentent des départs de branches et une partie du collet qui sont peu compatibles avec un transport. La sédimentation est tourbeuse antérieurement et postérieurement au dépôt, elle indique donc un milieu qui ne peut être que temporairement recouvert d'eau. Enfin deux souches enracinées ont été observées sur la zone de prélèvement IDE4 (fig. 201). Ces arbres n'ont pas pu être échantillonnés car la hauteur de conservation se limite au collet et les cernes étaient trop déformés. Leur position stratigraphique les rattache cependant à la seconde génération. La profondeur des départs de racines, 30 cm, et un sondage à la tarière pédologique, indiquent précisément que ces deux arbres se sont développés sur un sol tourbeux actuellement épais de 1,6 m. Cette profondeur sous-estime probablement les conditions à l'âge du Bronze car la tourbe se compacte sous son propre poids (PRIGENT 1977).



Figure 201 : souche découverte enracinée à Ile d'Errand (IDE4)

### 1.3 Information paléo-écologique

#### 1.3.1 Présence des troncs

L'information paléo-écologique apportée par les chênes découverts dans les zones tourbeuses est de deux natures : leur présence suppose que les conditions propres au développement de l'espèce (l'autécologie) sont en partie réunies et la largeur des cernes présente des caractéristiques qui sont particulières à ce type de matériel.

*Quercus robur* et *Quercus petraea* ne peuvent être identifiés au rang de l'espèce à l'aide de l'anatomie de leur bois et de leur pollen. Les caractères proposés (largeur de la zone initiale, largeur des rayons, croissance moyenne...) (WALKER 1978) ne sont pas applicables

---

pour des arbres de milieux variés (ou extrêmes comme en Brière) et provenant d'une aire éloignée de la zone de définition des caractères (Grande Bretagne). Les deux espèces doivent donc être confondues. En confondant les caractéristiques autécologiques de *Quercus robur* et *petraea*, le Chêne est un taxon ubiquiste, à très large amplitude (RAMEAU *et al.* 1989). De plus, si l'on se replace dans le contexte des découvertes, les classifications de la végétation actuelle ne proposent pas de peuplement clairement équivalent. Les chênes sont observés sur les sols hydromorphes, plutôt désaturés, toujours organo-minéraux (tendance hydromorphe du *Quercion robori-petraeae*), ou dans les forêts ripicoles assez stables (*Alno-Padion*), mais les sols tourbeux restent typiques des Aulnaies, Aulnaies-Boulaies pubescentes (*Alnion glutinosae*) ou le chêne ne peut avoir qu'une participation mineure.

### 1.3.2 Largeur de cerne

La largeur ne peut être considérée comme directement représentative de conditions climatiques, ou de la présence d'une nappe dans le sol. Cependant les chênes découverts dans des contextes tourbeux présentent systématiquement des séquences de cernes minces qui peuvent être reliées à des conditions de croissance extrêmes (PILCHER 1996, LEUSCHNER 1992). Sur la base d'arguments sédimentologiques et palynologiques (LEUSCHNER 1992) ou en comparant la croissance des chênes à celles de pins (PILCHER 1996) les dendrochronologues émettent l'hypothèse que ces séquences de cernes minces sont liées à un engorgement du sol qui induit une asphyxie racinaire. Nous avons pu ajouter à ces arguments une analyse dendroécologique des jeunes chênes se développant actuellement sur la tourbe en Brière (cf. partie 3). La qualité du matériel, l'âge des arbres et l'aspect récent et anthropique de la colonisation font que ces chênes ne sont pas de parfaits analogues de ceux datés de l'âge du Bronze. Toutefois cette analyse montre que les précipitations printanières (des mois d'avril et mai) en excès sont préjudiciables à la croissance des chênes sur les sols les plus tourbeux. Par ailleurs, ces arbres restent également particulièrement sensibles au déficit hydrique estival. Ceci renforce l'idée que la croissance est la synthèse de l'influence de nombreux facteurs dont il faut se garder de faire une interprétation trop simpliste. Le peuplement ancien de Brière disparaissant sous l'influence d'une remontée du niveau d'eau, comme le montre la sédimentologie et la palynologie, on peut supposer que les pertes de croissance les plus significatives sont en rapport avec ce facteur.

## 2 Abondance des chênes

### 2.1 Couverture de Brière M28 et Brière Ref3

Le nombre d'individus datés en fonction du temps (couverture) peut être utilisé pour représenter les variations de l'abondance des chênes dans le peuplement si des arguments permettent de penser que l'échantillonnage est effectivement représentatif. Les méthodes de prélèvement et les comparaisons des couvertures obtenues pour des sous-ensembles tendent à montrer que c'est le cas. La distribution, dans le temps et dans l'espace, des individus conservés *in situ* semble, d'une façon générale, assez aléatoire. PILCHER *et al.* (1996) montrent que répéter les prélèvements dans une zone similaire d'approvisionnement conduit à des chronologies dont l'étendue dans le temps et la couverture sont similaires. L'abondance des individus n'est donc pas uniquement fonction des conditions d'échantillonnage et représente des caractères propres des peuplements (LEUSCHNER *et al.* 1987, PILCHER 1990, PILCHER *et al.* 1996).



Les chênes analysés en Brière sont découverts in situ. La prospection sur le terrain n'est pas exhaustive, elle est orientée par l'accès au marais et par l'observation d'une "trace" de l'arbre. Celui-ci peut également être mis au jour par des travaux. Sur les zones de prélèvement, les déplacements sont toutefois intenses. Très peu d'individus identifiés sont rejetés a priori. Par exemple, les deux souches conservées sur le site d'IDE4 présentaient des cernes très déformés et des fragments de taille très modeste n'ont pas été analysés. D'une façon plus générale, le nombre de cernes constitue un biais systématique de l'analyse dendrochronologique (PILCHER *et al.* 1996). 50 à 80 cernes sont nécessaires à la synchronisation, ce qui exclu de l'interprétation les jeunes individus.

Lors de la publication de résultats préliminaires (VISSET *et al.* 1994), la chronologie moyenne, nommée Brière M28, regroupant les arbres datés sur les 3 premiers sites d'Ile d'Errand (IDE 1 à 3), comportait 57 individus. Ce nombre a été porté à 97 pour constituer Brière Ref3 (cf. partie 2 chap. 3), en intégrant des arbres provenant toujours d'Ile d'Errand (IDE4), d'Ile Clidan et quelques-uns plus éloignés, venant de Cabéno et Ile Fédrun. La période couverte par la première chronologie s'étend de -1342 à -998, soit 345 ans. L'ajout des 40 séries ne permet d'allonger la chronologie que de 35 ans, entre -1358 et -978. La forme de la couverture évolue peu entre les deux étapes (fig. 202). La répartition dans le temps des individus reste stable en augmentant leur nombre, ce qui est un argument pour considérer l'échantillonnage représentatif.

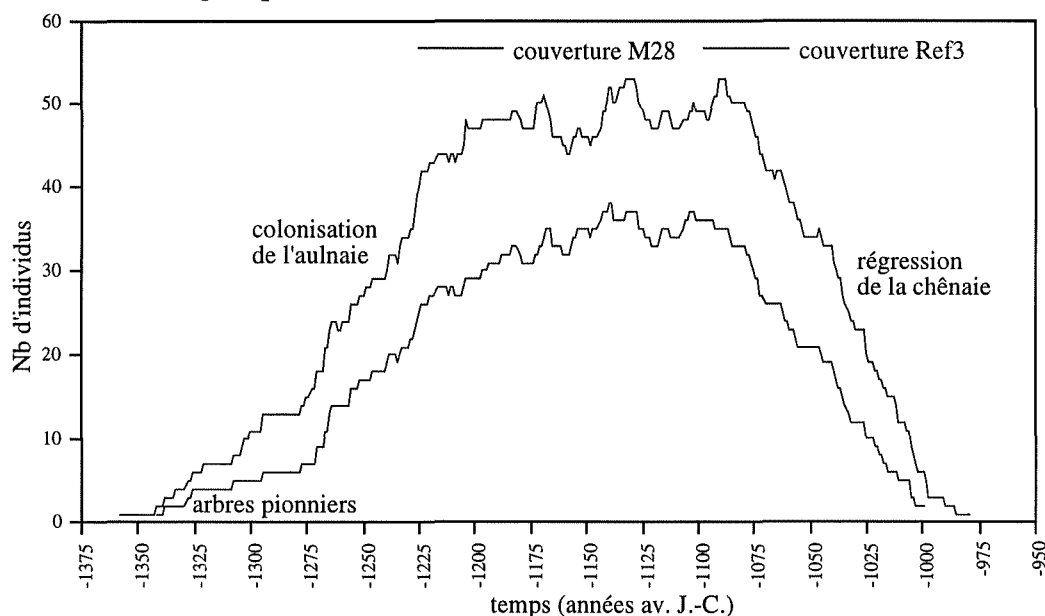


Figure 202 : couverture des chronologies Brière M28 (n=57) et Brière Ref3 (n=97)

## 2.2 Couverture en fonction de la topographie

Les sites de prélèvement constituent des sous-échantillons du peuplement fonction de la topographie. Les individus provenant d'un site permettent de construire une chronologie moyenne. Les périodes couvertes par ces moyennes sont très proches de celle de la référence regroupant toutes les séries (tab. 74). De 15 à 30 individus, pour les Iles de Clidan et Errand, suffisent donc pour représenter un intervalle de temps similaire à celui couvert par la référence. Par contre, les 8 séries provenant du site de Cabéno, situé à l'ouest de la Grande Brière, livrent en moyenne moins de cernes et couvrent une période plus courte. Par ailleurs, ces arbres sont plus récents d'une vingtaine d'années. Ces différences peuvent être liées à l'éloignement relatif de ce site, cependant les conditions de prospection ne sont pas identiques à celles des Iles de Clidan et Errand. La stratigraphie est très modifiée par les travaux anciens

et récents (tourbage, charruage et exploitation artisanale). Nous n'avons pas obtenu d'individus de gros diamètre.

site	Clidan	IDE 1	IDE 2	IDE 3+4	Cabéno	ref3
Nb d'individus	19	30	21	15	8	97
Origine	-1358	-1328	-1342	-1333	-1102	-1358
Terme	-1004	-998	-999	-1003	-978	-978
Nb c.	355	331	344	331	125	381

Tableau 74 : comparaison des chronologies obtenues pour chaque site avec Brière Ref3

A l'intérieur de 3 sites de prélèvement (Clidan, Ile d'Errand 1 et 2), des groupes d'arbres en fonction de leur distance par rapport à la limite du socle et du marais ont pu être faits (cf. partie 2 chap. 3). Ces groupes comportent entre 5 et 13 séries individuelles. La distribution de ces individus dans le temps montre des différences (fig. 203). Le secteur le plus proche de l'île Clidan (CLI 1) livre des arbres en moyenne plus récents que le secteur avancé dans le marais correspondant (CLI 2). Les arbres récents sont plus nombreux dans le secteur intermédiaire d'Ile d'Errand 1 (IDE1.2). Ces différences ne présentent pas de lien simple avec la topographie. Elles peuvent être le reflet d'un peuplement dont la densité varie très vite latéralement et en fonction du temps. Cependant les nombres d'individus très faibles peuvent être affectés de variations aléatoires. Par contre, les trois sites permettent d'observer que la couverture est faible pour une période ancienne longue de 100 ans, de -1358 à environ -1250

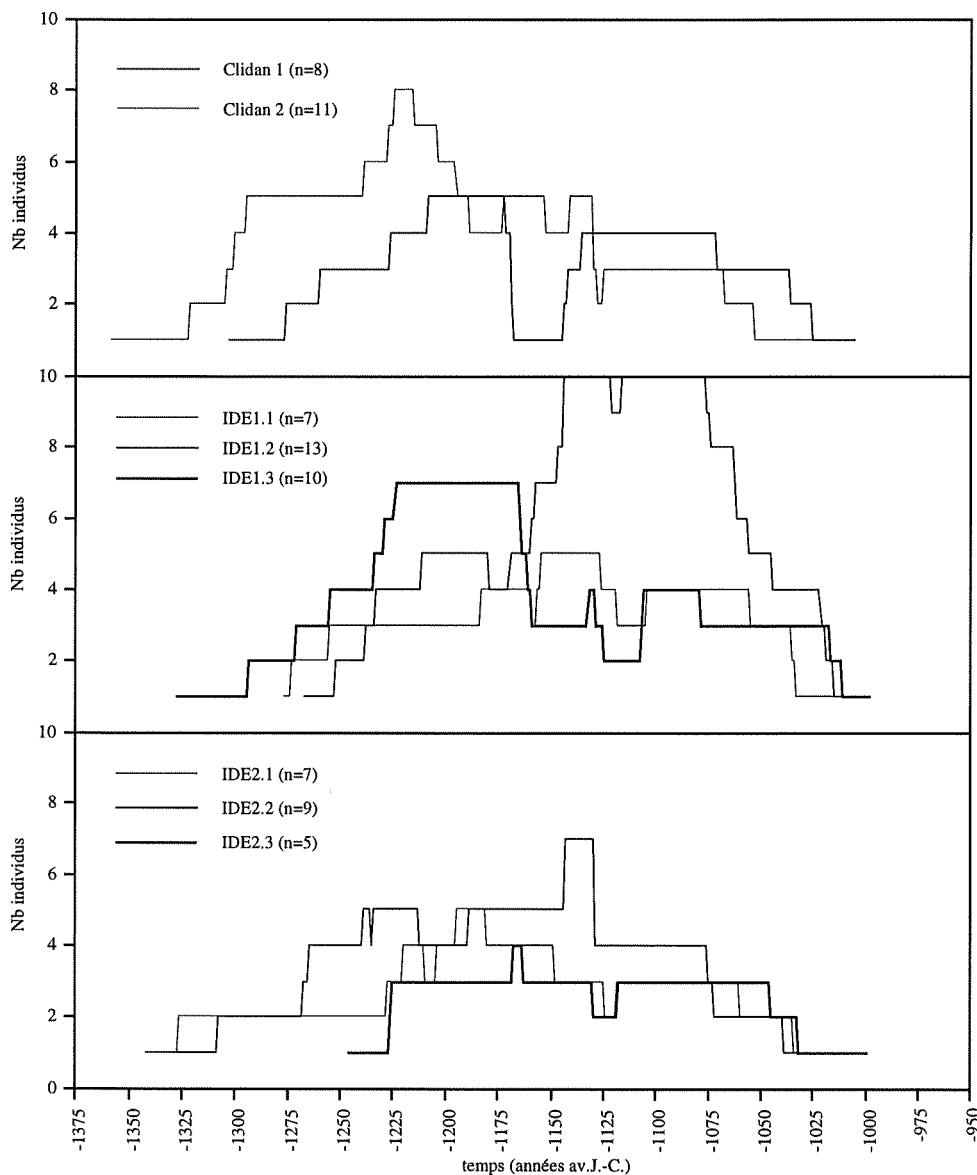


Figure 203 : couverture des moyennes en fonction de la topographie

---

et pour une période récente plus brève, longue de 50 ans s'étendant de -1050 environ à -998. Ces caractéristiques sont très proches de celles qui sont observées en considérant la totalité des échantillons, il est donc très peu probable qu'elles soient aléatoires.

Le matériel provient de plusieurs sites, il est représentatif sur les sites, mais l'existence des deux générations de chênes ne peut être extrapolée à l'étendue du marais. La datation de troncs provenant principalement de la zone d'Ile d'Errand et Ile Clidan est liée aux possibilités de prospection. Les quelques individus contemporains qui proviennent d'Ile Fédrun et Cabéno (cf. partie 2 chap. 3) montrent que la seconde génération s'est développée aux abords d'autres îles et des limites du marais. Cependant, des essais de datation de matériel provenant des marais du Haut Brivet, du canal de la Boulaie et des marais des Modiers (ouest de la Grande Brière) n'ont pas permis de vérifier qu'elle existe sur ces sites. Ces échantillons ont tous été récoltés dans des stratigraphies très perturbées par des travaux et peuvent provenir de la première génération. Les datations <sup>14</sup>C de 3 échantillons du Haut Brivet le montre. Elles localisent ces chênes entre 4760 et 3340 av. J.-C. ([4759-4349] BC, [4544-4153] BC, [3691-3341] BC).

### 2.3 Relation entre la présence des troncs et l'enregistrement de la pluie pollinique

Le développement d'un second stade forestier à Chêne est connu principalement grâce à la localisation des troncs subfossiles. Les enregistrements polliniques qui ont pu être rattachés à la fin du Subboréal (chronozones du massif Armoricaïn, cf. partie 1) montrent que la végétation locale est dominée par *Alnus*. Cette observation est très générale pour les divers points de sondage. La formation à Aulne domine la Brière jusqu'à une date qui peut être estimée à 3600 BP soit entre [2018-1885] cal. BC. (VISSET et VOELTZEL 1996). Après cette date, l'abondance des pollens de Poacées, Cypéracées et Sparganiacées est, de façon générale, en augmentation alors que celle d'*Alnus* et *Betula* diminue (VISSET et VOELTZEL 1996). La tourbe noire se forme pendant cette période. Au Subatlantique, alors que *Fagus* se développe dans la végétation régionale, *Alnus* est en déclin dans la cuvette au profit de *Betula*, *Salix*, *Rhamnus*, et *Corylus*. C'est à la suite de ce contexte de baisse du niveau d'eau qu'apparaît probablement la chênaie, mais la courbe pollinique du Chêne ne montre pas d'augmentation (VISSET *et al.* 1994).

Sur le site d'Ile d'Errand, deux sondages palynologiques, comportant la transition Subboréal - Subatlantique, ont été réalisés sur le même lieu que les prélèvements dendrochronologiques d'IDE1-2. Dans les deux cas, les diagrammes ne permettent pas d'observer d'augmentation des pollens de Chêne concomitante des dépôts de troncs (VISSET 1982, VISSET *et al.* 1994). L'échantillonnage des pollens a été réalisé tous les centimètres dans la période concernée (fig. 204). Le pourcentage associé à l'Aulne atteint un minimum proche de 20 % (du total des pollens déterminés) à 41-42 cm de profondeur (zone pollinique 7) alors qu'il s'élève à 45 % 1 cm antérieurement (zone pollinique 6). Cette chute n'est pas relayée par une augmentation des pollens de Chêne, qui restent proche de 15 %. Les taxons responsables de la perte de fréquence de l'Aulne sont principalement le Bouleau, les Cypéracées et les Poacées. La profondeur du minimum de représentation de l'Aulne correspond à celle, en moyenne, des troncs de chênes. Le lien stratigraphique est confirmé par les datations radiocarbone. La datation de la tourbe comprise entre 41 et 42 cm de profondeur, 2625 ± 80 BP, soit [914-529] cal. BC est postérieure à celle des troncs (1358 à 978 av. J.-C.). Celle de la tourbe alors que l'Aulne est dominant (43-45 cm) est antérieure aux chênes (3240 ± 55 BP soit [1627-1404] cal. BC). Il faut donc définir un hiatus de sédimentation entre la zone pollinique 6, où l'Aulne est dominant, et la zone 7 (fig. 204). Durant le développement de la Chêneie la

sédimentation est arrêtée et la pluie pollinique n'est plus enregistrée. La reprise de la sédimentation permet ensuite la conservation des troncs.

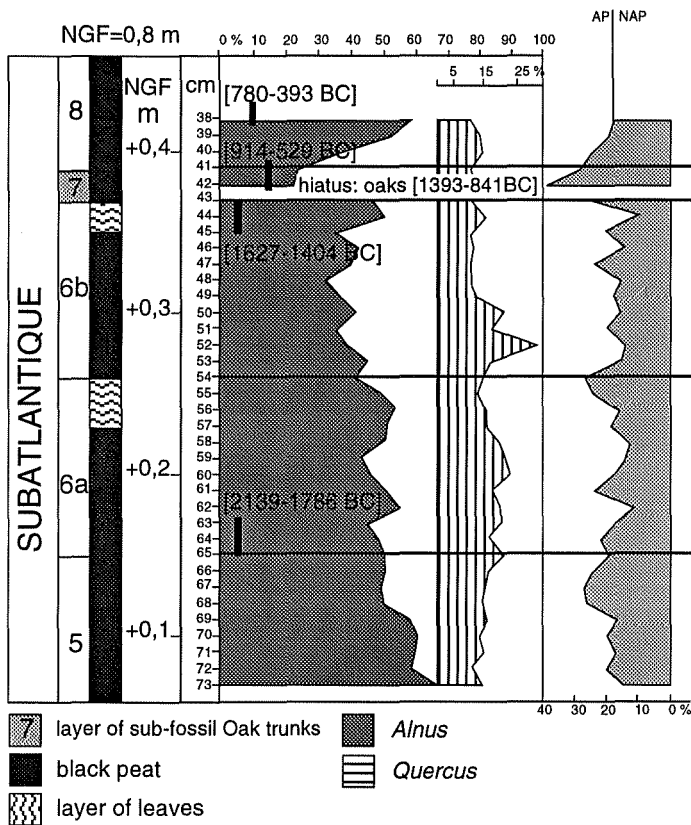


Figure 204 : diagramme palynologique simplifié d'Ile d'Errand, maille de prélèvement : 1 cm (zonation L. VISSET in VISSET et al. 1994)

La calibration des dates radiocarbones permet de donner une représentation plus linéaire dans le temps de l'évolution des peuplements que les courbes polliniques qui sont fonction de la vitesse de sédimentation. La représentation (fig. 205) montre très facilement que la sédimentation est rapide alors que l'Aulne domine la cuvette (zone 5-6) et très lente puis nulle pour la période correspondant à la datation des troncs. Les datations sont réalisées à la transition de chaque zone pollinique, c'est-à-dire pour une composition du peuplement présentant une unité, mais on ne peut pas considérer la vitesse de sédimentation constante (ou linéaire) entre deux dates  $^{14}\text{C}$ .

Les variations observées sont toutefois très évidentes entre les zones et la confrontation avec les datations dendrochronologiques. Elles donnent une importance relative au stade de chênaie nettement augmenté par rapport à la seule analyse des courbes polliniques.

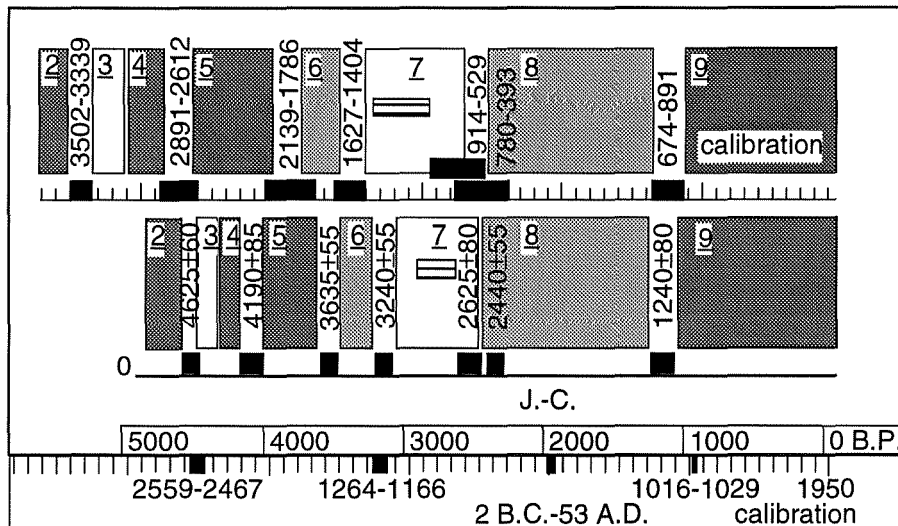


Figure 205 : schématisation des zones polliniques (VISSET et al. 1994) dans le temps en âge radiocarbone et calibré. La formation est d'autant hygrophile que le niveau de gris est foncé

- dates  $^{14}\text{C}$  avec leur déviation      ▨ dates dendro      temps (années)
- Z2 : argile marine - Chénopodiacées
  - Z3 : 1 ère génération de Chêne
  - Z4 : aulnaie à Osmonde, Saule, Bouleau
  - Z5 : aulnaie
  - Z6 : déclin de l'aulnaie
  - Z7 : 2 ème génération de Chêne
  - Z8 : Cypéracées, Aulne
  - Z9 : déclin de l'aulne, Poacées (Phragmites)

---

## 2.4 Evolution du nombre de chênes

La couverture de la chronologie Brière Ref3 peut être divisée en 4 parties (fig. 202). De -1358 à -1275 les arbres sont peu nombreux. Ils ne sont pas découverts dans toutes les unités topographiques jusque vers -1250. La chênaie est en phase pionnière. A partir des îles et des bordures de la cuvette, les chênes avancent dans l'aulnaie. La courbe de la production pollinique de l'Aulne est en net déclin depuis la date de [1627-1404] cal. BC. Par rapport à la zone pollinique 6a, la zone 6b est caractérisée par une présence supérieure de *Betula*, de *Salix*, de *Fraxinus*, ainsi que de *Rhamnus* et *Myrica* (VISSET *et al.* 1994). *Corylus* augmente également mais est peut-être d'avantage produit à l'extérieur de la cuvette. Durant ce déclin d'*Alnus*, les pollens de Chêne ne sont pas plus nombreux, alors que la sédimentation a toujours lieu. L'extension du Chêne dans la cuvette est donc probablement consécutive à celle des espèces précédentes qui ont un caractère pionnier plus marqué et sont plus à même de supporter un milieu où la tourbification a toujours lieu. Les datations 14C, dendrochronologiques et les courbes polliniques semblent donc indiquer que le Chêne ne colonise l'aulnaie qu'après l'arrêt de la sédimentation.

A partir de -1275 / - 1250, la couverture augmente fortement jusqu'à une date proche de -1200. La chênaie est à son développement maximal de cette date jusque vers -1080 / -1050. La régression de la chênaie s'amorce ensuite, le nombre diminue d'abord rapidement, jusque vers -1000 puis quelques arbres survivent jusqu'en -978. A partir de -1050, les chênes de cette période ne sont plus découverts sur la totalité des zones de prélèvements (cf. 2.2). La datation 14C de la tourbe de la zone pollinique 7, [914-529] cal. BC, présente une déviation importante qui est liée au "plateau" de la courbe de calibration au premier âge du Fer (cf. partie 1). Elle montre toutefois, que la tourbification reprend rapidement après le déclin des chênes. Ces derniers n'émettent alors pas plus de pollens que lors de la régression de l'aulnaie.

## 3 Description de la croissance des chênes entre -1358 et -978

### 3.1 Observations anatomiques

Les 11213 mesures de cernes que représentent les 97 individus datés en Brière ont une valeur moyenne de 173 mm/100 avec un écart-type s'élevant à 124 mm/100. Les valeurs maximale et minimale sont 1074 mm/100 et 11 mm/100. Les largeurs observées ont une dispersion qui est particulièrement élevée par comparaison, la largeur moyenne obtenue pour les arbres de Lorraine est de 100 mm/100, avec un écart-type de 63 mm/100 et des valeurs maximale et minimale de 505 mm/100 et 24 mm/100. Les chênes de Brière ont des cernes alternativement très larges, dépassant assez fréquemment les 300 mm/100 et très minces, souvent inférieurs à 50 mm/100. Jusqu'à cette largeur, l'anatomie des cernes reste "classique". Le bois initial est individualisé, il comporte 1 à 2 rangs de vaisseaux alignés (fig. 206). Le bois final est principalement fibreux et comporte de petits vaisseaux et divers parenchymes. Lorsque la largeur du cerne diminue, c'est principalement le bois final qui est affecté. Celui-ci peut disparaître pour 2 à 15 années, les zones initiales sont alors accolées voire désorganisées (fig. 206). La grande majorité des échantillons présentent une à 3 séquences de ces cernes sans bois final. La transition entre les cernes aux caractéristiques anatomiques classiques et ces cernes étroits est plus ou moins brutale (fig. 206). Les cernes précédents sont souvent progressivement plus minces mais l'absence du bois final induit une forte réduction de la largeur (une division par deux ou trois). A la suite de la séquence de cernes minces le recouvrement est également plus ou moins progressif. Il peut se dérouler sur une période dépassant 10 ans (fig. 206). La transition et le recouvrement entre les caractères extrêmes et moyens ne se réalisent, en moyenne, pas sur une seule année mais la baisse de production pendant la séquence de cernes minces est très importante et peut être rapprochée de la

définition d'un changement brusque de croissance faite par SCHWEINGRUBER *et al.* (1990) (KAENNEL et SCHWEINGRUBER 1995).

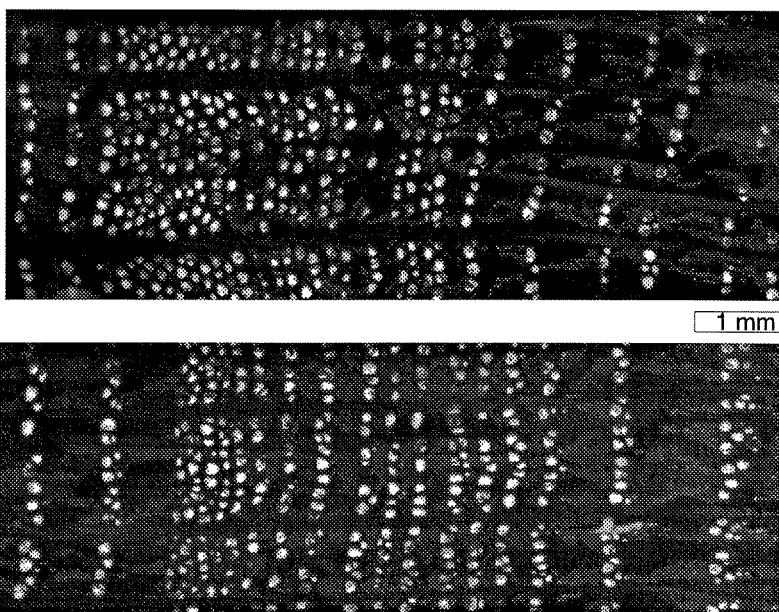


Figure 206 : plan transversal de l'individu IDE4.15, présentant deux séquences de cernes étroits

Ces séquences de cernes présentent des caractéristiques anatomiques qui peuvent être observées localement sur du matériel archéologique mais elles prennent ici un caractère systématique puisque tous les arbres à quelques exceptions près sont atteints. Les figures décrites ici sont également proches de celles consécutives à l'émondage des chênes encore réalisé en Brière (cf. partie 3 chap. 4 fig. 160). Cependant, le nombre de cernes étroits semble inférieur à celui observé sur les arbres anciens. Elles sont également proches de celles des arbres actuels entrés en dépérissement (GIRARDCLOS 1997).

### 3.2 Largeurs brutes

La recherche du synchronisme entre les séries individuelles a été réalisée indépendamment de l'observation anatomique des séquences de cernes étroits. Les méthodes déjà décrites (cf. partie 2) fournissent plusieurs résultats qui peuvent être confrontés. Cette opération a lieu en comparant des courbes individuelles et des chronologies moyennes partielles "visuellement", sur une table lumineuse. Lors de ces comparaisons les séquences de cernes minces sont apparues très souvent synchrones entre les individus, à la suite de plusieurs dates (fig. 207). Seules des séquences observées au début de la vie de l'arbre (à la hauteur de prélèvement près) sont parfois asynchrones (fig. 207). Les changements brusques de croissance affectent la majorité de la population des chênes. Ces séquences prennent donc une grande part dans les variations de la chronologie moyenne, Brière Ref3.

Par ailleurs il est très improbable que ces séries de cernes correspondent à des émondages précisément parce qu'elles sont synchrones entre les individus. La gestion de la ressource en bois par émondage nécessite d'établir une rotation entre les arbres qui implique que les stress n'apparaissent pas aux mêmes dates. Toutes les analyses de ce procédé concordent sur ce point (GUIBAL et PILCHER 1988, RENAUDIN 1996, BERNARD 1997, DOUCERAIN et GIRARDCLOS 1998)

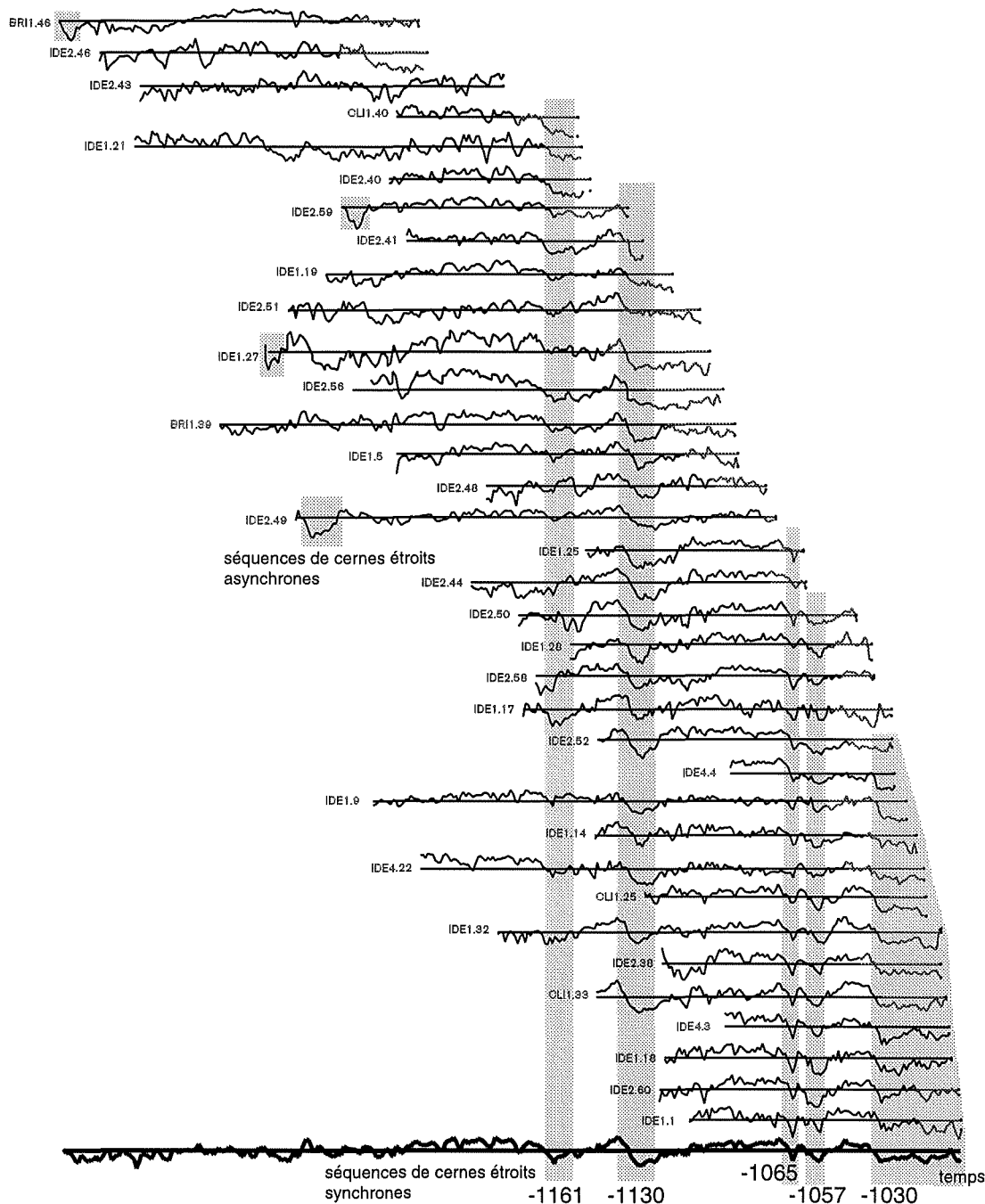


Figure 207 : exemple de séries individuelles

Les analyses de la croissance de chênes découverts dans des niveaux de tourbe analogues à ceux de Brière, dans les îles britanniques (BAILLIE 1995) et en Basse Saxe (LEUSCHNER 1992) montrent également des changements brusques de croissance synchrones entre de nombreuses séries individuelles. BAILLIE et MUNRO (1988) ont proposé une méthode qui permet, en fonction du nombre d'arbres et de sites analysés, de mesurer si les cernes les plus étroits ont une distribution particulière dans le temps. Ces auteurs proposent de considérer le cerne le plus étroit élaboré par l'arbre comme un indicateur des conditions de croissance les pires qu'il ait rencontré dans sa vie (BAILLIE et MUNRO 1988). On peut remarquer que cette méthode est adaptée aux cas où des changements brusques de croissance sont effectivement synchrones entre les individus. Ces changements permettent de faire l'hypothèse qu'un événement majeur affecte la population. Dans le cas contraire, la tendance d'âge ou des variations de moyenne fréquence, qui ne sont pas reliées à des facteurs régionaux, semblent les principaux responsables de la répartition dans le temps des cernes les plus minces.

---

Les auteurs interprètent une coïncidence, à des dates plus ou moins exacte, des cernes les plus minces d'arbres provenant de différents sites comme étant un indicateur de l'action de facteurs très défavorables à la croissance. L'application à la longue chronologie du laboratoire de Belfast de la méthode a permis de mettre en évidence une coïncidence entre certaines des séquences de cernes les plus minces, et des "frost ring" (cernes traumatiques dus aux gels KAENNEL et SCHWEINGRUBER 1995) de *Pinus aristata* dans les White Mountains (Californie) (LAMARCHE et HIRSCHBOECK 1984) ainsi que des pics d'acidité relevés dans les carottes de glace extraites de l'inlandsis du Groenland (BAILLIE et MUNRO 1988, BAILLIE 1995). Grâce à l'aspect global des données, les auteurs ont pu formuler l'hypothèse que ces événements majeurs, supposés de nature climatique, sont reliés à l'activité explosive des volcans (LAMARCHE et HIRSCHBOECK 1984, BAILLIE et MUNRO 1988, BAILLIE 1989, 1995, 1996, PILCHER 1996).

La méthode employée est décrite en détail par BAILLIE et MUNRO (1988). La date du cerne le plus étroit de la vie de l'arbre (éventuellement des 2 ou 3 si des valeurs sont égales) est déterminée. A chaque date, le nombre de cernes les plus étroits est multiplié par le nombre de sites analysés (rs). En Brière, les zones de prélèvement sont considérées comme des sites. Ce nombre est presque constant entre -1300 et -1020. Il influe donc peu sur le calcul dans cette période (fig. 208A). Au lieu d'être réalisé à chaque date, le calcul peut être fait dans une fenêtre (w), de façon à lisser des décalages.

Le produit obtenu est proportionnel au nombre de bois et de sites analysés. Pour le tester, BAILLIE et MUNRO (1988) proposent de le transformer en un indice qui prend en compte une estimation de la probabilité qu'un cerne le plus étroit "tombe" à une date donnée en fonction du nombre d'arbres et de sites. Pour chaque arbre, la taille de la fenêtre, le nombre de cernes de l'arbre, et le nombre de cernes les plus étroits (souvent 1 à 3) servent à établir l'estimation. L'indice mesure l'écart entre cette estimation et le produit tout en étant pondéré par le nombre total de sites et d'arbres, pour limiter les effets de sous-échantillonnage. En Brière, le nombre d'arbres restant élevé et le nombre de sites constant, entre -1300 et -1020, l'indice est proche du produit non transformé.

La figure 208B montre que la répartition du produit (rs) dans le temps présente 5 pics dont deux majeurs. Les valeurs les plus fortes correspondent aux années : -1161, -1151, -1127, -1065, -1030. Ces pics sont observés sans utiliser de fenêtre (w=1), ce qui signifie que les cernes les plus étroits sont synchrones à l'année près. Toutefois, on remarque que la valeur de (rs) est élevée pour un groupe de quelques années. De -1300 à -1180 plusieurs valeurs faibles de (rs) indiquent que les cernes les plus étroits sont plus répartis dans le temps. Deux faibles concentrations sont cependant centrées autour de -1267 et -1229. Ce calcul est le plus robuste mais il ne prend pas en compte la variation de la quantité d'information, le produit est donc transformé en indice. A la suite de cette transformation, les valeurs de (rs) les plus faibles ne sont plus considérées, jugées non significatives (fig. 208C). Les 5 pics sont toujours individualisés, et des valeurs faibles persistent autour de -1267 et -1229. Lorsque l'indice est calculé dans une fenêtre de 3 (fig. 208D) ou 7 (fig. 208E) années, les deux pics majeurs, -1127 et -1161 restent très évidents alors que les autres diminuent. La prise en compte de cernes les plus étroits autour des produits formant les pics est donc favorable aux deux valeurs principales et plus particulièrement à -1127. A la suite de -1030, c'est-à-dire pendant la régression de la chênaie, plusieurs cernes les plus étroits sont observables (fig. 208B) mais ils restent dispersés, le pic diminue (relativement aux autres) quand (w) augmente.

La croissance des arbres présente donc un caractère extrême à deux dates principales, en -1161 et -1127. Les conditions de croissance de ces années induisent la formation du cerne le plus étroit de leur vie à un nombre important (relativement à la quantité d'information) d'arbres. Les années -1151, -1065 et -1030 sont également caractérisées par de



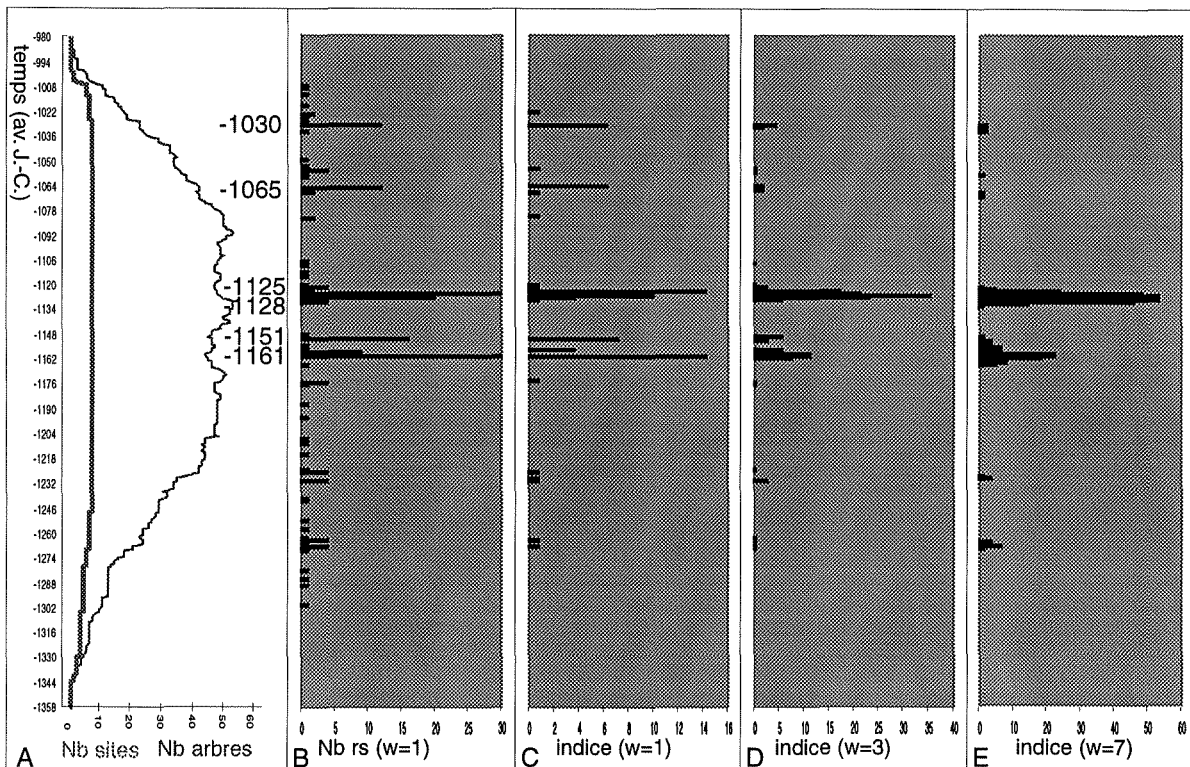


Figure 208 : chronologie des cernes les plus étroits de la vie des arbres (méthode BAILLIE et MUNRO 1988)

mauvaises conditions de croissance. Enfin, la répartition des cernes minces dans la période entre -1300 et -1180 est nettement plus régulière, ce qui fait penser que la formation du cerne le plus mince de la vie des arbres est moins en rapport avec des facteurs externes que de -1161 à -1030.

### 3.3 Années caractéristiques

La technique des années caractéristiques permet également de déterminer des années particulières durant lesquelles on peut supposer que les rapports entre la croissance et les facteurs externes ont pris un caractère extrême (SCHWEINGRUBER *et al.* 1990). Il sera question ici d'années caractéristiques sélectionnées grâce à l'écart entre une valeur et sa précédente donc en fait de pointer interval selon KAENNEL et SCHWEINGRUBER (1995) (cf. partie 3 chap. 5).

Le lot analysé présente une homogénéité de la variation interannuelle qui est élevée. Pour les 97 individus datés, qui représentent une couverture moyenne de 30 cernes par an, 51% des 350 années de la chronologie sont caractéristiques selon le critère de Huber (cf. partie 3 chap. 5) et 33% de ces années caractéristiques présentent en fait une concordance des pentes de 90%. La concordance est en moyenne de 72% et ne montre pas d'évolution importante le long de la chronologie (fig. 209).

La forte homogénéité de la variation interannuelle sous-tend que la croissance des arbres est de façon courante largement dépendante des facteurs externes. Dans ces conditions, les critères basés uniquement sur la fréquence des écarts concordants, comme celui de Huber, ne sélectionnent pas des années exceptionnelles durant lesquelles les rapports entre les facteurs externes peuvent être supposés extrêmes.

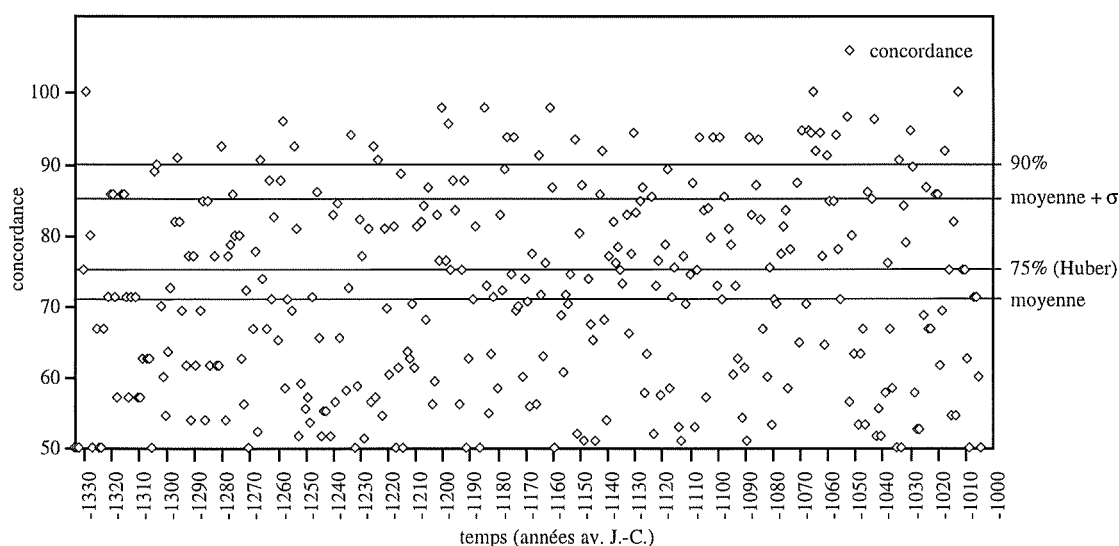


Figure 209 : concordance des pentes des séries individuelles incluses dans Brière Ref3

Les années peuvent être sélectionnées, en fonction du nombre de séries, grâce à la concordance des pentes et grâce à l'ampleur des écarts interannuels.

SCHWEINGRUBER et al. 1990 proposent d'utiliser la distribution normale pour déterminer une limite de signification aux pourcentages de concordance (cf. partie 3 chap. 5). Le lot comportant un nombre de séries assez important et la concordance moyenne étant élevée, il faut utiliser une limite forte pour obtenir une sélection des années. Si la probabilité limite est fixée à 99% (soit un risque théorique de considérer l'année caractéristique à tort de 1%) 44,5% des années sont sélectionnées. Il faut utiliser la limite 99,999% pour conserver 16,7% des années. Avec 99,9999%, les 41 années de la chronologie où la concordance est la plus forte (en fonction du nombre de séries individuelles) sont dégagées (fig. 210). Elles correspondent effectivement à des accents de la chronologie de référence. Toutefois, le critère ne permet pas de considérer que la variation est extrême pour chacune de ces années.

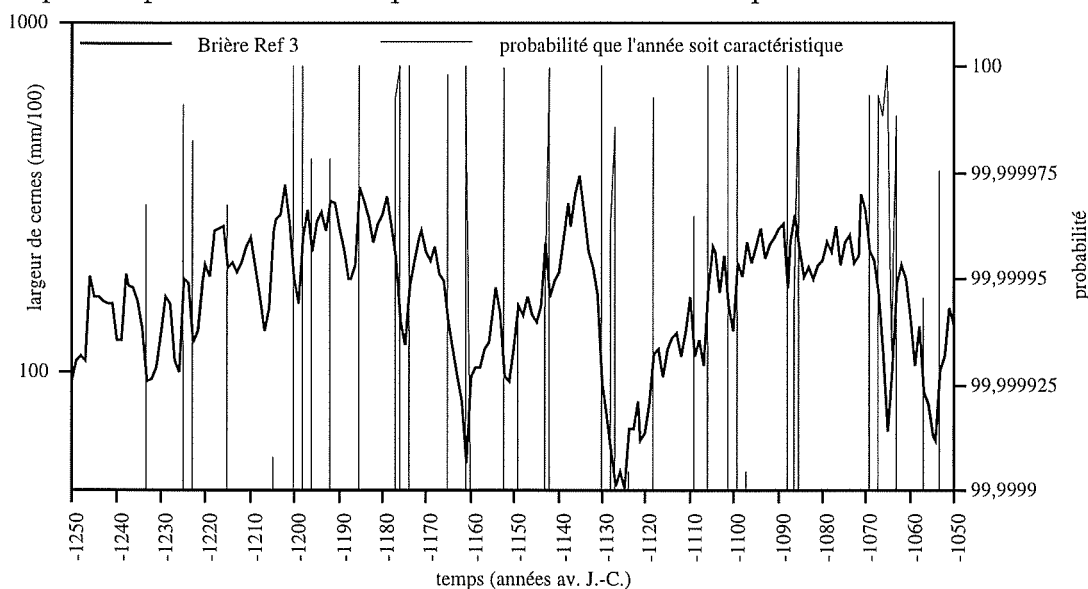


Figure 210 : comparaison de Brière Ref3 (valeur brute échelle logarithmique) et de la probabilité que la concordance des pentes

Pour chaque année  $n$ , on dispose du nombre de séries dont le cerne est inférieur au précédent (descendant)  $nd$ , du nombre de séries dont le cerne est montant  $nm$  et du nombre de série total,  $nt$ . Les écarts jugés plats ne sont pas considérés. La concordance des pentes ( $C\%$ ) pour une année peut être estimée par  $C\% = (nm - nd) / nt * 100$  (RINN 1989).  $C\%$  ne

tient pas compte de la couverture. Des valeurs fortes de C% peuvent donc être liées à un manque de séries. Pour limiter cet effet, la couverture moyenne (cm) est utilisée pour pondérer le calcul :  $Cp\% = (nm - nd)2 / (nt * cm) * 100$  (RINN 1989) (Le signe du sens de variation est conservé).

Le nombre de séries plus faible dans les parties ancienne et récente de la chronologie est responsable de valeurs de Cp% plus proches de la moyenne (fig. 211). Inversement, les valeurs qui s'en écartent le plus correspondent aux années où la croissance des arbres présente le plus de concordance. Il y a une similitude importante des années sélectionnées par cette méthode et celles obtenues en estimant la probabilité que le pourcentage de concordance soit caractéristique (fig. 210).

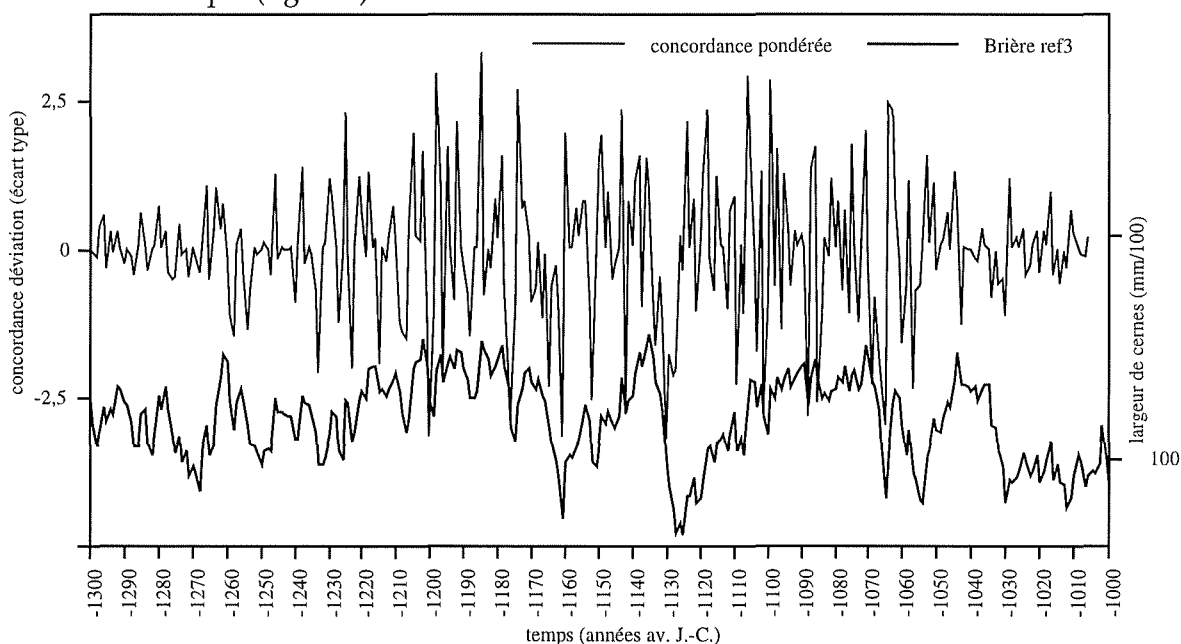


Figure 211 : comparaison de Brière Ref3 (valeur brute échelle logarithmique) et de la concordance des pentes pondérée (Cp%) (RINN 1989)

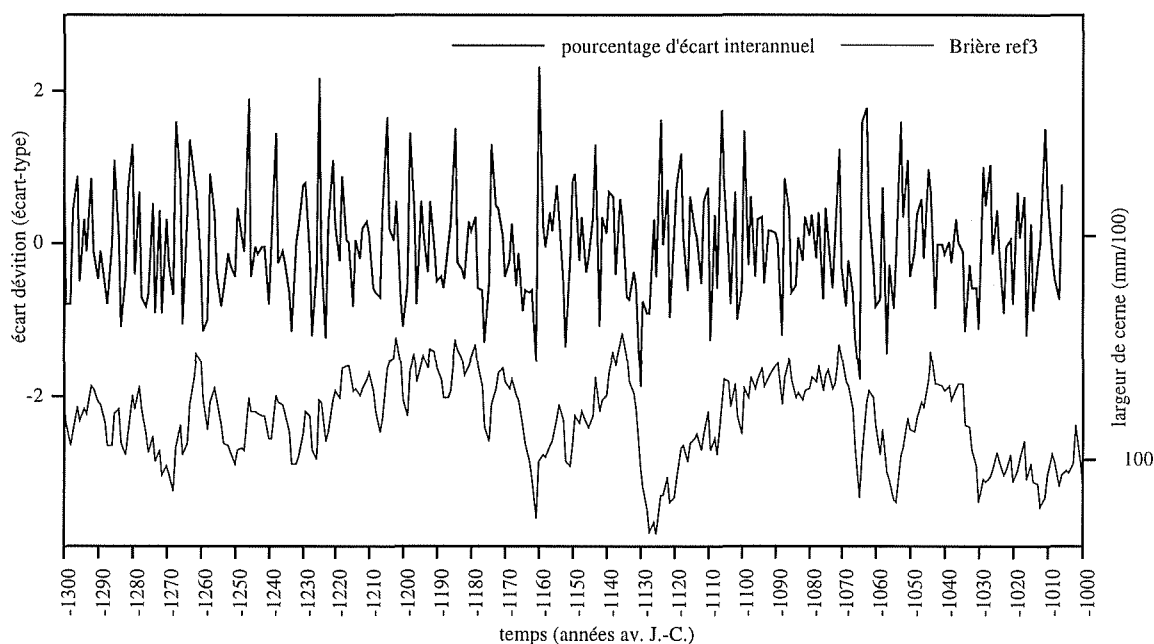


Figure 212 : comparaison de Brière Ref3 (valeur brute échelle logarithmique) et du pourcentage d'écart interannuel (RINN 1989)

Un cerne donné peut être jugé particulier car la perte de croissance par rapport à l'année précédente est exceptionnelle. Pour obtenir une évolution relative de la croissance, l'écart entre les cernes des années n et n-1 est rapporté à la largeur n-1. Le résultat, exprimé en pourcentage de variation, présente, comme l'estimation de la concordance, une valeur éloignée de la moyenne pour des accents de la croissance (fig. 212).

Il est possible d'observer des années où la croissance est nettement plus faible que l'année précédente mais que cette variation ne concerne en fait que certains arbres. De même, il peut être envisagé des années où une grande part de la population réalise un cerne plus étroit que le précédent mais sans que l'écart soit important. Il apparaît donc intéressant de combiner les deux critères utilisés précédemment. Dans l'hypothèse où les caractéristiques extrêmes de la croissance refléteraient une action également extrême des facteurs, les années où l'écart est élevé et concordant seront sélectionnées. RINN (1989) propose d'utiliser la formule :

$$EC = (R_n - R_{n-1}) * (n_m - n_d) / n_t$$

où EC est l'"écart-concordant",  $R_n$  et  $R_{n-1}$  sont les largeurs de cerne des années n et n-1 (le logarithme de la largeur est employé pour rendre les données plus normale) et  $n_m$ ,  $n_d$ ,  $n_t$  sont les nombres de cernes montants, descendants et totaux. Il est préconisé de pondérer EC par la couverture moyenne pour tenir compte de la variation de la quantité d'information (RINN 1989) :

$$EC_p = ((R_n - R_{n-1}) * (n_m - n_d))^2 / (n_t * cm)$$

La valeur d' $EC_p$  s'écarte de la moyenne pour la chronologie lorsque la variation interannuelle est particulièrement ample et concordante. 25 années entre -1300 et -1000 sont caractérisées par des valeurs d' $EC_p$  supérieures ou inférieures à la valeur moyenne  $\pm 2$  écart-types (fig. 213). La valeur absolue la plus élevée correspond à la perte de croissance de l'année -1130, puis l'indice met en évidence les écarts positifs des années -1225, -1185 et négatif en -1065.

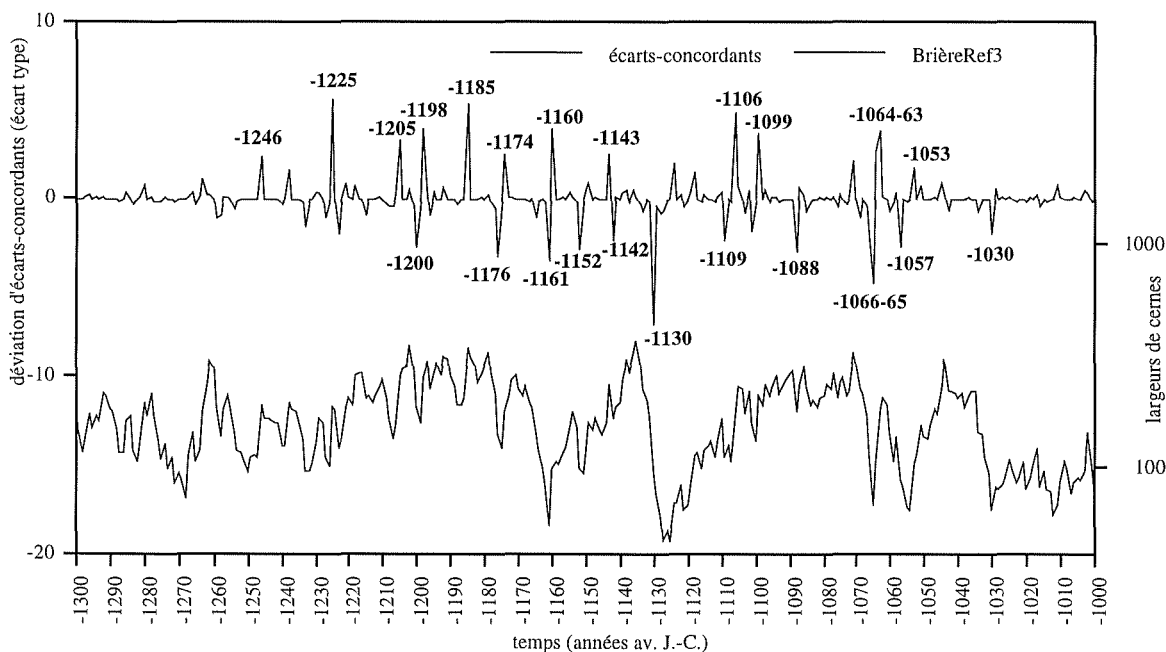


Figure 213 : comparaison de Brière Ref3 (valeur brute échelle logarithmique) et des écarts amples et concordants déterminés selon  $EC_p$  (RINN 1989)

### 3.4 Comparaison des méthodes

Les observations anatomiques, le cerne le plus étroit de la vie de l'arbre ainsi que les années caractéristiques indiquent des périodes pour lesquelles la croissance atteint des valeurs critiques. Ces années, la réponse de la population d'arbres est violente et concordante, on peut donc penser qu'elle est liée à des conditions de croissance particulièrement défavorables. Les arbres peuvent être considérés en situation de stress, c'est-à-dire que leur faculté de défense vis-à-vis des facteurs environnementaux sont mises à mal et nécessitent un recouvrement.

Les périodes déterminées à l'aide des cernes les plus étroits correspondent à celles qui sont directement observables sur les séries individuelles et sur la chronologie moyenne Brière Ref3. Le cerne le plus étroit d'un arbre est couramment inclus dans une séquence de petits cernes dont l'anatomie a été décrite. Des écarts caractéristiques négatifs concordent avec ces périodes ou les précèdent d'une année (fig. 214).

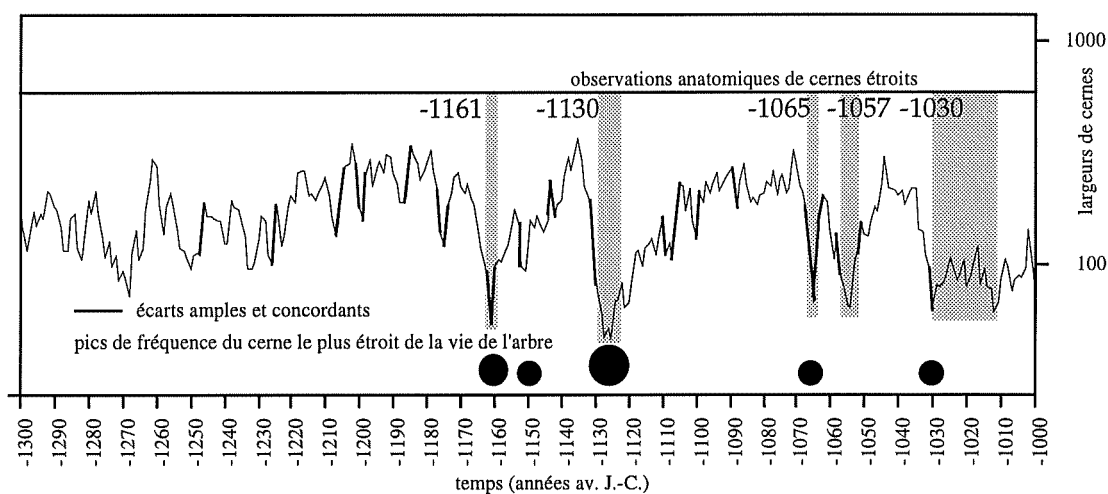


Figure 214 : projection sur Brière Ref3 des caractéristiques extrêmes de la croissance définies par l'observation anatomique, la chronologie du cerne le plus mince de la vie de l'arbre et des écarts les plus amples et concordants.

On observe, particulièrement en -1130, que la forte chute de croissance, qui affecte une grande part de la population, est suivie d'une période de formation de cernes très minces. Les différentes méthodes de description de la croissance concordent pour indiquer que les arbres sont particulièrement affectés durant la période entre -1130 et -1124 soit pour 7 années. La croissance moyenne des 53 arbres disponibles à ces dates est inférieure à 1 mm de -1130 à -1119. Relativement à -1130, la croissance est moins violemment atteinte à la suite des années : -1057 et -1030. Toutefois, dans ces deux cas la perte de largeur caractéristique est suivie de la formation de 3 à 5 cernes minces en moyenne pour toute la population. Cette période peut être nettement plus longue pour certains individus et atteindre 30 ans (cf. *infra*).

La croissance est également très diminuée à trois autres périodes pour lesquelles la formation de cernes minces ne dure que 2 ou une seule année. Dans ce cas, la formation de cernes minces est contemporaine de la perte de croissance caractéristique (fig. 214). Il s'agit des années : -1161, -1152-51, et -1166-65.

Avant la date de la chute de croissance caractéristique, la largeur est également décroissante quelques années consécutives : 4 ans avant -1130, 6 avant -1065 et -1030 et 7 années avant -1161 (fig. 214). Le cerne de l'année -1058, est plus large que son précédent mais si l'on tient compte de la tendance, la chute de -1057 est aussi précédée de 4 cernes progressivement moins larges.

---

Après la période de stress la largeur ne retrouve un niveau comparable à celui qui la précédait qu'après un nombre d'année de recouvrement qui est très variable. La chronologie de référence donne une idée d'un temps moyen pour que la population retrouve sa production type. Mais en fait la période de recouvrement a une durée très variable entre les individus, certains ne recouvrant jamais totalement le stress (cf. *infra*).

Il semble donc qu'antérieurement au stress proprement dit, qui se manifeste par une chute caractéristique, les conditions se dégradent progressivement, ensuite la croissance prend des caractéristiques extrêmes durant 1 à 7 années et enfin le recouvrement est très variable, de quelques années (après -1065) à environ 40 ans à la suite de -1130. Ces périodes d'évolution de la largeur, en rapport avec les conditions très défavorables qui induisent le stress, se traduisent par une tendance de moyen terme très marquée dans les chronologies individuelles (fig. 207) mais également dans la chronologie de référence. La tendance à moyen terme est décrite comme prépondérante dans les séries par tous les auteurs ayant analysé du matériel analogue à celui découvert en Brière (MUNRO 1984, BAILLIE et MUNRO 1988, LEUSCHNER 1992, PILCHER *et al.* 1996).

Des écarts caractéristiques sont également observés en dehors des périodes de croissance extrême. Ces années, la variation de la largeur est particulièrement ample et concordante entre les séries mais les conditions n'induisent pas un stress sur plusieurs années. Il n'y a donc pas de tendance liée à ces écarts. L'information reste de haute fréquence, ce qui est plus proche des observations faites dans les séries issues de milieux drainés.

## 4 Relation entre la croissance et l'évolution du peuplement

### 4.1 Mort des arbres

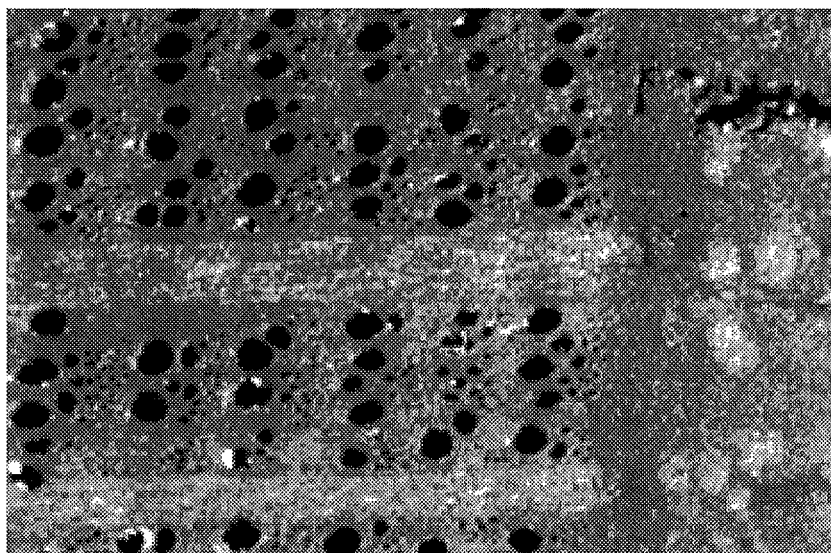
#### 4.1.1 Observations anatomiques

La mort des arbres peut être décrite avec précision lorsque l'érosion (ou la taille dans le cas d'artefacts) a permis la conservation des cernes les plus externes, sous l'écorce. Pour le lot de 97 arbres datés, le dernier cerne élaboré du vivant de l'arbre peut être observé sur 35.

L'aubier, beaucoup plus riche en éléments nutritifs et en eau que le bois de coeur est préférentiellement attaqué quel que soit le type de conservation (humide ou sec). En Brière, il a été observé sur des arbres extraits lors de travaux uniquement si le stockage permettait de conserver le bois humide. Dès qu'ils sont exposés au soleil, les troncs se fendent et l'aubier se décolle du duramen. Lorsque l'arbre est dans la stratigraphie, l'aubier et l'écorce sont plus fréquemment observés sur la face inférieure du tronc. La face supérieure est souvent très érodée, sous l'action des racines et des dessiccations. Les conditions d'humidité sont plus constantes avec la profondeur et lors de l'inclusion dans la tourbe du tronc, la face inférieure est plus rapidement en situation d'anaérobie. Les rhizomes de Phragmites peuvent toutefois contourner totalement le tronc et se développer dans tout l'aubier. L'écorce présente une meilleure résistance et peut persister alors que l'aubier a été érodé.

Pour les 35 arbres analysés, deux types très différents de figures anatomiques des derniers cernes de vie des arbres peuvent être décrits. Dans un cas le dernier cerne, accolé au cambium et au liber, présente une organisation des cellules et une largeur qui ne diffèrent pas notablement des autres (fig. 215). Rien dans la croissance ne peut être mis en relation avec la mort de l'arbre qui semble être survenue rapidement.

Figure 215 : zone cambiale de l'arbre IDE4.8 mort rapidement.



Dans le second cas, les derniers cernes sont très serrés (fig. 216), leur largeur est inférieure à 30 mm/100 voire nettement moins (jusqu'à 10 mm/100). Le bois final est quasiment absent pour plusieurs années consécutives. Les vaisseaux ont un diamètre faible qui représente à lui seul la largeur du cerne. La variation du diamètre pour un même cerne est importante (du simple au double) et l'alignement des zones initiales est très perturbé. Les vaisseaux prennent une organisation en quinconce ce qui rend très délicat leur attribution à un cerne. Cette période de croissance très réduite et désorganisée avant la mort dure de 5 à 30 ans. La transition entre les cernes aux caractéristiques types et les cernes désorganisés peut être assez progressive. Toutefois, un ou quelques cernes sans bois final sont souvent le point de départ de cette évolution. Ces cernes présentent une analogie avec les séquences décrites précédemment en liaison avec certaines années caractéristiques mais les caractères sont souvent plus extrêmes, particulièrement avant la mort.

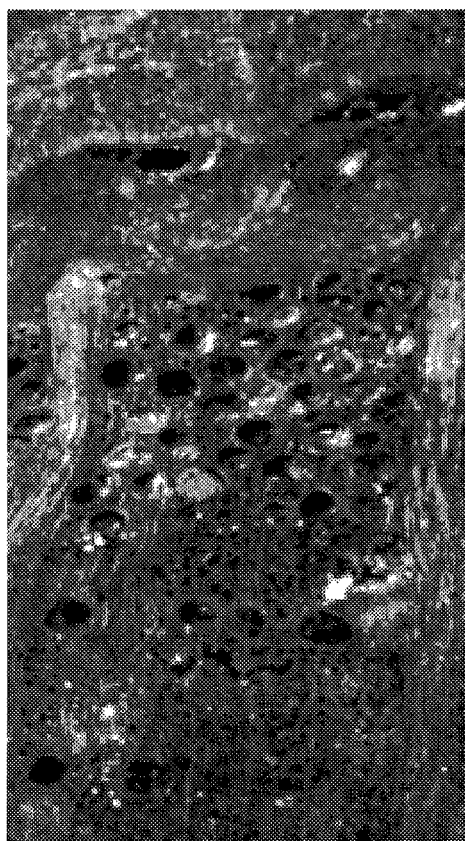


Figure 216 : zone cambiale de l'arbre IDE2.41 mort lentement, après une séquence de 7 cernes désorganisés

L'élaboration de cernes minces est souvent accompagnée de dysfonctionnement de la transformation du bois d'aubier en bois de coeur. La différenciation du duramen est un processus physiologique qui a classiquement une durée assez similaire sur toute la périphérie de l'arbre. La limite entre le duramen et l'aubier suit donc un ou quelques cernes et le nombre de cernes d'aubier est presque constant sur différentes directions dans le plan transversal. La photographie de l'échantillon IDE1.13 montre que cette limite traverse environ 10 cernes sur un secteur assez étroit (fig. 217). De plus, la transformation est imparfaite, des inclusions d'aubier sont visibles dans le bois de coeur (lunure) et inversement des îlots de duramen ne sont pas transformés.



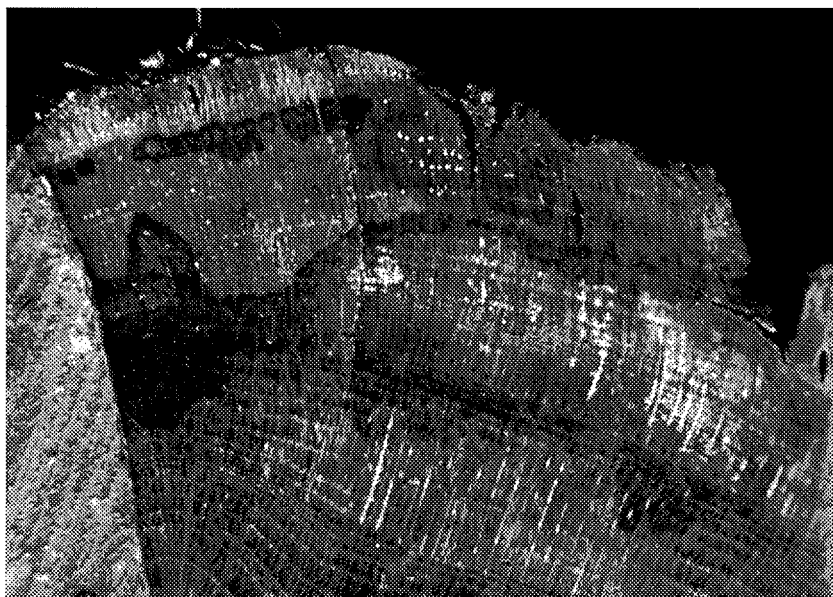
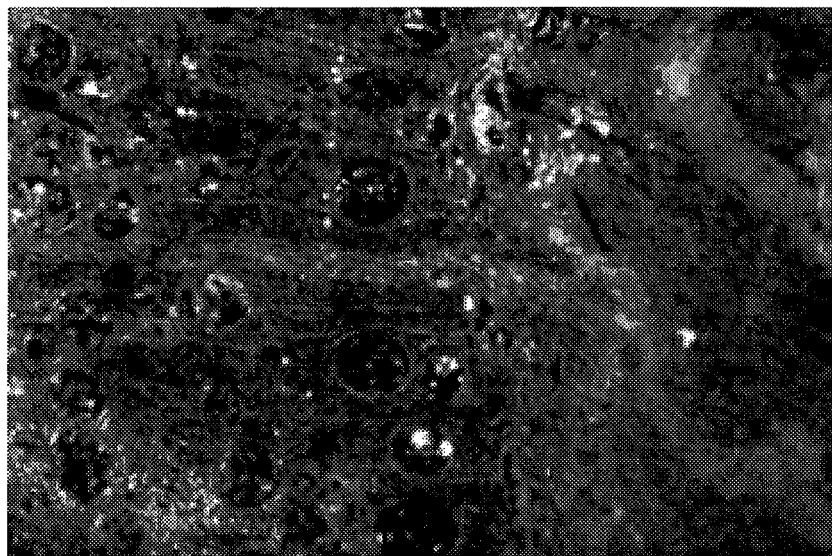


Figure 217 : limite d'aubier irrégulière, lunure et îlots de bois de coeur dans l'aubier (IDE1.13)

Dans certains cas plus rares (2 échantillons observés IDE4.4 et IDE4.3) l'aubier est absent. Dans le secteur où l'écorce est conservée, il n'apparaît pas de vaisseaux fonctionnels (fig. 218). Les vaisseaux sont duraminisés, les membranes de thylose obturent la lumière, interdisant la circulation. Les échantillons ne présentaient pas de zone d'aubier mais la conservation de la section étant incomplète, on peut supposer que celui-ci a été érodé. Les cernes conservés n'ont pas de caractéristiques propres aux blessures du cambium. Ils sont continus sur la section conservée et leur largeur (mince) ne présente pas de lobe. Les deux arbres sont morts lentement après -1065 et -1030.

Figure 218 : zone cambiale de IDE4.3 montrant un contact direct entre l'écorce et le duramen, sans observation de vaisseaux à lumière ouverte.



L'arbre IDE2.58, mort rapidement en -1033 présente des rayons ligneux très larges sur la fin de sa vie (fig. 219). Certains approchent 1 mm de largeur, c'est-à-dire plus que les cernes de la période. Les rayons larges sont également nombreux, si bien que leur surface prend une part relative très supérieure à ce qui est typiquement observé. Par ailleurs, les cernes sont particulièrement poreux, le diamètre des vaisseaux entre les zones initiale et finale ne présente plus une différence très marquée. Ceci confère au plan transversal des caractéristiques peu typiques des chênes (fig. 219).



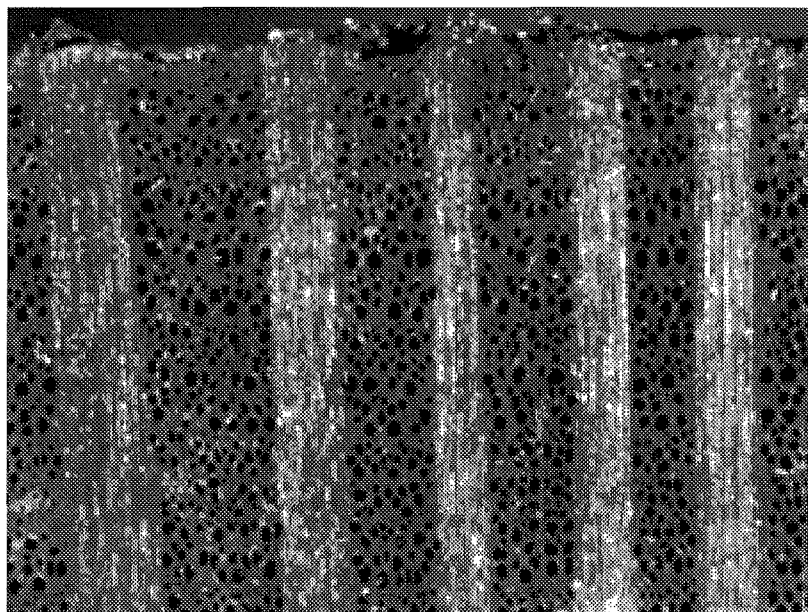


Figure 219 : aubier de l'arbre IDE2.58 présentant des rayons ligneux larges d'environ 1 mm

Les dysfonctionnements dans la transformation de l'aubier, des figures anatomiques non caractéristiques des chênes ainsi que les cernes très minces indiquent que d'une façon globale, les arbres sont dans une situation extrême. Il semble que ces individus se développent à la limite de l'aire de répartition du chêne. Les conditions du milieu qui peuvent être supposées : un sol tourbeux de plus d'1 m d'épaisseur et une nappe phréatique à une profondeur limitante, sont effectivement éloignées des conditions que l'autécologie des Chênes pédonculé et sessile suggère.

#### 4.1.2 Dates de mort des individus avec l'écorce

Lorsque l'échantillon présente l'écorce, ou des figures anatomiques équivalentes (cambium, liber), la date de sa mort est déterminée à l'année près (une approximation de quelques cernes peut être imposée dans le cas d'une mort très lente). Les informations que livrent les derniers cernes peuvent également être mises en fonction du temps.

Les datations des derniers cernes de vie des arbres sont échelonnées sur la période d'étude, il n'y a pas de coïncidence (fig. 220). Il faut donc exclure tout événement catastrophique qui aurait détruit une grande part du peuplement. L'action de phénomènes violents, comme des tempêtes, de brusques remontées de la nappe ou des inondations, sont décrites sur du matériel analogue aux troncs de Brière, en Allemagne (LEUSCHNER 1992) et en Belgique (MUNAUT 1967), cependant dans la plupart des sites, des arbres survivent et une dynamique pseudocyclique composée de périodes de plus ou moins bonnes conditions s'instaure (LEUSCHNER 1992).

Les dates de mort des arbres ne sont pas synchrones, cependant elles deviennent de plus en plus nombreuses lorsque le peuplement entre en régression, après -1050 (fig. 220). Par contre, les deux types de mort, décrits par l'allure des derniers cernes (rapide et lente), ne se distribuent pas régulièrement dans le temps. Les arbres morts lentement se distinguent par une série individuelle dont les derniers cernes sont très inférieurs à la moyenne (fig. 220). Ces cernes suivent 5 dates particulières et sont synchrones entre différentes séries. Un seul arbre meurt à la suite de -1240, 3 arbres après -1161, 5 après -1130, 2 après -1065 et 9 après -1030. La durée de formation des cernes minces est différente pour chaque individu, ce qui explique que les dates de mort ne sont pas synchrones. En moyenne, quelle que soit l'année de stress,

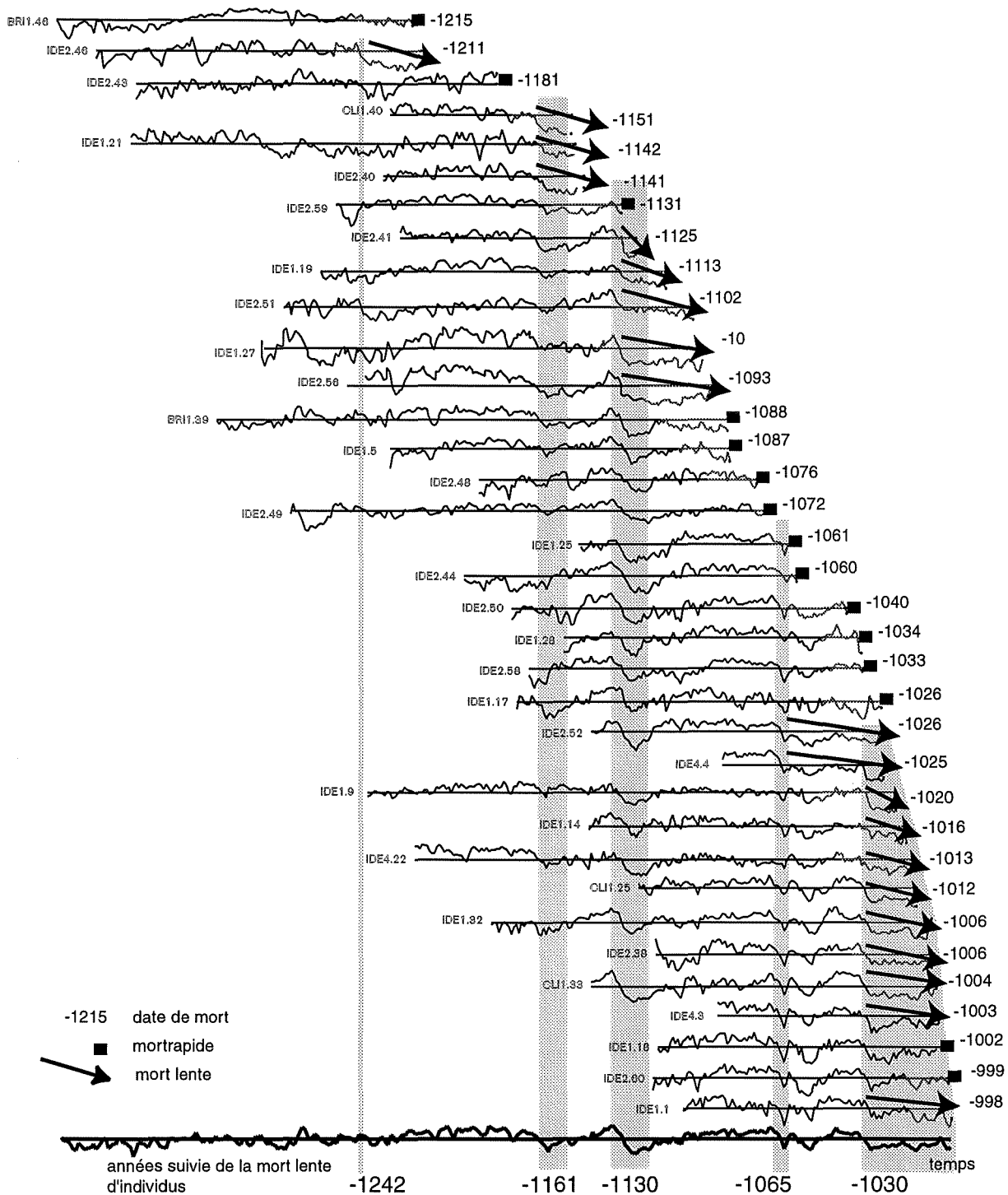


Figure 220 : séries individuelles des échantillons présentant l'écorce

24 cernes étroits sont élaborés, ce nombre variant de 5 à 40. A la suite de -1030, la dernière année de stress enregistrée, le nombre d'arbres affectés est le plus élevé mais leur croissance est plus large et le nombre de cernes avant la mort est supérieur à ceux observés dans les autres cas. A la suite de ces années le peuplement perd des individus, mais le phénomène ne prend pas un caractère catastrophique, comme un chablis collectif, tout se passe comme si le système de résistance des arbres était progressivement atteint.

Les arbres morts rapidement sont principalement concentrés entre -1088 et -1026. 10 individus sont morts sur une période de 66 ans. Il existe toujours, y compris dans les peuplements gérés actuels (LANIER *et al.* 1994), une part des arbres dont le développement n'est pas adapté aux conditions de milieu. En dehors de toute action de facteurs externes

catastrophiques, climatiques ou interventions d'insectes, ces individus peuvent disparaître. Leur mort rapide laisse toutefois penser qu'ils sont déracinés. Les chênes observés sur les sols tourbeux en Brière ont un enracinement très traçant (cf. partie 3 chap. 3). On peut aisément envisager que les arbres, qui ont un houppier ou un système racinaire qui ne sont pas adaptés, soient déracinés à des dates variables à la suite de coups de vent qui restent modestes pour les autres individus. La direction des troncs a été relevée uniquement pour quelques individus. Elle ne présente pas d'orientation particulière. Si la chute est liée à un problème de conformité de l'arbre, il est probable que celui-ci tombe dans des directions assez variées.

#### 4.2 Bloc diagramme

Les individus, dont l'écorce et la moelle ont été conservées, sont ceux dont la durée et la période de vie peuvent être situées le plus précisément. La date de germination est séparée de celle du premier cerne uniquement par le nombre de cernes perdus parce que le prélèvement est effectué à au moins 1m du collet. Le départ des racines n'est pas observable sur tous les individus mais la conicité du tronc, les noeuds ... permettent toujours de situer la base de l'arbre. Les rondelles sont extraites de la partie inférieure des troncs. L'erreur d'estimation de la date de germination est donc systématique, il est alors possible d'interpréter les résultats de façon relative.

L'état de conservation des troncs ne permet pas toujours d'observer la moelle. En effet, ce tissu peu lignifié est parfois un axe prioritaire de la dégradation. Dans ce cas, la courbure des premiers cernes et l'angle que forment les rayons proches du centre de l'arbre permettent d'estimer le nombre de cernes dégradés. La figure 221 montre que l'influence de l'estimation sur les dates des premiers cernes est peu marquée. La moelle est effectivement observée sur 68 rondelles et estimée sur 29.

L'écorce est conservée sur un nombre plus réduit (35) de rondelle. L'aubier est complet à deux exceptions près et comporte en moyenne 21 cernes. Ce nombre varie de 0 (les

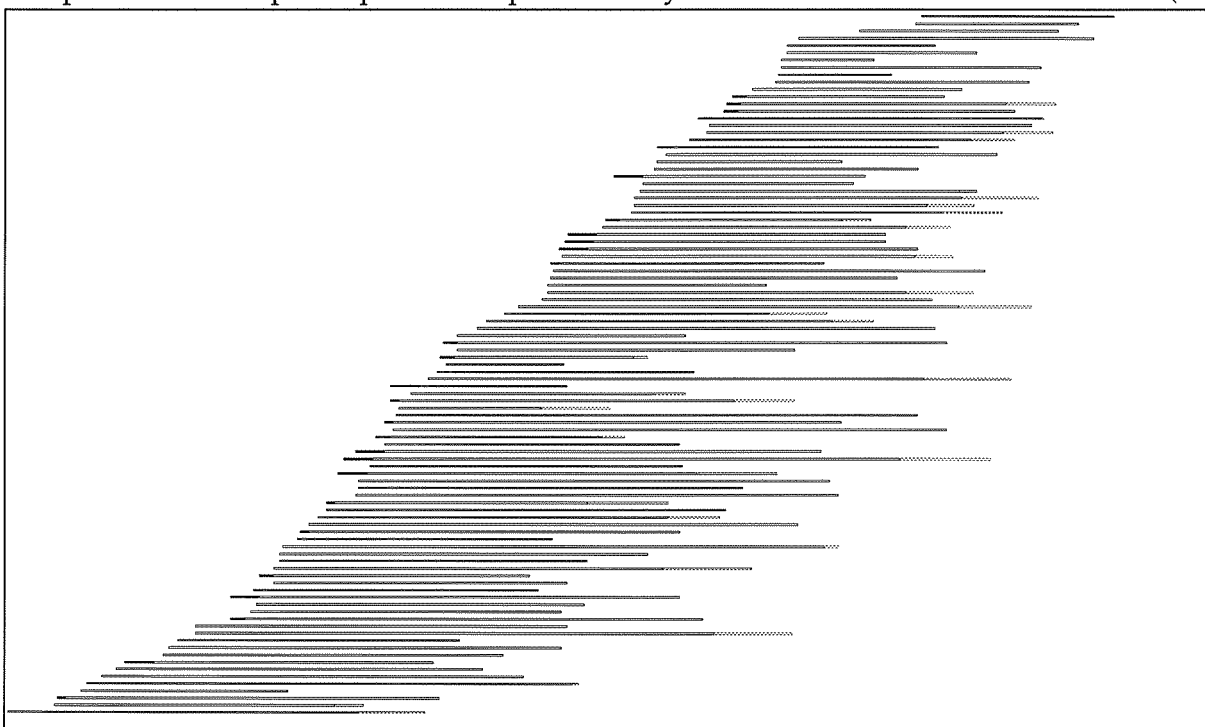


Figure 221 : bloc diagramme ordonné par la date du premier cerne observé

2 cas où l'écorce fait directement suite au duramen) à 37 avec un écart-type de 11 cerne. La transformation de l'aubier en bois de coeur est imparfaite, sur le même arbre, le nombre de cerne peut varier d'une dizaine (dans ce cas un nombre moyen est saisi), cependant les 35 échantillons complets livrent un nombre de cerne d'aubier proche de la fourchette utilisée pour la datation du matériel archéologique :  $25 \pm 10$  (LAMBERT *et al.* 1988).

Les arbres ne présentent pas tous l'aubier, si l'on veut comparer les dates de leur fin de vie, ils doivent être ordonnés par l'année de formation du dernier cerne de bois de coeur (fig. 222). Ceci revient à considérer que seul l'aubier manque sur les rondelles érodées. La fourchette d'estimation permet de proposer une date de la mort de l'arbre. Cependant, la perte de bois de coeur ne peut être évaluée, on peut seulement supposer que les arbres n'ayant pas subi de taille, ils n'ont perdu que quelques cerne périphériques. Les séries des rondelles où l'écorce est conservée sont également ordonnées sur la date du dernier cerne de bois de coeur. Les décalages entre les dates exactes de la mort de ces individus sont liées à la variation du nombre de cerne d'aubier, ils montrent l'ampleur de l'erreur le long de la chronologie (fig. 222).

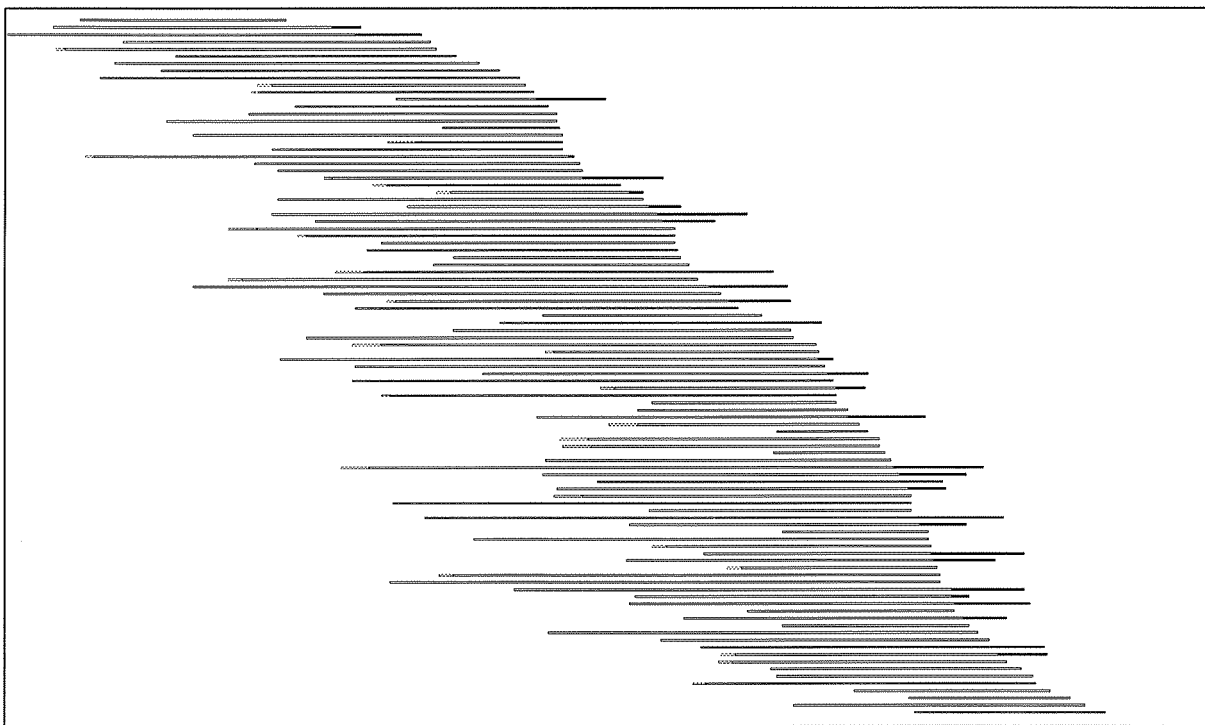


Figure 222 : bloc diagramme ordonné par la date du dernier cerne de bois de coeur

Les deux sous-ensembles, rondelles avec écorce et rondelles sans écorce fournissent deux chronologies des dates de mort : l'une est très précise sur l'axe du temps mais peut comporter des périodes de sous-échantillonnage, la seconde repose sur plus d'échantillons mais comporte une erreur dans le temps. Pour rendre les chronologies comparables, elles sont exprimées en fréquence (% du nombre total). La figure 223 montre que les dates de mort exactes en fonction du temps sont très souvent incluses dans l'estimation faite à partir du bois de coeur, ce qui tend à montrer que les deux sous ensembles représentent bien la même chronologie. C'est également un argument pour considérer que les variations du nombre d'arbres morts en fonction du temps ne sont pas liées au hasard.

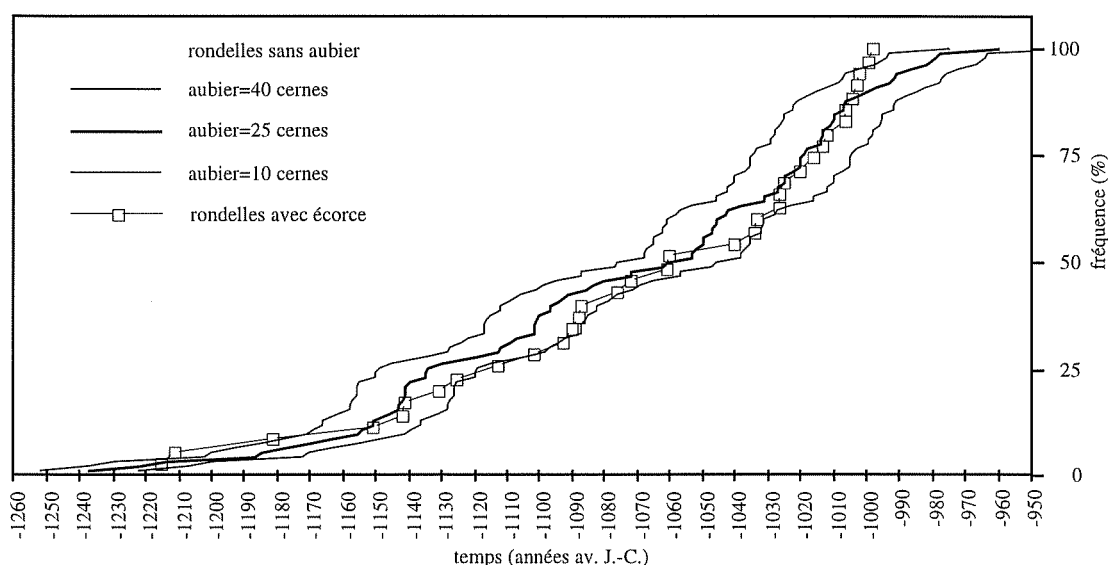


Figure 223 : chronologie de la mort des chênes estimée à l'aide des rondelles avec écorce et sans écorce, après estimation de l'aubier à  $25 \pm 10$  cernes

### 4.3 Dynamique du peuplement

Les blocs diagrammes qui viennent d'être décrits sont transformés en une chronologie des germinations et une des dates de mort qui précisent les remarques faites directement sur la couverture (fig. 224). L'ajustement linéaire indique l'évolution de base. Dans un premier temps, de -1358 à -1270, le peuplement est en phase pionnière. Les germinations sont peu nombreuses et quelques individus meurent. Après -1270, la pente de la courbe de germination dépasse celle de l'évolution de base, les chênes colonisent le milieu jusque vers -1200. A partir de cette date la courbe suit la pente moyenne. Le renouvellement du peuplement est alors probablement stable. Par contre, le nombre de mort est alternativement plus lent et plus rapide que l'accroissement moyen. Sans jamais être parfaitement synchrones, il semble qu'à deux reprises entre -1150 et -1060 le nombre de morts s'accélère. La chênaie est à son développement maximal mais elle n'atteint pas un état stable. La chronologie est construite avec tous les individus, y compris ceux qui ne conservaient pas d'aubier. En n'utilisant que les échantillons où l'écorce est présente, les dates apparaissent sous-évaluées puisque les cernes avec cambium se répartissent le long de l'estimation maximale (40 cernes d'aubier) (fig. 223). L'érosion de quelques cernes de bois de coeur explique probablement le décalage. Cependant, les deux courbes suggèrent un caractère oscillatoire. Les accélérations de la mortalité peuvent être mises en rapport avec les séquences de cernes minces (fig. 225). Les arbres qui ont conservés leur écorce meurent en moyenne 24 ans après l'année de stress, ce qui explique le décalage entre la séquence de petits cernes et l'augmentation de la mortalité. La dynamique du peuplement, même à son développement maximal, semble donc liée à l'influence de facteurs annuels ou affectant la croissance quelques années.

La régression de la chênaie s'amorce à partir de -1090 par un déficit des germinations puis les conditions extrêmes de croissance qui se traduisent par les séries de cernes étroits de -1065 et -1030 sont suivies de l'augmentation de la mortalité jusque vers -1000. Les arbres probablement devenus rares se trouvent à nouveau dans une situation de pionniers jusqu'au plus tard vers 950 à 940 av. J.-C.

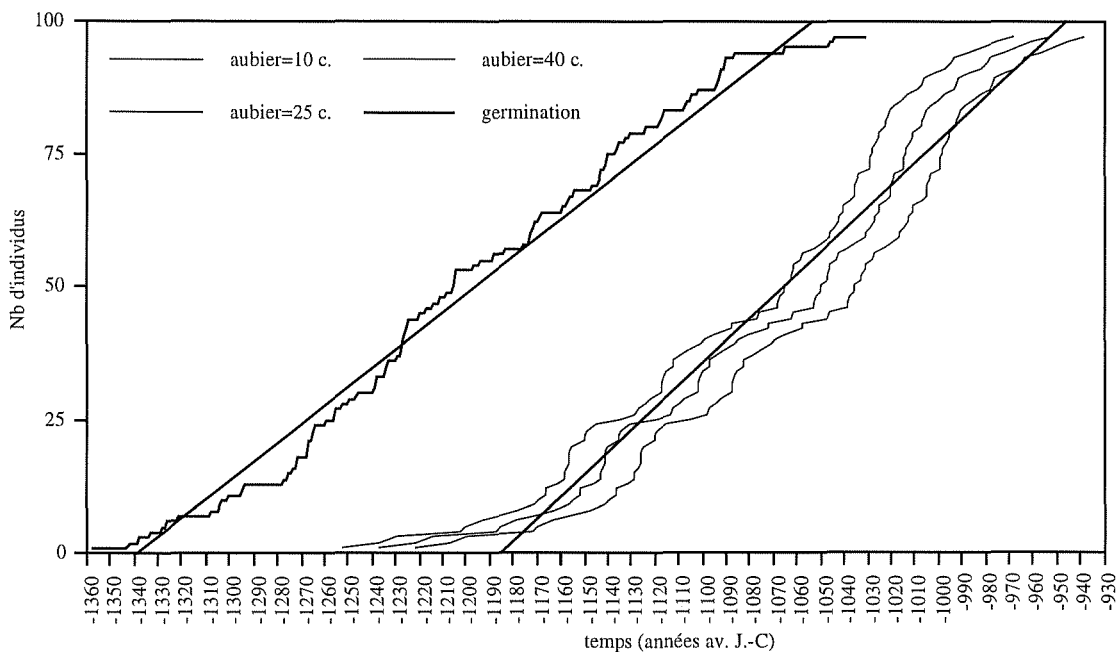


Figure 224 : nombre de germinations et de morts cumulées en fonction du temps

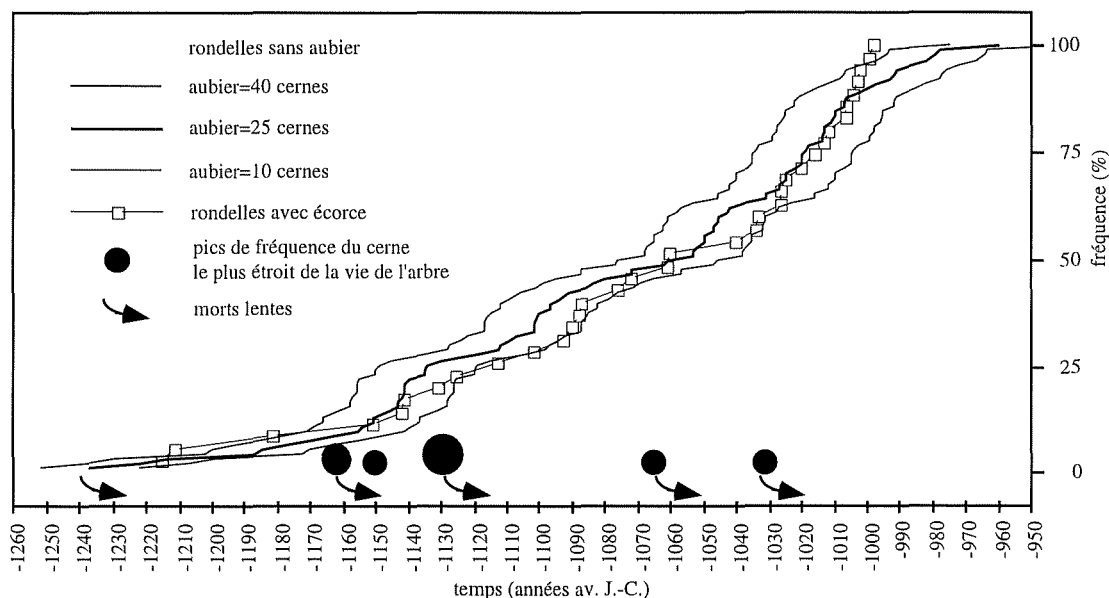


Figure 225 : comparaison de la chronologie de la mort des arbres et des changements brusque de croissance

#### 4.4 Dynamique du peuplement et loi de sénescence

##### 4.4.1 Loi de sénescence des chênes en Brière vers -1000

Les analyses de la croissance des arbres actuels ont montrées pour plusieurs espèces que la loi de sénescence ou "courbe âge" est différente selon la sylviculture pratiquée (BERT 1992, BADEAU 1995). Pour le Chêne, nous avons pu vérifier que le traitement en Taillis-Sous-Futaie (TSF) des forêts de Franche-Comté (principalement de la FD de Chaux) se traduisait par une loi de sénescence différente de celle des forêts de Lorraine traitées en futaies depuis des dates plus anciennes (cf. partie 3 chap. 3). Ces lois tendent à montrer que les interventions régulières au cours de la vie de l'arbre influencent leur production moyenne en fonction de l'âge. Par son action, la sylviculture gère la compétition entre les arbres dans divers buts de production. Lorsque le peuplement est très peu géré, comme c'est actuellement le cas en Brière pour les chênes colonisant des milieux ouverts, la densité des arbres croît très vite et limite la croissance (cf. partie 3 chap. 3).

Les courbes établies dans les diverses situations, où les variations de densité ou de compétition entre les arbres peuvent être retracées, montrent un lien entre l'ouverture du peuplement et la production moyenne en fonction de l'âge. Ces courbes peuvent servir de modèle pour tenter d'expliquer les variations observées lorsque les interventions ne sont pas connues, dans les peuplements naturels comme en Brière ou sur les sites archéologiques.

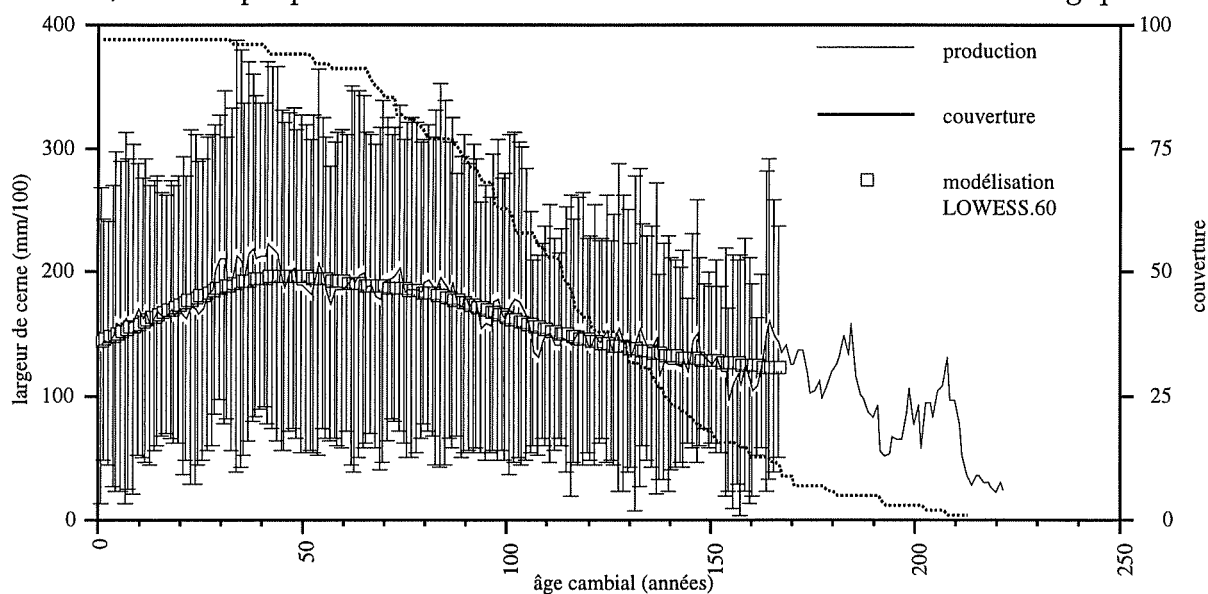


Figure 226 : variation de la largeur de cerne en fonction de l'âge cambial (loi de sénescence) des chênes de Brière. Barre : écart-type

La courbe de sénescence des chênes de Brière est obtenue en calculant la production moyenne en fonction de l'âge cambial (cf. partie 3 chap. 3). Elle est constituée à partir des 97 individus datés (fig. 226). La couverture diminue progressivement, la moyenne est calculée pour 4 individus au minimum et l'écart-type pour au moins 10 individus. Ils sont stables jusqu'à un âge cambial d'environ 150 ans. Les variations observées pour les quelques arbres plus âgés ne peuvent être prises en considération. L'écart-type est pour tous les âges élevé car la tendance (liée aux séries de cernes étroits) joue un rôle très important dans la chronologie. La moyenne subit des variations aléatoires sur quelques années que la modélisation LOWESS (cf. partie 2 chap. 1), utilisant 60 cernes voisins, permet de lisser.

La courbe peut être divisée en deux périodes qui sont observables aussi bien sur la moyenne et sa modélisation que dans l'écart-type. Avant un âge cambial d'environ 40 à 60 ans, la production est progressivement accrue puis elle diminue. L'écart-type suit les mêmes variations mais diminue de façon plus évidente lorsque l'âge dépasse 100 ans. La largeur moyenne dans les premières années est proche de 140 mm/100, elle atteint un maximum en valeur brute de 222 mm/100 à 43 ans et après lissage, l'augmentation de la production moyenne est de 37%. A 150 ans la largeur est proche de 130 mm/100 soit une diminution de 35% en environ 100 ans.

L'augmentation de l'âge explique une grande part de la perte de production. Toutefois, la modélisation réalisée sur un très grand nombre d'arbres en Lorraine (BECKER *et al.* 1994), qui représente au mieux l'influence de l'âge sur la largeur de cerne pour le Chêne (cf. partie 3 chap. 3), montre une perte de production régulière, et n'explique pas totalement les variations observées ici.

Les lois de sénescence comportent le plus de différences avant un âge de 50 ans (fig. 227), c'est-à-dire durant la période où l'arbre doit acquérir son statut au sein du peuplement (LANIER *et al.* 1994). Il est peu probable que ces variations soient uniquement liées à l'âge. Les modifications de la densité du peuplement, régulières au cours de la chronologie, qu'elles

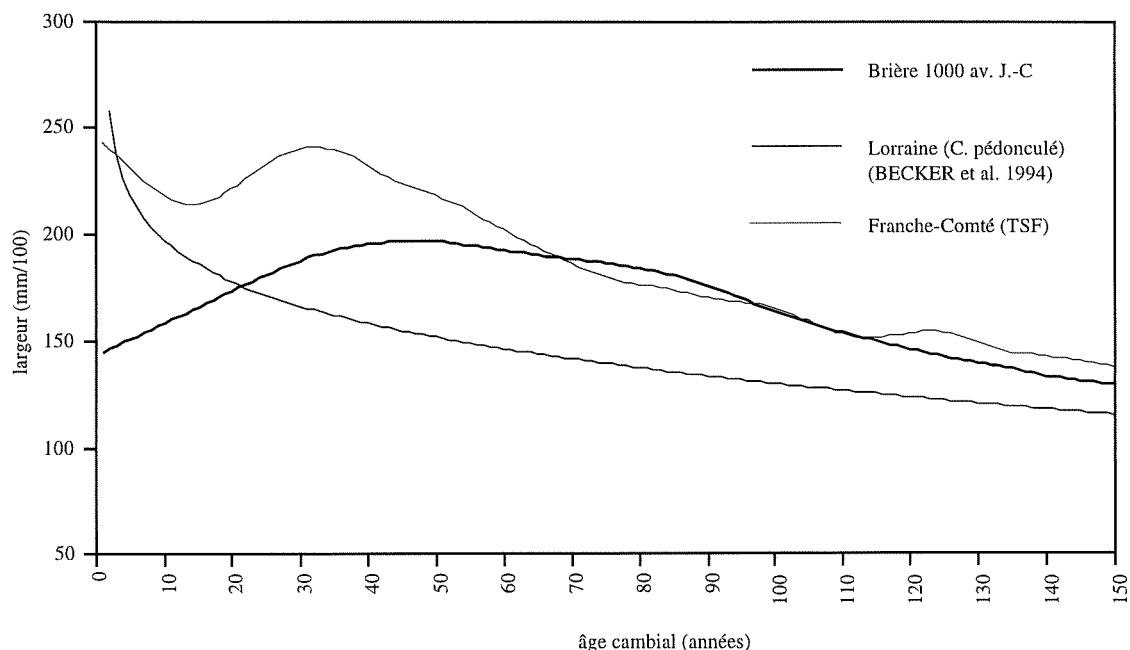
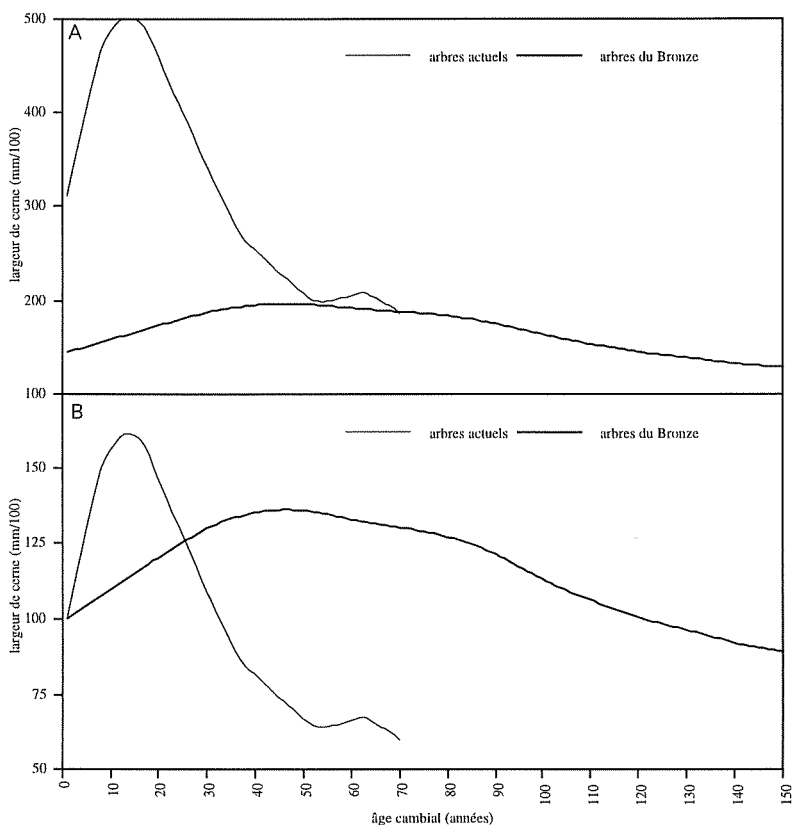


Figure 227 : comparaison des lois de sénescence en Brière vers -1000 et dans les forêts actuelles en Lorraine et en Franche-Comté

soient en lien avec des interventions sylvicoles ou la dynamique naturelle, expliquent très probablement en partie ces différences. C'est le cas entre les futaies lorraines et les TSF franc-comtois (cf. partie 3 chap. 3).

La production dans le peuplement en Brière avant -1000 est inférieure à celle des futaies lorraines jusqu'à un âge proche de 20 ans puis lorsqu'elle atteint son maximum, vers 50 ans, elle rejoint la courbe des TSF (fig. 227). L'augmentation de la largeur peut s'expliquer par une acquisition progressive d'un statut de l'arbre plus favorable. Les chênes semblent subir une concurrence pendant leur jeunesse dont il doivent se dégager pour atteindre la strate élevée. La position hiérarchique des arbres ne peut être déterminée précisément. Les



troncs analysés peuvent provenir indifféremment d'arbres dominés, co-dominants ou dominants, mais, en moyenne, il semble que 50 ans soient nécessaires pour que l'arbre acquiert une position stable. A partir de cet âge, les courbes sont beaucoup plus similaires, les phénomènes de concurrence sont moins intenses et la sénescence prend une plus grande part.

Figure 228 : comparaison des lois de sénescence en Brière vers -1000 et dans les jeunes forêts actuelles sur sols tourbeux. A : valeurs brutes (mm/100), B : valeurs relative, pourcentage de la largeur à 1 an



---

La courbe présente une allure commune avec celle observée pour les arbres vivant actuellement sur les sols tourbeux en Brière (fig. 228B). Les ordres de grandeur sont toutefois très différents (fig. 228A). Les peuplements actuels se développent en colonisant des milieux très ouverts, en rencontrant une compétition qui est parfois limitée aux plantes herbacées (cf. partie 3 chap. 3). L'acquisition du statut de dominant est alors très rapide (environ 15 ans).

Les données palynologiques suggèrent le déclin de l'Aulne avant le développement de la chênaie ainsi qu'une ouverture du milieu, par l'augmentation des pollens de *Betula*, de *Salix*, de *Fraxinus*, ou de *Rhamnus* et *Myrica* (VISSET *et al.* 1994). Cependant les milieux colonisés ne devaient pas être aussi proches de formations herbacées qu'aujourd'hui puisque les pollens de Poacées et de façon plus générale d'herbacées (NAP) n'augmentent pas (cf. fig. 204). La colonisation des chênes s'est donc probablement déroulée dans des conditions moins favorables qui peuvent expliquer que l'acquisition d'un statut stable prenne 50 ans. La pression anthropique canalisait le Chêne jusqu'à très récemment en Brière. La libération de cette contrainte, localement (dans des situations de difficulté de la mise en valeur des sols, cf. partie 3 chap. 2) et la conjonction de niveaux d'eau favorables induisent une explosion de la croissance des chênes. La largeur moyenne pour toutes les stations s'élève à 375 mm/100 et le maximum de production, 501 mm/100, est atteint à 15 ans. A l'âge du Bronze, la dynamique naturelle induit une transition des peuplements moins brutale, où les formations d'arbustes ou de forêts peu denses prennent une plus grande part. Les analyses polliniques montrent localement, dans les marais de la Crôle (Haut Brivet), une augmentation des indices d'anthropisation (espèces liées aux activités humaines, céréales, rudérales ...) mais dont le plein développement est postérieur à l'âge du Bronze (Gallo-Romain) (VISSET et WILLKOMM 1988). On peut donc supposer que les activités des sociétés humaines sont assez éloignées des zones de prélèvements dendrochronologiques, d'Ile d'Errand par exemple.

Les traitements en futaie et TSF des chênes en Lorraine et en Franche-Comté se traduisent par une production en diamètre en faveur du TSF (fig. 227). Après la mise en place de la hiérarchie, la croissance en Brière à l'âge du Bronze est proche de celle observée dans les TSF. Elle tend à être inférieure après 120 ans mais elle reste systématiquement supérieure à celle des futaies. Par rapport aux arbres vivants de Brière, la croissance moyenne assure de l'état forestier de la formation mais elle correspond à une densité d'arbres matures faible, probablement plus proche de celle d'un TSF, où les arbres dominants ne sont pas toujours en contact, que d'une futaie (ceci ne doit pas être pris pour un argument en faveur d'un état naturel du TSF, qui est un système de gestion où les coupes fortes sont traumatiques pour le peuplement (LANIER *et al.* 1994)). Les dates de mort des arbres tendent à montrer que la chênaie n'atteint pas de véritable période de stabilité. La croissance moyenne en fonction de l'âge élevée montrerait également un peuplement peu dense, gardant un caractère dynamique. Enfin dans ce peuplement, les jeunes chênes doivent s'extraire d'une strate arbustive probablement serrée.

#### 4.4.2 Lois de sénescence de peuplements non gérés

La chênaie de Brière est un peuplement non géré qui subit très probablement une fréquentation humaine mais les activités de cette population ne laissent pas de marque dans la végétation que pourrait montrer la palynologie. La loi de sénescence des chênes de Brière a été comparée à celle d'arbres actuels qui sont nécessairement dans des peuplements gérés. L'influence de la gestion sur la loi de sénescence est bien mise en évidence (BERT 1992, BADEAU 1995). Deux lots d'arbres qui peuvent être considérés également en dehors d'interventions humaines régulières livrent des lois de sénescence qui présentent des différences avec celle du peuplement de Brière.

Des troncs de Chêne (et de Pin) attribuables au Mésolithique ont été découverts en sédimentation naturelle dans des paléo-chenaux de la vallée de la Seine à Noyen (77) (MORDANT et MORDANT 1989). La croissance de 40 individus a été analysée par C. LAVIER (Laboratoire de Chrono-écologie). La chronologie moyenne du site, comportant 14 échantillons, n'a pu être synchronisée sur aucune référence. Par contre, elle présente une corrélation significative avec une chronologie moyenne, constituée de 5 arbres, provenant du site de Louviers (BERNARD 1997). La moyenne résultante reste toujours non datée. Deux datations  $^{14}\text{C}$  permettent de situer les séries vers (GIF-6632)  $8020 \pm 100$  BP soit [7261-6597] cal. BC et (GIF-6631)  $7990 \pm 100$  BP soit [7247-6556] cal. BC (BERNARD 1997).

Ces datations permettent de faire l'hypothèse que, de façon globale, l'impact humain sur le peuplement est très faible. Les indices archéologiques proches des arbres indiquent une activité humaine mais ne montrent pas un impact localement élevé du groupe humain (MORDANT et MORDANT 1989).

La croissance en fonction de l'âge de 34 des individus montre une diversité assez forte, l'écart-type subit des variations rapides qui peuvent être rapprochées du faible nombre d'arbres (fig. 229). De même, des variations aléatoires du niveau moyen sont liées au sous-échantillonnage. La modélisation LOWESS (30 cernes voisins) permet toutefois de lisser ces effets et de dégager la tendance. Lorsque l'âge passe de 1 à 25 ans, la croissance est progressivement plus large puis elle décroît jusqu'à la limite des observations. L'augmentation ne représente que 20% de la largeur initiale et l'écart-type est très ample, ce qui fait penser qu'une grande diversité de situation existe.

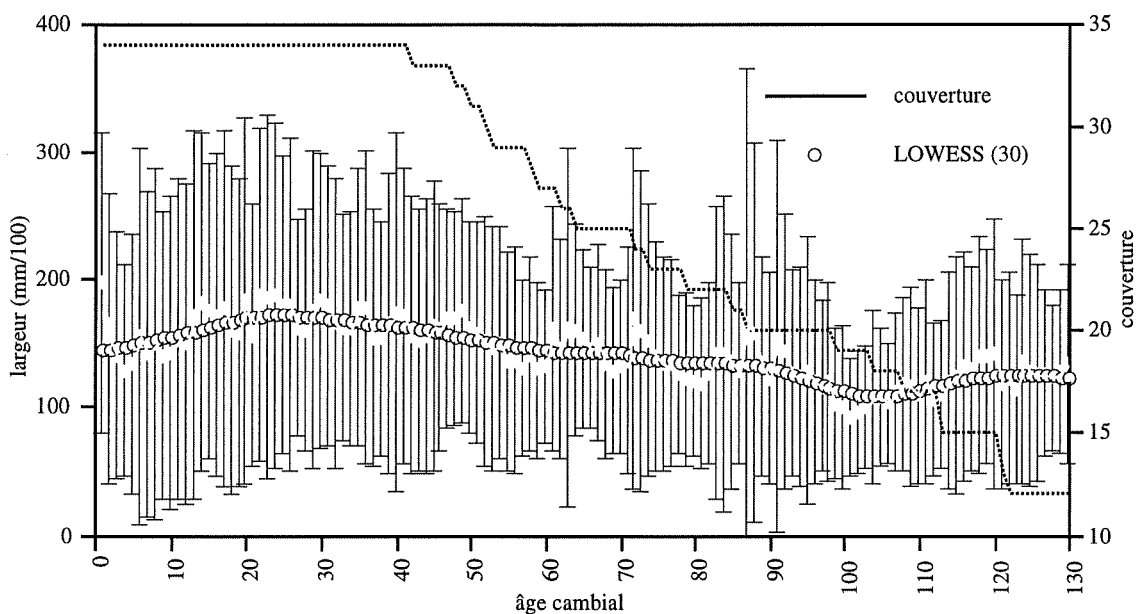


Figure 229 : loi de sénescence d'arbres du Mésolithique, [7261-6597] cal. BC et [7247-6556] cal. BC, à Noyen. Barre : écart type

A l'occasion de travaux de curage de la rivière, les marais du Haut Brivet (communes de Drefféac et Sainte-Anne-sur-Brivet (44)) ont livré des mortas. Trois datations  $^{14}\text{C}$  permettent de situer les trois chronologies indépendantes issues de l'analyse de ces arbres qui n'ont pu être synchronisées avec une référence : [4759-4349] cal. BC, [4544-4153] cal. BC, et [3691-3341] cal. BC. Ces mortas peuvent être rapprochés de la première génération de chênes qui se développe sur les sols argileux (dessalés) de Brière à une date plus récente : 2800 à 2200 av. J.-C. (cf. partie 1 chap. 2, VISSET 1979, 1982). L'âge plus ancien des arbres peut être expliqué par deux hypothèses complémentaires. D'une part, les gisements découverts sont localisés en bordure du marais et il peut être supposé qu'une part des individus provient du versant, haut d'une quinzaine de mètres, qui sépare le marais des terres élevées

environnantes. Ces arbres font donc partie de la végétation "régionale" peu influencée par les variations du niveau de la nappe. D'autre part, l'analyse palynologique d'un sondage proche des gisements de troncs (Marais de la Crôle) indique que la sédimentation marine s'arrête après [5285-4915] cal. BC et que la tourbification, qui lui fait suite dans toute la cuvette, débute avant [2180-1780] cal. BC (KI-2317 et KI-2399, VISSET et WILLKOMM 1988). Entre ces deux dates, un hiatus de sédimentation est observé. Par comparaison, la sédimentation argileuse marine s'arrête à Ile d'Errand après [3666-2885] cal. BC (cf. partie 1 tab. 12). Il est donc possible que la période de conditions favorables à l'extension de la première génération de chêne soit plus étendue dans le temps à une altitude légèrement supérieure dans le Haut Brivet qu'en Brière. Ces indices montrent que le peuplement de chênes du Haut Brivet est beaucoup plus pérenne que la deuxième génération près d'Ile d'Errand.

Les indices d'anthropisation et de mise en culture sont diversifiés et prennent une part importante de la représentation pollinique (*Plantago*, *Rumex*, *Chenopodiaceae*, *Compositae tubuliflorae*, *Cerealía*, *Cannabis*, *Fagopyrum*, puis *Linum*) après la date [240-585] cal. AD (KI-2315, VISSET et WILLKOMM 1988) c'est-à-dire très nettement après les datations des mortas. Cette intense occupation depuis le Haut Moyen Age est également montrée par le mobilier archéologique dont de nombreuses pirogues (DEVALS 1995, 1997, GIRARDCLOS *et al.* 1997). Les restes du Néolithique sont plus ténus et permettent de supposer que le peuplement de Chêne ne subit pas une pression anthropique importante.

Parmi les arbres prélevés dans les marais du Haut Brivet, l'estimation de l'âge du premier cerne conservé de 31 individus a été réalisée où la moelle était présente. La courbe d'âge construite avec ces séries présente une variabilité en fonction du temps qui est inférieure et plus stable que celle observée pour les arbres de Brière ou de Noyen (fig. 229). Le niveau moyen apparaît également stable. La production est légèrement croissante pendant les 15 premières années puis elle décroît régulièrement jusqu'à la fin des observations. L'augmentation reste faible, elle représente 10% de la valeur initiale, alors que pendant cette période, l'écart-type est nettement plus élevé que lorsque les arbres sont matures (fig. 230). La diversité des largeurs avant 15 ans est le caractère principale de la loi de sénescence.

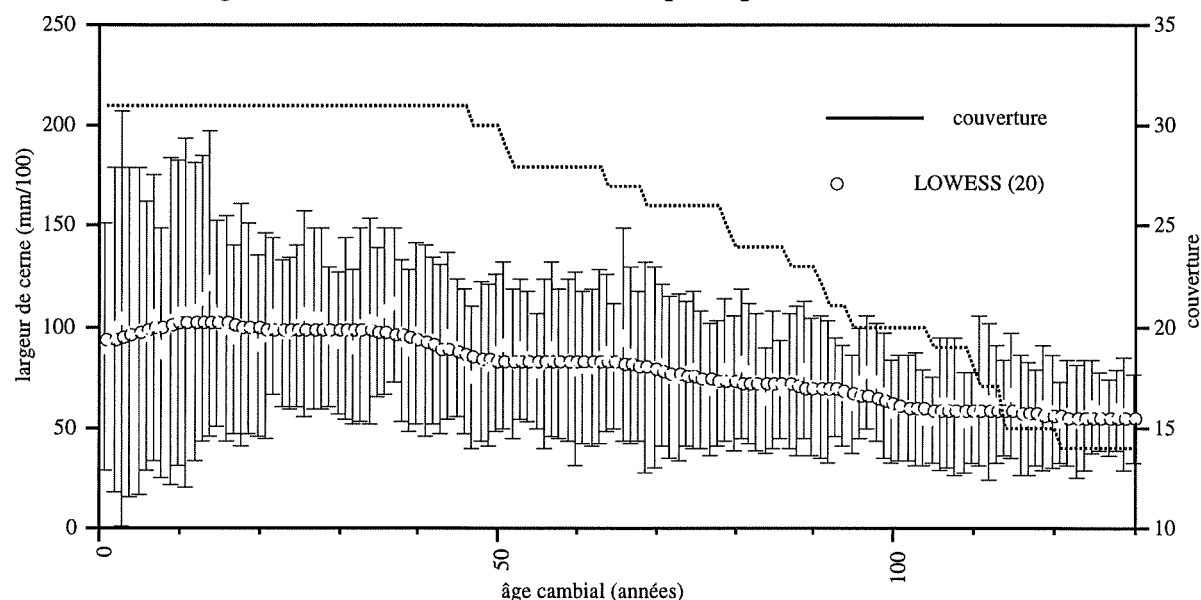


Figure 230 : loi de sénescence d'arbres du Néolithique ([4759-3341] cal. BC) provenant des marais du Haut Brivet

Les différentes courbes d'âge des peuplements non gérés sont constituées de deux parties (fig. 231). On peut également rapprocher de ces courbes celle obtenue pour les chênes actuels de Brière également non gérés. Dans un premier temps, la production augmente puis elle décroît en tendant vers une limite. La forme de la courbe présente des points communs

entre les lots mais l'ampleur et la durée de l'augmentation sont très variables. La production des arbres matures est également à un niveau différent selon les peuplements.

Pour les arbres vivants de Brière l'augmentation est la plus rapide et la plus élevée. C'est probablement les individus qui rencontrent les conditions les plus favorables à leur développement au début de leur vie. Mais la perte de croissance après le maximum est très rapide et la production à 50 ans rejoint celle des forêts en TSF et de Brière à l'âge du Bronze. A cette période, l'augmentation est forte mais le maximum est atteint très tardivement, entre 40 et 50 ans. L'état forestier n'a probablement pas été perdu et les chênes subissent une concurrence dont il mettent plus de temps à s'affranchir. A Noyen, l'augmentation est perceptible et dans le Haut Brivet, en moyenne les cernes sont plus larges mais la diversité prime. La pérennité du peuplement du Haut Brivet permet de supposer que celui-ci est le plus stable. La phase d'accroissement de la largeur moins marquée et plus diversifiée peut être mise en relation avec de nombreux types de concurrence que rencontrent les jeunes arbres. Le peuplement, s'il est stable dans son ensemble, pour se renouveler subit des perturbations locales. Ces perturbations sont observées dans la dynamique naturelle de peuplements actuels reliques (LANIER *et al.* 1994). Il se présenterait alors comme une mosaïque de secteurs où la concurrence prend des formes différentes. Dans une ouverture, la croissance des jeunes est favorisée alors que très proche, la densité est élevée et les jeunes doivent lutter pour s'imposer. La courbe du site de Noyen montre également cette diversité. L'observation a déjà été exposée par d'autres méthodes par BERNARD (1997), mais une situation type, où l'acquisition du statut nécessite 25 ans, semble prédominante. Ces arbres sont issus d'un milieu alluvial qui présente par nature une instabilité liée aux inondations (cf. BERNARD 1997) qui est peut être responsable de l'instauration d'une compétition type.

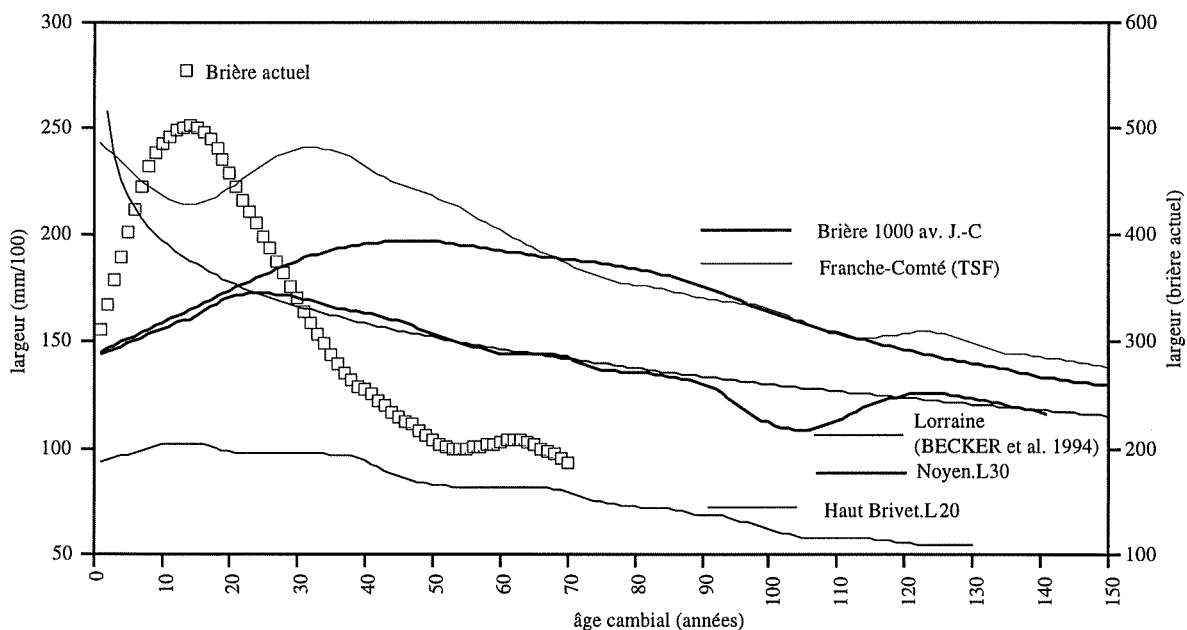


Figure 231 : comparaison des lois de sénescence construites

Inversement, la chênaie de Brière est probablement instable sous l'influence de facteurs naturels. L'évolution du milieu semble induire cette instabilité. La variation, sur un terme de quelques centaines d'années, des altitudes du cycle annuel de la nappe phréatique est responsable de la transformation de l'Aulnaie en une formation riche en Chêne. L'instabilité induit que les jeunes arbres subissent une concurrence type, il leur faut en moyenne 40 à 50 ans pour se dégager de cette concurrence. Par analogie, c'est également le cas pour les chênes vivants de Brière et pour les arbres des TSF mais la source de l'instabilité n'est pas naturelle. La compétition en futaie est plus régulière le long de la vie de l'arbre, dès son jeune âge grâce aux interventions rapprochées dans le temps et limitées en volume. La

---

courbe, avec une échelle différente, puisque la sélection facilite l'acquisition du statut, s'approche de celle du peuplement stable.

Ces conclusions permettent d'expliquer les différences observées entre les lois de sénescence et sont étayées soit par l'observation des peuplements vivants soit par la palynologie. Toutefois peu de publications présentent actuellement des lois de sénescence d'arbre anciens. BRIFFA *et al.* (1996) ont construits des courbes d'âge, dans un but de standardisation (regional curve standardization), pour le Pin sylvestre et le Mélèze de Sibérie dans les forêts de hautes latitudes. Ils observent que la croissance des jeunes mélèzes actuels est plus rapide puis devient plus lente que celle des individus subfossiles (XVIII<sup>e</sup> siècle). Ils attribuent cette différence à une compétition plus forte pour les arbres actuels. Ils signalent également que des déséquilibres d'échantillonnage (en fonction de l'altitude) peuvent introduire des biais dans la courbe. De plus, les arbres provenant tous d'une période assez courte, environ 300 ans, la courbe peut également être affectée par des conditions climatiques à très long terme... Enfin, le niveau de production en fonction de l'âge est certes influencé par la dynamique du peuplement mais également par la richesse du milieu. La forêt Mésolithique de Noyen est probablement plus instable mais elle est également avantagée par la richesse des sols alluviaux. Ceci explique peut être que la production des arbres matures est supérieure à celle observée dans les marais du Haut Brivet (fig. 231). Actuellement, la production du Sapin dans les Vosges est inférieure à celle observée dans le Jura (BERT 1992). Les conditions climatiques et de sol plus favorable dans le Jura expliquent peut-être le décalage (BERT 1992). La diversité des facteurs influençant la croissance n'est pas à démontrer. Toutefois, les analyses dendroécologiques du Chêne, en Lorraine, montrent, par stratification d'un vaste échantillon, que la production est particulièrement sensible à la surface ou au volume du houppier de l'individu, c'est-à-dire à des caractéristiques liées à la compétition (NIEMINEN 1988). Alors que, l'influence de facteur du milieu, comme la réserve utile en eau du sol, ne permet pas une stratification facile (NIEMINEN 1988). Il est évident que les points de comparaison sont actuellement peu nombreux et très diversifiés, mais seules des comparaisons avec d'autres lots permettront d'infirmer ou de vérifier le rôle de la compétition sur la courbe d'âge.

## 5 Information paléo - hydrologique

L'information paléo-hydrologique apportée par les chênes de Brière se divise en deux termes. L'existence du peuplement et les variations du nombre d'arbres fournissent une information possédant une longue période (environ 500 ans), alors que les variations de la largeur du cerne s'observent sur quelques dizaines d'années.

### 5.1 Variations à long terme

Les chênes pionniers apparaissent avant -1350 mais le développement de la chênaie est le plus marqué après -1275. Le niveau de la nappe actuellement suit un cycle annuel dont l'amplitude dépasse 60 cm en moyenne dans les enregistrements d'Ile Fédrun (BOULET 1992). Il est très probable que les niveaux anciens ont également été différents selon les saisons, en fonction du bilan hydrique. L'augmentation (ou la baisse) à long terme, qui peut être responsable de l'évolution du peuplement porte en fait sur ce cycle, qu'elle a pu atteindre complètement ou partiellement. La dynamique de la nappe dans le bassin est très complexe, en fonction des zones de circulation préférentielle, de la rétention des sols, de l'évapotranspiration des peuplements et de l'évaporation des zones libres... Donc même si nous avons pu observer des chênes vivants sur des sols tourbeux dépassant 1,5 m de

---

puissance qui sont dans des conditions proches de celles de l'âge du Bronze, nous ne pouvons estimer l'altitude maximale de la nappe qui autoriserait l'installation du Chêne. A titre d'ordre d'idée, nous avons relevé que les stations étaient inondées en février 1995. Des traces de crues sur les troncs et sur les sols montrent qu'elles le sont très régulièrement, voire annuellement et la nappe au mois de juillet 1996 se trouvait au moins à 35 cm de profondeur (cf. partie 3 chap. 3).

Lorsque la chênaie s'installe, de -1275 à -1050, on peut toutefois penser que le niveau est en moyenne relativement plus bas qu'antérieurement et postérieurement. L'augmentation du niveau d'eau induit le déclin de la chênaie à partir de -1050 et sa disparition au plus tard vers -950.

Le nombre de chênes provenant des zones tourbeuses dans les îles britanniques ou en Basse Saxe, présente des variations très importantes en fonction du temps. Certaines périodes sont très riches et d'autres n'ont fourni que quelques individus qui assurent la continuité des références. Un déclin du nombre de chênes de -1050 à -950 est également observé dans les îles britanniques (PILCHER *et al.* 1996). Les chronologies irlandaises doivent être assemblées à celles d'Angleterre pour franchir l'années 948 av. J.-C. (PILCHER *et al.* 1996). Des indices polliniques de la même période indiquent une augmentation des tourbières en couverture et une baisse des pollens d'arbres (PILCHER 1990). La coïncidence entre une diminution du nombre de chênes subfossiles et des changements de la représentation pollinique de la végétation peut être faite pour 3 autres périodes : 3900 av. J.-C., 2400-2600 av. J.-C. et 1900 av. J.-C. (PILCHER 1990), qui pourraient correspondre à une intensification du caractère océanique du climat des îles Britanniques (PILCHER *et al.* 1996).

L'occurrence des chênes subfossiles en Basse Saxe présente également des variations communes entre des tourbières différentes. Elles font penser qu'à certaines périodes, le climat est responsable d'une inondation prolongée ou plus intense qui accentue l'asphyxie des chênes qui sont remplacés par des aulnes (LEUSCHNER *et al.* 1987). Des diminutions sont sensibles entre -5000 et -4500, entre -1800 et -1500, entre -400 et -100 et entre 300 et 500 après J.-C (LEUSCHNER *et al.* 1987). Mais le nombre d'arbres n'indique pas l'engorgement des tourbières après -1000.

L'apparition de la seconde génération de chênes en Brière est associée au déclin de l'aulnaie et sa disparition au retour de l'Aulne ce qui inscrit l'existence de la chênaie dans un cycle plus long. La première génération de chêne se développe après l'arrêt de la sédimentation marine et disparaît également au profit d'une aulnaie. La succession des peuplements de la cuvette retracée par la palynologie montre nettement qu'ils sont influencés par les variations du niveau de la nappe (cf. fig. 205). Cependant, la valeur régionale ou climatique des événements enregistrés ne peut être assurée que par l'analyse d'autres gisements ou par la comparaison avec des données plus globales.

De façon générale, la sédimentation marine en Brière s'arrête vers 4500 BP, [3339-3048] cal. BC (cf. partie 1 chap. 2), à Ile d'Errand, la datation <sup>14</sup>C de sédiments organiques dans la partie supérieure de l'argile marine (zone pollinique 2) a fourni la fourchette [3615-3108] cal. BC (fig. 232). L'arrêt de la sédimentation marine peut être attribué à une baisse de l'altitude des plus hautes mers (PHM) observée par plusieurs auteurs de reconstructions des fluctuations de niveaux marins vers 4500 BP (DELIBRIAS *et al.* 1971, TERS 1973, MORZADEC-KERFOURN 1974, PRIGENT 1977). A la suite de ce retrait, la Brière est isolée de l'action directe des marées, un cordon littoral s'édifie entre la cuvette et l'estuaire (VISSET 1979). Toutefois, par le biais de la résistance à l'écoulement de l'eau douce et la présence d'un biseau salé, le niveau marin garde une influence sur les fluctuations de la nappe à l'intérieur de la cuvette.

La succession de peuplements à Ile d'Errand présente effectivement un lien avec les variations du niveau des plus hautes mers, les deux chênaies s'inscrivent dans des événements régressifs ou de stagnation du niveau, vers 4500 BP et vers 3000 BP reconnus par divers auteurs sur les marges du nord-ouest de la France (fig. 232). Ces événements sont également signalés par des auteurs britanniques (SHENNAN 1986).

Toutefois, il est très difficile de comparer les datations dendrochronologiques avec les données de ces courbes construites sur la base de datations  $^{14}\text{C}$  qui ne peuvent pas toujours être calibrées car leur déviation est importante. De plus, la construction des courbes sans calibration induit une distorsion du temps qui fausse la représentation (fig. 232). La datation du niveau le plus bas en Brière entre -1275 et -1050, suivie d'un déclin des chênes donc d'une remontée de la nappe dès -950 ne peut être localisée précisément dans ces reconstructions.

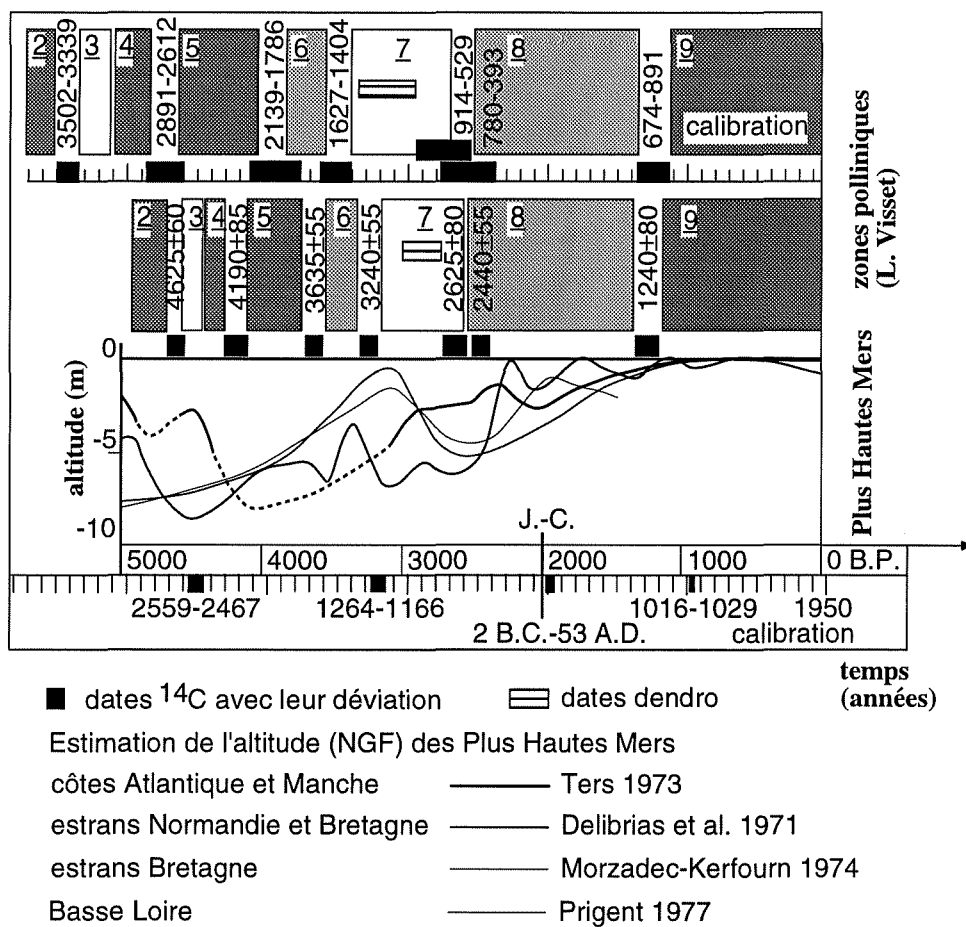


Figure 232 : comparaison de la succession des peuplements à Ile d'Errand et des variations de l'altitude des plus hautes mers

La Brière étant partiellement isolée, des fluctuations qui lui sont propres peuvent également être enregistrées. Ces dernières seraient en rapport plus directe avec l'évolution des facteurs climatiques à long terme, en lien avec l'alimentation en eau douce du bassin versant. Pour juger de l'influence de ces facteurs, l'évolution des peuplements peut être comparée à la reconstruction de la variation des niveaux de lac. Ces niveaux sont reconstruits, sur la période Holocène, grâce à des figures sédimentaires (MAGNY 1995). La surface des lacs étudiés est inférieure à 100 ha et leur profondeur est comprise entre 15 et 30 m. Il s'agit donc d'intégrateurs locaux des variations climatiques. La valeur régionale de la reconstruction est alors fournie par l'analyse de nombreuses cuvettes. Une courbe synthétique est tirée des variations de 25 lacs jurassiens et du nord des Alpes (MAGNY 1995). Cette courbe présente des variations d'ordre séculaire qui peuvent être mises en rapport avec des reconstructions issues d'autres proxy data : les mouvements des glaciers des Alpes suisses et autrichiennes, la

limite supérieure de la forêt dans les Alpes ou la charge sédimentaire de la Vistule (MAGNY 1993). L'aspect global des fluctuations est donc fourni par la comparaison des proxy data mais aussi par leur coïncidence avec les fluctuations du  $^{14}\text{C}$  résiduel dans l'atmosphère (MAGNY 1995). L'ensemble permet alors de faire l'hypothèse que les fluctuations des lacs jurassiens et des Alpes du nord indiquent des variations climatiques de grande échelle, en rapport avec la circulation générale de l'atmosphère (MAGNY 1993, 1995).

La datation dendrochronologique de la seconde génération de chênes correspond de façon assez précise à une phase de régression des lacs jurassiens (fig. 233) qui intervient vers 1000 av. J.-C. Par contre, la reprise transgressive semble débiter plus tardivement, après 850 av. J.-C. L'accord entre la variation du niveau des lacs et l'évolution des peuplements en Brière est imparfait dans les autres périodes.

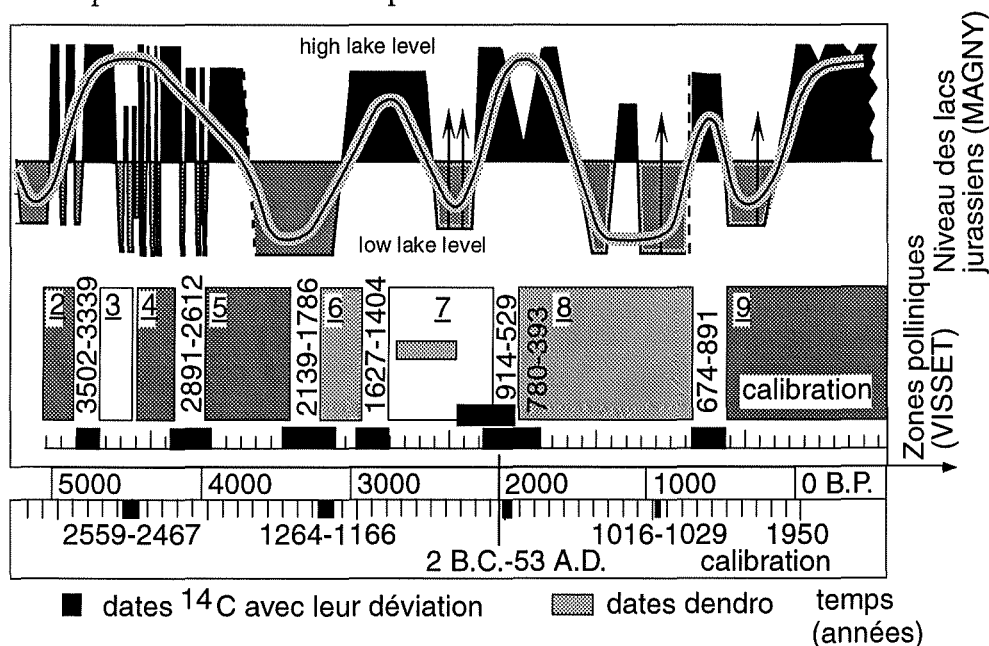


Figure 233 : comparaison de la succession des peuplements à Ile d'Errand et de la fluctuation des lacs jurassiens et des Alpes du nord (MAGNY 1995)

L'évolution du niveau d'eau en Brière apparaît de nature oscillatoire, la datation dendrochronologique de la seconde génération de chêne en fait une démonstration localisée très précisément dans le temps. Les données polliniques, sédimentologiques et archéologiques permettent également d'aboutir à cette conclusion (VISSET 1979, PRIGENT 1977). Toutefois, l'interprétation du lien entre ces oscillations et l'évolution à long terme du climat ou du niveau marin reste délicate. La comparaison des différentes courbes de variation de l'altitude des plus hautes mers fait apparaître des périodes de convergence, dont une peut être localisée vers 3000 BP. Toutefois de nombreux points de divergences ne peuvent être considérés non significatifs. De plus l'ampleur des oscillations enregistrées ne peut être expliquée que par des variations liées au climat (eustatiques). En effet, les variations récentes du niveau marin tendent à montrer que l'influence eustatique se limiterait à quelques centimètres ou décimètres (PRIGENT 1977). Des facteurs plus locaux : isostasie de la région, évolution du marnage, tassement de la tourbe doivent être intégrés, particulièrement dans le cas de larges bassins comme la Brière.

Il apparaît donc que la valeur régionale de l'épisode régressif enregistré ne sera démontrée que par comparaison avec des données très précisément datées. Le potentiel en bois subfossiles d'autres marais sur la façade ouest, (Marais de Pontorson (Baie du Mont-Saint-Michel) (GIRARD CLOS et L'HOMER 1999), Marais Poitevin, lac de Grand lieu devrait être mieux exploité dans ce but.



## 5.2 Variations de moyen terme

Les périodes de croissance très réduites sont responsables d'une tendance à moyen terme (10 à 20 ans) qui affecte fortement la chronologie de référence. La tendance est directement liée à une succession de caractéristiques de la croissance qui décrivent une situation de stress des arbres pendant plusieurs années (cf. 3.4).

Il peut être facilement admis que le stress d'un arbre une année donnée a des répercussions sur les cernes des années suivantes sans que les conditions stressantes soient maintenues via la mise en réserve. Ceci est particulièrement bien observé à la suite d'un émondage (cf. partie 3 chap. 4). En moyenne, le niveau de croissance antérieur à l'émondage n'est retrouvé qu'après environ 10 ans de recouvrement et la largeur est inférieure à sa précédente pendant 2 années après la coupe.

Toutefois, les 5 pertes de production les plus sévères, qui sont suivies de la mort lente de certains arbres, ont un caractère progressif. La croissance est en baisse à partir de largeurs assez fortes, l'écart interannuel exprimé en pourcentage est donc négatif (fig. 234). Pendant cette baisse, pour une année particulière (ou deux en -1666-65) la concordance des écarts et leur amplitude entre les séries sont plus élevés. L'écart est alors jugé caractéristique. La baisse de croissance se poursuit à la suite de -1130, -1057 et -1030 mais pas après -1161 et -1065 où le recouvrement débute l'année suivant l'écart caractéristique.

La croissance se détériore donc sur une période : 7 à 9 écarts consécutifs sont négatifs (fig. 234). A la fin et, dans certains cas, à la suite de cette baisse, les valeurs des largeurs sont extrêmes comme le suggère la chronologie des cernes les plus étroits de la vie des chênes et les largeurs moyennes inférieures à 1 mm (fig. 234). Enfin, la mort des arbres apparaît en conséquence parfois 20 ans après la chute de croissance.

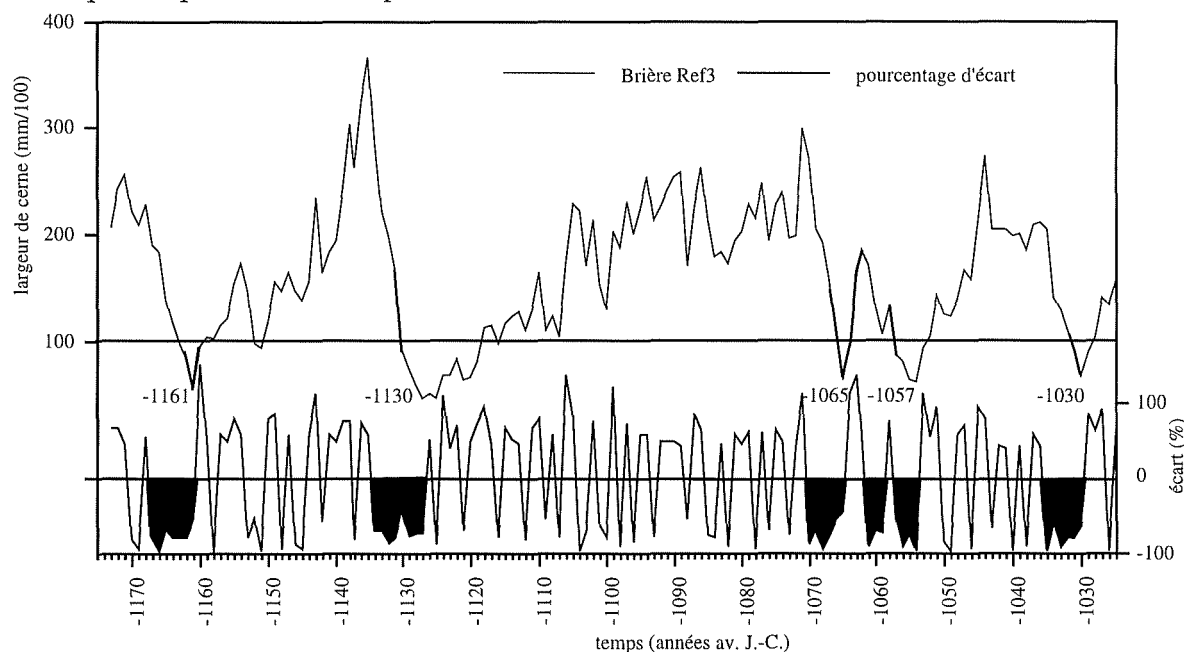


Figure 234 : comparaison de la chronologie moyenne, Brière Ref3 (valeurs brutes), et de l'écart interannuel

La détérioration progressive de la croissance suggère que les conditions se dégradent aussi progressivement et restent fortement limitantes quelques années. Mais les conséquences du stress, comme la mort des arbres, dépassent cette période puisque certains arbres meurent alors que d'autres peuvent retrouver une production type.

Les analyses palynologiques, les observations sédimentaires ainsi que la croissance des chênes actuellement les plus avancés sur les sols tourbeux en Brière permettent de supposer que les séquences de cernes minces sont liées à une augmentation de l'altitude de la nappe d'eau dans le sol. La tendance de moyenne fréquence de la chronologie qu'induisent ces séquences comporterait donc une information paléo-hydrologique.

Les auteurs ayant analysé du matériel analogue à celui de Brière indiquent tous le rôle prépondérant de cette tendance dans les séries de largeurs (cf. 3.4). PILCHER (1990 et PILCHER *et al.* 1996) remarque que des chronologies de chênes et de pins provenant de plusieurs tourbières présentent des tendances de moyenne fréquence synchrones, ce qui indiquerait que ces variations sont liées à des facteurs régionaux.

Les chronologies moyennes réalisées avec les arbres provenant des différentes zones d'échantillonnage en Brière (cf. partie 2 chap. 3) présentent également des tendances avec de nombreux points communs (fig. 235). L'amplitude des variations peut être assez différente, particulièrement pour les cernes larges, mais le synchronisme est élevé. La tendance de moyen terme est donc cohérente dans les diverses zones de prélèvements. Toutefois, pour pouvoir rattacher ces variations à des facteurs régionaux, des comparaisons avec un bassin indépendant sont nécessaires. En effet, une augmentation du niveau de la nappe peut être induite par une réorganisation de la circulation dans la cuvette, de façon indépendante de tous facteurs régionaux.

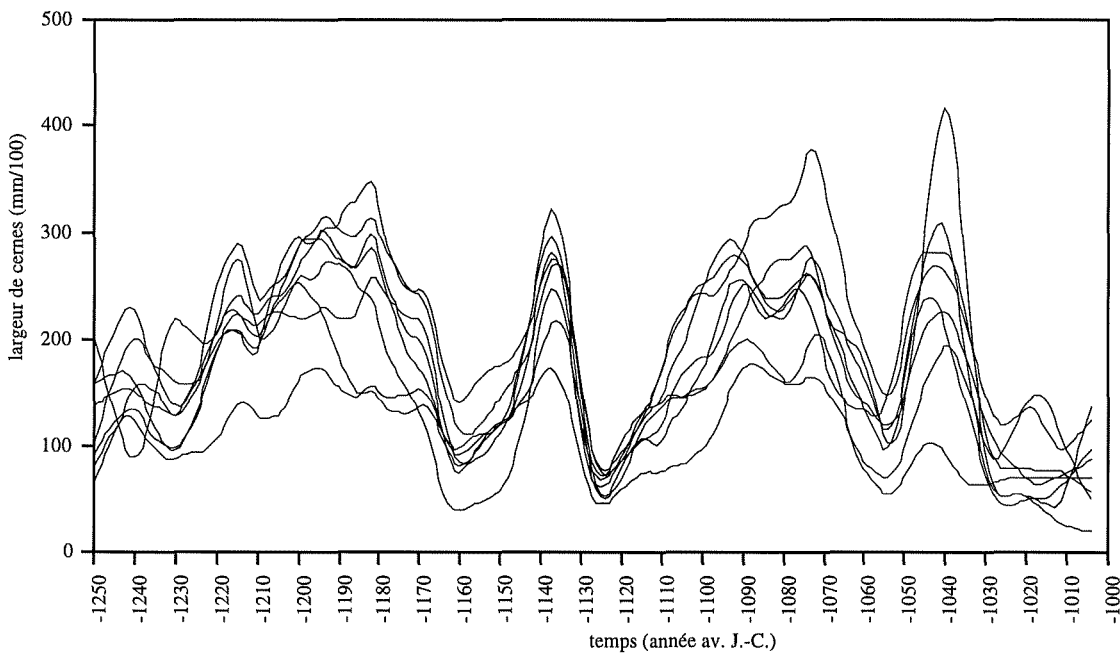


Figure 235 : tendance (LOWESS 15 cernes voisins) des chronologies moyennes réalisées en fonction des zones de prélèvements

Les séries individuelles de 6 échantillons provenant d'un site archéologique localisé à Coulon (79) fournissent une moyenne de site comportant 152 cernes. Un fragment de bois a été daté par 14C contemporain de la référence Brière ref3 : [1360-900] cal. BC. Une corrélation significative peut être dégagée entre les deux chronologies. Le résultat est concordant avec la datation radiocarbone, le dernier cerne mesuré date de -1036 (PAUTREAU 1995).

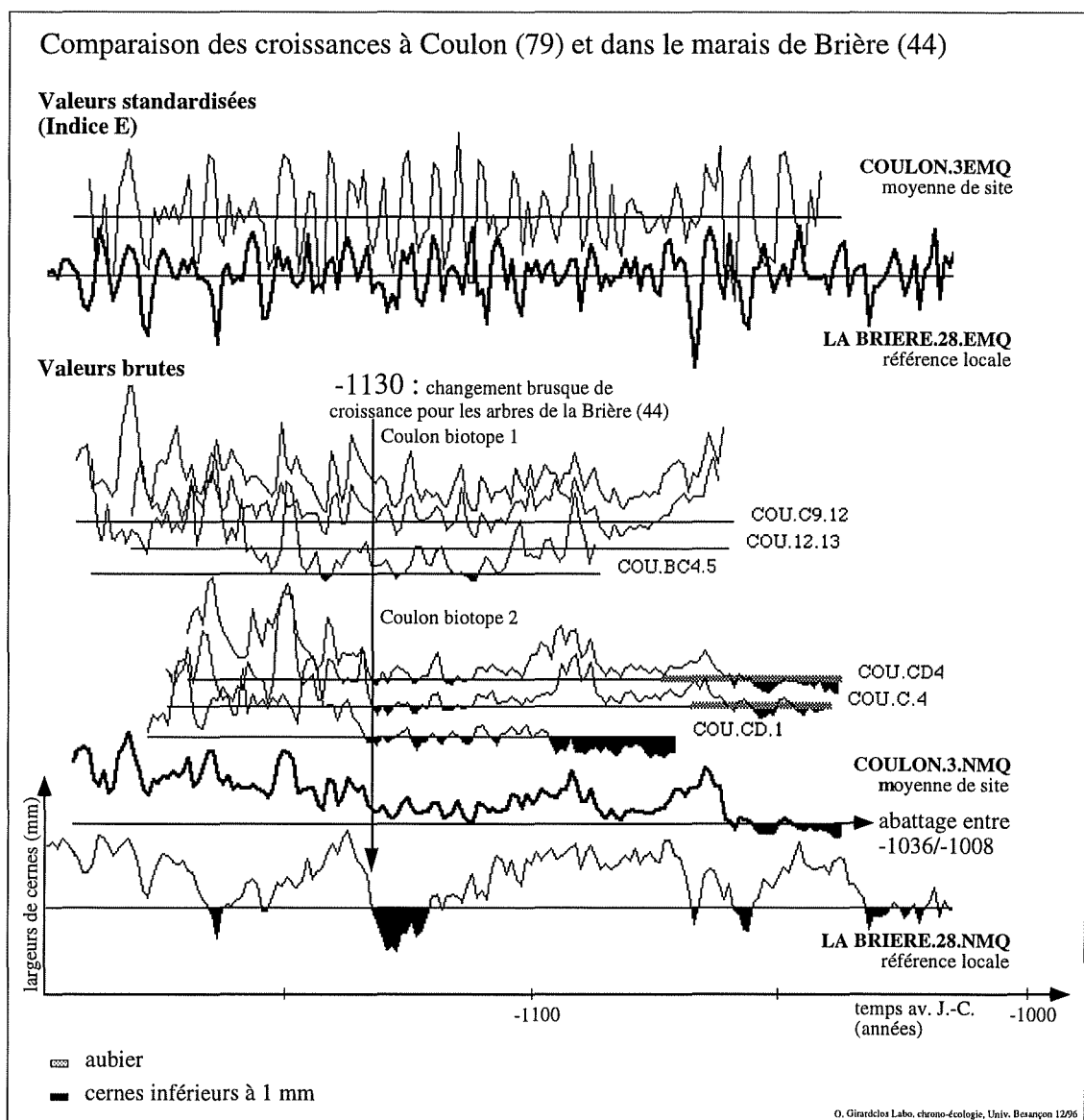


Figure 236 : synchronisme entre les séries individuelles de Coulon (79), entre la moyenne de site et la référence de Brière (Brière M28)

Les séries des 6 individus peuvent être divisées en deux groupes. Le premier comporte des arbres dont la croissance a des points communs avec la référence de Brière. Sur ces individus, une séquence de cernes minces correspond à celle observée à la suite de -1130 et leurs derniers cernes sont très serrés. Les trois autres individus ont une croissance où la tendance prend un rôle moins important. Il est possible que ces différences soient le reflet du milieu d'origine des arbres (GIRARDCLOS *et al.* 1996). Le site de Coulon est localisé en bordure du marais Poitevin. Il est donc probable que les arbres proviennent de milieux plus ou moins hydromorphes.

Le nombre ainsi que la localisation des restes dans un site archéologique font que le lot de Coulon ne présente pas une valeur statistique comparable à celle des arbres de Brière, mais la chronologie de Coulon est aujourd'hui le seul point de comparaison disponible. La tendance de moyenne fréquence de la série moyenne des 6 individus a été déterminée par une modélisation LOWESS à l'aide de 15 cernes voisins. La comparaison avec les chronologies de Brière construites pour chaque zone de prélèvement, modélisées de la même façon, montre nettement des points communs entre les tendances (fig. 237). L'amplitude des variations reste assez indépendante mais des concordances sont observées, particulièrement à la suite des années -1130 et -1057.

Le synchronisme des moyennes fréquences de la croissance des arbres découverts en bordure du marais Poitevin et en Brière tend à montrer que ces variations ont comme origine des facteurs régionaux. Toutefois, la faiblesse statistique du lot de Coulon incite à la prudence et il est évident que d'autres comparaisons sont nécessaires.

Il apparaît tout de même que le stress le plus violent enregistré dans la chronologie de Brière, à la suite de -1130, est également le plus marqué dans celle de Coulon.

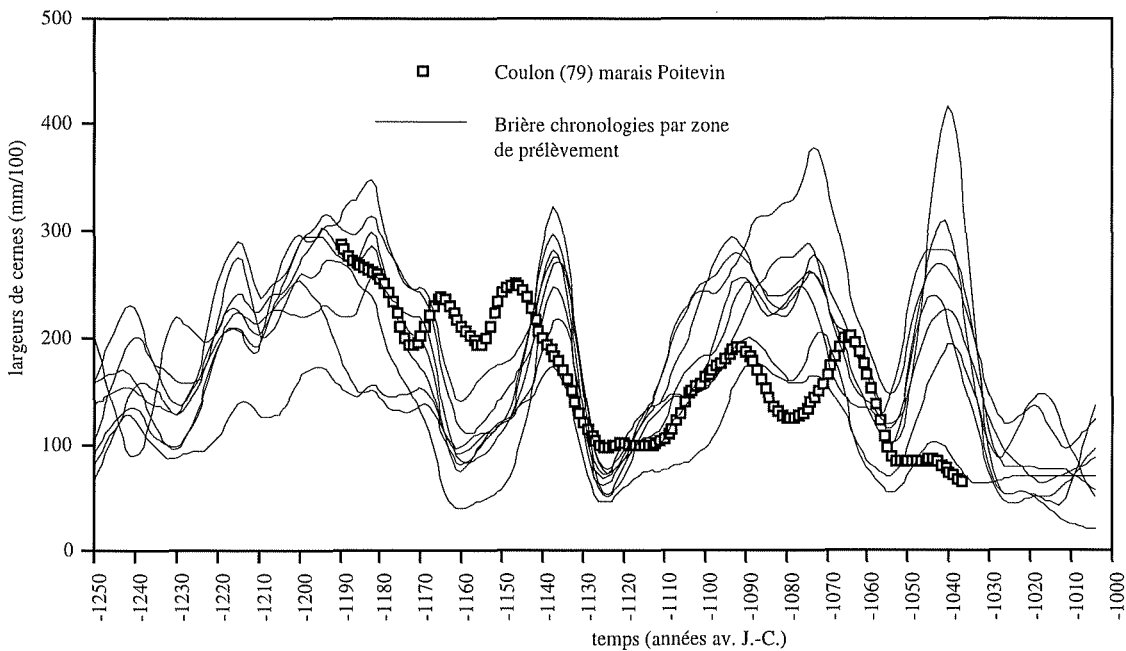


Figure 237 : Comparaison de la tendance de moyenne fréquence des arbres de Coulon (79) et de celle des chronologies en fonction des zones de prélèvement en Brière

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les analyses dendrochronologiques du Chêne dans la moitié nord de la France ont abouti à un étalonnage dense pour les périodes historiques mais très lacunaire pour les périodes pré et protohistoriques (cf. conclusion partie 2). Nous avons pu regrouper quelques sites analysés en Lorraine par le laboratoire de Chrono-écologie de Besançon et celui de Bohlingen (Labor für Holzanalyse, TEGEL W.) dans une référence, Lor-Brz5, homogène pour la période comprise entre 1519 et 885 av. J.-C. Toutefois, cette chronologie présente des lacunes en quantité d'information et en qualité des séries (cf. partie 2 chap. 2). Le faible développement des chronologies pré- et protohistoriques en France est en partie lié à une prise en compte des bois subfossiles en dépôt naturel qui est très inférieure au potentiel qu'ils représentent. Leur analyse dans d'autres pays, a conduit à de longues références (BECKER *et al.* 1985, BROWN *et al.* 1986, LEUSCHNER et DELORME 1988, JANSMA 1995, KRAPIEC 1996). Les premières approches dans le bassin parisien ont également livrées des résultats (BERNARD 1997).

La découverte des troncs subfossiles en Brière, au nord de l'estuaire de la Loire, apparaît donc comme une possibilité de compléter les références. Toutefois, le site est particulièrement isolé de tout étalon établi ou en cours de construction. Pour le dater, il est indispensable d'utiliser des références éloignées provenant de Suisse (Neuchâtel) (EGGER *et al.* 1985) et de l'ouest de l'Allemagne (Stuttgart) (BECKER *et al.* 1985) ainsi que la chronologie construite pour la Lorraine.

---

Les variables climatiques de la moitié nord de la France montrent un gradient est - ouest. Le site littoral de Brière est sous une influence océanique marquée alors que les références disponibles sont représentatives de conditions semi-continentales en Lorraine et médio-européennes en Suisse et en Allemagne. Les conditions de datation sont donc particulièrement défavorables.

Il existe cependant une corrélation assez élevée entre les longues séries de précipitations des postes météorologiques de l'ouest et de l'est de la France. Plus la distance est faible, plus ce lien est fort. Une cohésion des variations interannuelles des précipitations peut être mise en évidence sur un transect de Nantes à Nancy.

La corrélation des séries dendrochronologiques se dégrade également d'est en ouest dans la moitié nord de la France. Sauf exceptions, les chronologies locales, issues de forêts actuelles, qui ne nécessitent donc pas de calcul pour être synchronisées, ne sont pas significativement corrélées d'une extrémité du transect à l'autre. Il est nécessaire de regrouper plusieurs chronologies réparties sur une zone ouest de la France pour obtenir une synchronisation significative sur les références suisses ou allemandes. Dans le cas étudié, 98 séries fournissant une chronologie moyenne de 80 ans sont nécessaires. Il n'existe toutefois pas de lien direct entre les nombres de séries et de cernes de la chronologie et sa datation à longue distance. En effet des séries particulières peuvent comporter un faible nombre d'arbres et être pour autant représentative d'une information régionale. Toutefois, pour dater à travers des zones climatiques relativement diversifiées, on peut vérifier pour une période historique, pour la période Gallo-Romaine, et pour les forêts actuelles qu'un nombre de cernes moyen par an compris entre 30 et 60 et 200 à 300 cernes est nécessaire. Le site de la Brière présente localement à Ile d'Errand un potentiel de troncs de Chêne subfossile qui permet de construire une telle chronologie. L'objectif a été atteint, la référence élaborée à partir d'environ 130 individus comporte 97 séries datées et totalisent 345 cernes.

Les conditions de datation étant particulièrement défavorables, une place importante est faite aux aspects méthodologiques de la recherche des synchronismes. La structure probabiliste des données dendrochronologiques est complexe car elle présente plusieurs dimensions qui peuvent être fonction du temps. Le nombre de séries (couverture), qui reflète la quantité d'information, est actuellement la dimension la plus souvent prise en compte. La qualité de l'information peut être exprimée par la corrélation moyenne entre les séries. Cette corrélation est relativisée par rapport au nombre de séries sur lesquelles elle porte pour estimer la représentation « statistique » de la croissance de la population analysée par la chronologie moyenne. Ce calcul : Express population signal, est proposé par WIGLEY *et al.* (1984), repris par BRIFFA et JONES (1990) et exploité en dendrochronologie (historique) par JANSMA (1995). La structure des données est variable dans le temps. Il est donc important de mettre en relation avec le temps ces paramètres.

La démarche adoptée ici revient à se demander si toutes les séries qui sont intégrées à une chronologie moyenne contribuent à apporter de l'information régionale. Cette information est exploitée pour la datation, tout particulièrement si la distance entre référence et série flottante est grande. La qualité de la série est alors testée sur la base des relations qu'elle présente avec toutes les autres composantes de la chronologie moyenne. Il apparaît, par exemple sur les sites archéologiques de Breban (10) et Vandières (54), que des séries peuvent être synchronisées et incluses dans la moyenne de site et ne pas améliorer la relation entre les étalons et cette moyenne. Ceci ne remet pas directement en cause leur datation, bien qu'un seuil puisse être exploité pour rejeter définitivement une série, mais estime l'apport de chaque série à la cohésion du groupe. Si les séries sont sélectionnées en optimisant la corrélation moyenne du lot, la chronologie moyenne est homogénéisée. La démarche revient à tenter d'améliorer le rapport entre le signal et le bruit. La partie commune entre les séries

---

est jugée pertinente et les séries apportant trop de dispersion sont écartées. Toutefois, rien ne permet de présumer que les facteurs qui induisent cette homogénéité sont effectivement des facteurs régionaux. On peut tout de même supposer que puisqu'ils sont communs aux arbres analysés ils sont assez généraux. La chronologie construite après extraction des séries qui induisent le plus sa dispersion synchronise avec les références au moins avec une sécurité égale (ou améliorée) à celle de la chronologie complète. Le gain est particulièrement important pour la chronologie de Brière. Les 15 séries qui résument le mieux la chronologie complète sont synchronisées avec les références de Lorraine, Stuttgart et Neuchâtel, avec une sécurité nettement améliorée. L'enregistrement des arbres est considéré en terme de population, c'est-à-dire que chacun n'est pas jugé comme représentant de façon égale les facteurs régionaux. Il apparaît en fait que cet enregistrement ne présente pas la même qualité en fonction du temps, ce qui est par exemple connu pour « l'effet de jeunesse », la sélection des séries devrait donc, dans une étape ultérieure, être réalisée sur des intervalles de temps. JANSMA propose de sélectionner des secteurs de 50 cernes.

Le signal exploité pour dater les chronologies doit également être sélectionné dans le temps. Les séries de largeurs brutes ne peuvent pas être utilisées directement pour la datation. Les pentes entre les largeurs consécutives et leur concordance font l'objet du test de ECKSTEIN (1969) où alors un signal le plus stationnaire possible doit être extrait des valeurs brutes par standardisation. Le modèle conceptuel de la croissance de GRAYBILL (1982) et les observations réalisées en routine de datation suggèrent que la recherche de synchronisme est principalement basée sur le signal de haute fréquence, qui présente le lien le plus direct avec le climat. Toutefois, une information commune à de grands ensembles d'arbres, de période inférieure à 15 ans, semble pouvoir être également exploitée. La datation de la chronologie de Brière est améliorée en conservant l'information de période inférieure à 13 ans. Ce résultat concorde avec des observations faites par MUNRO (1984). Il semble donc important que la standardisation n'élimine pas complètement ce signal comme c'est le cas dans une modélisation ARMA (GUIOT 1986). Cependant, là encore il n'est probablement pas possible de définir une bande passante universelle. Rien ne permet de juger de la fréquence du signal régional qu'une série pourrait comporter. La standardisation devrait donc être évolutive. Le synchronisme entre les séries peut être évalué simultanément dans des standardisations différentes. Les opérateurs au laboratoire de Chrono-écologie confrontent, en général, les résultats issus d'un test de ECKSTEIN (et le cas échéant un test du coefficient de corrélation) portant sur la variation interannuelle des valeurs brutes, des indices de HOLLSTEIN (1980), qui représentent le signal de très haute fréquence, et des indices EXCEPT (LAMBERT et LAVIER 1992a) qui conservent les variations dont la période est inférieure à 7 ans. La procédure pourrait être généralisée et prendre en compte des standardisations robustes comme la modélisation ARMA, pour tester le synchronisme du signal de plus haute fréquence, et des filtres de bande passante progressivement plus large, pour observer la période maximale du signal commun au lot analysé. Le temps de calcul peut alors être une contrainte matérielle, à laquelle s'ajoute une indispensable vérification de l'influence du filtrage sur la fonction de résultat. En effet, lorsque le filtre conserve une part de signal dont la période devient relativement longue (un maximum de 15 ans semble indiqué), la tendance qui est conservée induit une ambiguïté dans le choix de la valeur extrême du coefficient de corrélation. Toutefois, on peut penser que l'utilisation en routine des standardisations plus évolutives (ce qui implique de dater des sites...) permettrait d'observer d'éventuels signaux, communs à des populations répartis sur une région et apporterait une contribution à la délicate analyse des moyennes fréquences en dendrochronologie. Ces observations pourraient également permettre de faire une part entre des influences locales et plus générales et ainsi d'améliorer l'exploitation des séries issues de sites archéologiques.

---

La recherche de synchronisme est évidemment basée sur des estimateurs statistiques mais en aucun cas ceux-ci ne doivent être considérés sans confrontation de plusieurs références, procédures et informations externes aux calculs. Une part du choix de la date relève de la responsabilité de l'opérateur et il est illusoire de croire que les erreurs sont totalement inévitables. Si la décision relève effectivement de l'opérateur, une fois que le choix est réalisé sa sécurité peut être mesurée par divers moyens qui présentent tout autant des défauts. Cependant on ne peut considérer que seule l'expérience ou le nombre de calculs réalisés est un gage de sécurité.

Le calcul du risque d'erreur n'est pas explicitement publié ou associé à un résultat dendrochronologique comme c'est le cas pour une datation  $^{14}\text{C}$  car sa définition est plus complexe. On peut montrer que le respect des seuils du coefficient  $W$  et de la valeur  $t$  défini empiriquement dans des conditions de datation type correspondent à un risque d'erreur inférieure à 5% calculé selon les procédures d'ORTON (1983) et de MUNRO (1984). Ces calculs considèrent la sélection de la date en deux temps. Dans un premier temps la fonction de l'estimateur du synchronisme est évaluée pour toutes les positions de synchronisme. Le résultat est une fonction du temps, du coefficient  $W$  ou de la valeur  $t$ . Puis dans le second temps, la valeur extrême dans cette nouvelle fonction est choisie. La procédure classique qui considère le risque directement associé à la valeur de l'estimateur du synchronisme le sous-estime fortement. Il est toutefois impossible de communiquer directement ou de reposer totalement une décision sur ces calculs car plusieurs étalons et moyennes plus locales sont toujours comparées. Ces chronologies ne sont pas indépendantes. Même si la construction des moyennes exclut des composantes communes, des facteurs communs influencent la totalité des séries. Ce sont ces facteurs qui justifient l'existence d'un schéma global de la croissance pour toute l'Europe occidentale mis en évidence lors de l'unification des ultra-longues chronologies (PILCHER *et al.* 1984).

Face à cette complexité, un choix possible est peut être de formuler le risque associé à une datation en 3 classes.

A : dates avec valeur de risque associé infime

B : dates dont le risque associé est proche des valeurs seuils

C : dates nécessitant des informations extérieures.

La datation de la chronologie de Brière nécessite une standardisation. En fonction des références et des procédures, les valeurs du risque calculé selon les méthodes d'ORTON (1983) et MUNRO (1984) sont proches du seuil de 5%. Si l'on admet la définition précédente, la datation relève donc d'un risque de classe B. Elle est plus significative lorsque les séries qui représentent au mieux le lot sont sélectionnées et lorsque des variations de période inférieure à 13 ans sont conservées ainsi qu'avec la référence de Lorraine. On peut attribuer le risque d'erreur observé à la distance qui sépare les références et la chronologie de Brière ainsi qu'aux conditions de développement particulières des chênes. Les références utilisées sont constituées de séries issues de milieux dont le drainage n'est pas une contrainte aussi forte que dans les sols tourbeux de Brière.



---

Le matériel issu des sols tourbeux en général fait l'objet de descriptions qui sont convergentes (PILCHER *et al.* 1996, LEUSCHNER 1992). Des séquences de cernes minces sont contemporaines sur une grande part des séries individuelles. Les observations anatomiques, la largeur des cernes ainsi que la chronologie du cerne le plus mince élaboré durant la vie de l'arbre montrent pour de nombreux sites cette caractéristique. Ces séquences se traduisent par une tendance à moyen terme dans les chronologies de référence dont la période dépasse plusieurs décades. Un lien entre le caractère hydromorphe des gisements et l'observation de ces séquences peut être fait. Sans exclure l'existence de séquences de cernes minces dans d'autres contextes, l'aspect systématique des descriptions est lié aux zones tourbeuses.

Une hypothèse principale se propose d'expliquer la formation de ces séquences. L'élévation temporaire de la nappe dans le sol induirait une asphyxie racinaire. Selon l'intensité ou la fréquence des remontées voire des inondations, les arbres subiraient une perte de croissance. Certains ne recouvrant pas du stress meurent lentement, et à terme, lorsque le niveau n'est plus compatible avec l'autécologie du Chêne, le peuplement disparaît.

Pour étayer cette hypothèse, des observations sédimentaires et palynologiques (LEUSCHNER *et al.* 1987, PILCHER 1990) sont utilisées.

En Brière, les diagrammes palynologiques concomitants des troncs ne montrent pas d'augmentation des pollens de Chêne car la sédimentation tourbeuse est arrêtée durant le stade de chênaie (VISSET *et al.* 1994). Par contre, les datations <sup>14</sup>C et dendrochronologiques permettent de montrer que les peuplements qui précèdent et suivent la chênaie sont plus hygrophiles.

Dans les zones d'études des bois analogues de ceux découverts en Brière, aucun peuplement actuel ne peut être considéré comme proche d'une chênaie sur sol tourbeux (PILCHER *et al.* 1996, LEUSCHNER 1992). La déprise agricole en Brière se traduit par un développement localisé de jeunes formations dominées par le Chêne pédonculé qui colonisent des sols tourbeux dont la profondeur dépasse 1,5 m. Ces arbres ne sont pas de parfaits analogues du lot de l'âge du Bronze principalement car ils comportent peu de cernes.

Cependant l'analyse dendroécologique révèle que malgré leur jeune âge, ils sont représentatifs de facteurs régionaux. Les stations échantillonnées sont réparties sur un transect partant des îles vers le marais. Les tableaux descriptifs floristiques et mésologiques permettent de montrer que l'hydromorphie prend un rôle plus ou moins important selon la position de la station dans le transect. L'ordre obtenu à partir des analyses multivariées de ces deux tableaux est comparé à celui qui est fourni par l'analyse des chronologies moyennes stationnelles. Les trois tableaux comportent une structure commune, on peut donc supposer que les trois types de descripteurs donnent chacun une image qui représente la variation le long du transect des facteurs écologiques. L'analyse des tableaux permet de diviser les stations en trois types. Les trois chronologies construites sont donc représentatives d'arbres plus ou moins influencés par le caractère hydromorphe du sol. Les chênes les plus avancés sont localisés sur un sol dont l'épaisseur de l'horizon tourbeux dépasse 1,5 m. Ils sont dans une situation qui est proche de celle que rencontraient les arbres de l'âge du Bronze.

L'analyse de la relation entre la croissance des arbres vivants en Brière et les variables climatiques ainsi que le niveau d'eau en Grande Brière indique que le déficit hydrique estival est le facteur climatique qui limite le plus la formation du cerne. Une relation directe entre les conditions hydriques de l'été et la largeur de cerne peut être montrée par deux méthodes. Les arbres forment des cernes larges caractéristiques alors que les précipitations et le niveau d'eau sont élevés et des cernes caractéristiques étroits alors que la sécheresse induit un niveau bas.

---

La fonction de réponse indique également une relation directe significative avec les précipitations et le bilan hydrique potentiel, ainsi qu'une relation inverse avec les températures.

Cette relation est observée quel que soit le type de station. Sa signification est moindre pour les arbres les plus avancés sur les sols tourbeux mais reste supérieure au seuil de 5%. Les chênes se développant sur les sols hydromorphes ont un système racinaire traçant qui les expose aux déficits hydriques. Ces arbres ont une croissance également limitée par des conditions printanières humides ou précoces. Une largeur caractéristique étroite est observée lorsque les précipitations et le niveau d'eau en Brière sont élevés alors que la saison de végétation est amorcée. La fonction de réponse indique également une relation significative inverse entre la largeur des cernes et les précipitations d'avril - mai ainsi que les températures de ces mois. L'excès de précipitations se traduisant par un niveau de la nappe élevé semble induire une asphyxie racinaire, les arbres seraient d'autant sensibles que la température du printemps est élevée car on peut supposer que dans ce cas la saison de végétation est un peu avancée. Seuls les individus sur les sols tourbeux épais subissent cette influence. Elle apparaît donc caractéristique de sols où l'hydromorphie est particulièrement limitante pour le Chêne.

L'analyse dendroécologique est un argument supplémentaire pour considérer que les chênes provenant de zones tourbeuses ont une croissance limitée par une élévation de la nappe. Cependant, elle montre également (s'il en était besoin) que la largeur de cerne est un intégrateur complexe de l'influence de plusieurs facteurs. Si l'augmentation du niveau n'induit pas l'asphyxie racinaire alors elle est bénéfique à la croissance car elle comble une partie du déficit hydrique potentiel qui est une caractéristique du climat régional. Lorsqu'une sécheresse survient, les arbres n'ont pas un système racinaire adapté pour résister à la baisse de la nappe et forment un cerne étroit. L'action des facteurs est donc très différente selon la période où ils interviennent, y compris pendant la saison de végétation. De plus dans une optique de transposition dans le passé, il ne faut pas exclure l'existence d'interventions du niveau d'eau sur la croissance qui n'auraient pas été enregistrées par les arbres vivants. Ceux-ci colonisent un espace nouveau, cette progression est possible car les conditions générales sont favorables à l'espèce. Après avoir subi l'action des facteurs les plus limitants, la chênaie de l'âge du Bronze entre en régression, les conditions globales sont donc défavorables à l'espèce. L'action extrême de facteurs, aboutissant à la mort de certains arbres ou induisant la formation de séquences de cernes minces, n'est pas observée dans le peuplement actuel, probablement en rapport avec cette différence de dynamique.

Plusieurs arguments permettent donc de penser que les chênes de Brière apportent une information paléohydrologique. Leur développement sur la tourbière débute en -1358, jusque vers -1275. Des arbres pionniers colonisent un peuplement où les analyses palynologiques indiquent que l'Aulne est en régression au profit d'espèces moins hygrophiles indiquant une ouverture de la formation forestière (*Betula*, *Salix*, *Fraxinus*, *Rhamnus* et *Myrica*). La sédimentation est arrêtée lorsque la chênaie atteint son plein développement, entre -1200 et -1080 à -1050. Pendant cette période on peut supposer que le niveau d'eau est, en moyenne, au plus bas. Après -1050, la disparition de la chênaie est assez rapide jusque vers -1000. Après cette date quelques arbres perdurent jusqu'en -978. La croissance des arbres est violemment affectée en premier lieu vers -1161, puis en -1130 ces stress ne semblent pas induire la disparition de la chênaie qui débiterait au plus tôt après -1090 par un déficit des germinations. Par contre, les stress de -1065 et -1030 sont suivis d'une augmentation de la mortalité qui a pour conséquence le déclin des chênes. La sédimentation tourbeuse reprend, et les pollens d'Aulne, de Poacées et de Cypéracées dominant à nouveau le diagramme, indiquant qu'une formation plus spécialisée occupe la cuvette.

---

La séquence décrite par les analyses dendrochronologiques et palynologiques montre de façon très précise dans le temps le caractère oscillatoire du niveau d'eau en Brière. La première génération de chênes, datée par 14C [2885-2469] cal. BC et [2866-2210] cal. BC (Ny 523 et Ny 496 (VISSET 1982) indique également un événement régressif du niveau d'eau. Dans les deux cas, il est possible de mettre en rapport ces événements avec des ralentissements de la transgression flandrienne indiqués par plusieurs reconstructions des variations de l'altitude des plus hautes mers (DELIBRIAS *et al.* 1971, TERS 1973, MORZADEC-KERFOURN 1974, PRIGENT 1977, SHENANN 1986). Cependant la précision qu'apporte la datation dendrochronologique rend délicate la comparaison avec des données globales dont les datations 14C ne peuvent pas toujours être calibrées. De même, la datation de la chênaie est concordante avec une régression du niveau des lacs jurassiens et du nord des Alpes, au Bronze final. Du fait de ces imprécisions de datation, il est encore impossible de savoir si la Brière à cette époque subit effectivement l'influence de la variation du niveau des plus hautes mers, si elle est suffisamment isolée pour se comporter comme un cuvette indépendante ou encore si les facteurs locaux comme la compaction de la tourbe, ou l'isostasie, jouent un rôle prépondérant. La réponse à ces questions viendra probablement lorsque le potentiel des bois subfossiles sera pleinement exploité, ce qui précisera fortement la chronologie des événements régressifs des marais liés à l'influence marine ou non.



# Bibliographie



## BIBLIOGRAPHIE :

- ALOUIS R., CHOISNEL E., FOUQUES-DUPARC P., GERBIER N., PAYEN D. & REMOIS P. 1980 :** *Atlas agroclimatique saisonnier de la France*. Direction de la météorologie, subdivision d'agrométéorologie. 153 p.
- ANONYME. 1992 :** *Etude d'impact de l'aménagement hydraulique des marais du bassin du Brivet. Tome 1 : analyse de l'état initial*. rapport société d'études techniques Praud, BCEOM. Syndicat mixte pour l'aménagement hydraulique du bassin du Brivet, DDA Loire-Atlantique. 154 p.
- ARNOLD B. 1995 :** Pirogues monoxyles d'Europe centrale. *Musée d'Archéologie de Neuchâtel, Archéologie neuchâteloise*, 20 : 181 p.
- BADEAU V. 1995 :** *Etude dendroécologique du hêtre (Fagus sylvatica L.) sur les plateaux calcaires de Lorraine. Influence de la gestion sylvicole*. Thèse Université de Nancy I. 238 p.
- BAILLIE M.G & PILCHER J.R. 1976 :** Climate records dug from Irish bogs. *The Geographical Magazine*, 47 (7) : 423-426.
- BAILLIE M.G.L. 1989 :** Do Irish Bog Oaks date the Shang Dynasty ?. *Curent Archaeology* 117, X, 10 : 310-313.
- BAILLIE M.G.L. 1995 :** *A slice through time. Dendrochronology and precision dating*. B.T.Batsford Ltd, London. 176 p.
- BAILLIE M.G.L. & MUNRO M.A.R. 1988 :** Irish tree-rings, Santorini and volcanic dust veils. *Nature* 332 : 344-346.
- BAILLIE M.G.L. & PILCHER J.R. . 1973 :** A simple crossdating Program for tree-ring Research. *Tree Ring Bulletin*, 33 : 7-4.
- BAILLY G. 1989 :** *Stations forestières de Franche-Comté. Catalogue des types de stations forestières du massif de Chaux*. Région Franche-Comté. 233 p.
- BAILLY G. 1992 :** *Catalogue des types de stations forestières de Brie champenoise*. AREP, Conseil régional Champagne-Ardenne. 355 p.
- BAUCH J. 1968 :** Die Problematik der geographischen Reichweite von Jahrringdatierungen an Beispielen aus der norddeutschen Tiefebene. *Kunstchronik*, 21 : 144-145.
- BECKER B. 1978 :** Dendroécological zones of central european forest communities. *Dans : Dendrochronology in Europe. Principles, interpretations and applications to archaeology and history. Symposium juin 1977, Greenwich*. FLECHER J. (Ed.) British Archaeological Reports International Series 51. 101-109.
- BECKER B., BILLAMBOZ A., EGGER H., GASSMANN P., ORCEL A., ORCEL C. & RUOFF U. 1985 :** *Dendrochronologie in der Ur- und Frühgeschichte. Die absolute Datierung von Pfahlbausiedlungen nördlich der Alpen im Jahrringkalender Mitteleuropas*. Basel, 68p. Publication de la Société Suisse de Préhistoire et d'Archéologie, Basel. 68.
- BECKER B. & DELORME A. 1978 :** Oak chronologies for central Europe. Their extension from medieval to prehistoric times. *Dans : Dendrochronology in Europe. Principles, interpretations and applications to archaeology and history. Symposium juin 1977, Greenwich*. FLECHER J. (Ed.) British Archaeological Reports International Series 51. 59-64.
- BECKER B. & SCHMIDT B. 1990 :** Extension of the European Oak chronology to the past 9224 years. *PACT*, 29 : 37-50.
- BECKER M. 1971 :** Etude des relations sol-végétation en conditions d'hydromorphie dans une forêt de la plaine Lorraine. *Annales des Sciences Forestière* : 141-179.
- BECKER M. 1989 :** The role of climate on present and past vitality of Silver fir forest in the Vosges Mountains of Northeastern France. *Canadian Journal Forestry Research* : 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. *Annales des Sciences Forestières*, 49 : 25-37.
- BECKER M. 1987 :** Bilan de santé actuel et rétrospectif du Sapin (*Abies alba* Mill.) dans les Vosges. Etude écologique et dendrochronologique. *Annale des sciences forestières*, 44 (4) : 379-402.
- BECKER M., NIEMINEN T.M. & GEREMIA F. 1994 :** Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France. The role of climate and atmospheric CO<sub>2</sub>. *Annales des Sciences Forestières*, 51 : 477-492.
- BELGRAND M. 1983 :** *Comportement de jeunes plants feuillus (Chêne pédonculé, Chêne rouge, Chêne sessile, hêtre) sur substrat ennoyé. Adaptations racinaires. Applications à la mise en valeur forestière des pseudogley*. Thèse ingénieur agronome, Institut National Agronomique Paris-Grignon. 188 p.
- BERNARD V. 1997 :** *Bois archéologiques, dendrochronologie et problématique du couvert forestier dans le Bassin parisien entre le Mésolithique et le Haut Moyen Age*. Thèse, Univ. de Franche-Comté. 248 p.
- 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 Université Nancy I, I.N.R.A. lab. de phytoécologie Forestière. 200 p.
- BILLAMBOZ A. 1992 :** Tree-ring analysis from an archaeodendrological perspective. The structural timber from the South West German lake dwellings. *Dans : Tree-rings and environment : Proceedings of the international dendrochronological symposium, sept 1990, Ystad, Sweden.* BARTOLIN T.S., BERGLUND B.E., ECKSTEIN D. & SCHWEINGRUBER F.H. (Eds.) Lundqua Report 34. 34-40.
- BILLAMBOZ A. 1996 :** Tree-rings and pile dwellings Southwestern Germany : following in the footsteps of Bruno Huber. *Dans : Tree Rings, Environment and Humanity. Proceedings of the International Conference on Tree Rings, May 1994, Tucson, Arizona.* DEAN J. S., MEKO D.M. & SWETNAM T.W. (Eds.) Radiocarbon 1996. 471-483.
- BONNAMOUR L., MARINVAL P., MARGUERIE D., LAMBERT G.N., LAVIER C. & POULAIN T. 1990 :** Les habitats du bronze Final III dans la moyenne vallée de la Saône, au sud de Chalon et le Gué-des-Piles. *Dans : Un monde villageois, habitat et milieu naturel en Europe de 2000 à 500 av. J.-C. catalogue d'exposition Musée archéologique de Lons-le-Saunier.* Cercle Girardot, section archéologie de la Société d'Emulation du Jura. 97-111.
- BOULET A. 1992 :** L'eau : système hydraulique et principes de gestion. *Dans : La Brière.* Parc Naturel Régional de Brière, CRDP des Pays de Loire. 23-29.
- BOURA F., FAYE O., GEBUS L., KLAG T., LAMBERT G.N. & LAVIER C. 1990 :** Le gisement de Vandières les Grandes Corvées (Meurthe et Moselle). *Dans : Un monde villageois, habitat et milieu naturel en Europe de 2000 à 500 av. J.-C. catalogue d'exposition Musée archéologique de Lons-le-Saunier.* Girardot, section archéologie de la Société d'Emulation du Jura. 73-82.
- BOURQUIN-MIGNOT C. 1993 :** Dendrochronologie du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) sur le site médiéval de Charavines-Colletière (Isère). DEA univ. Franche-Comté, labo. Chrono-écologie. 54 p.
- BRÄKER O.U. 1981 :** Der Alterstrend bei Jahrringdichten und Jahrringbreiten von Nadelholzern und sein Ausgleich. *Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, 142 : 75-102.*
- 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, Biologie Forstière, Univ. Nancy I. 60 p.
- BRIFFA K.R. 1987 :** Relationships between British climate and the radial growth of *Quercus* species - an empirical approach to climate reconstruction. *Dans : Applications of tree-ring studies. Current research in dendrochronology and related subjects.* WARD R.G.W. (Ed.) British Archaeological Reports International Series 333.
- BRIFFA K.R., BARTHOLIN T.S., ECKSTEIN D., JONES P.D., KARLEN W., SCHWEINGRUBER F.H. & ZETTERBERG P. 1990 :** A 1400 year tree-ring record of summer temperatures in Fennoscandia. *Nature, 346 : 434-439.*
- BRIFFA K.R. & JONES P.D. 1990 :** Basic chronology statistics and assessment. *Dans : Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences.* COOK E.R. & KAIRIUKSTIS L.A. (Eds.) Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- BRIFFA K.R., JONES P.D., SCHWEINGRUBER F.H., KARLEN W. & SHIYATOV S. 1996 :** Tree-ring variables as proxy-climate indicators : problems with low-frequency signals. *Dans : Climatic variations and forcing mechanisms of the last 2000 years : Proceedings of the NATO advanced research workshop.* Ciocco, Lucca, Italie, 3-7 oct. 1994. JONES P.D. (Ed.) NATO Scientific Affairs Division, NATO ASI series : Ser. I, Global environmental change, Vol.41. 9-41.
- BRIFFA K.R., JONES P.D., WIGLEY T.M.L., PILCHER J.R. & BAILLIE M.G.L. 1983 :** Climate reconstruction from tree rings : part 1, basic methodology and preliminary results for England. *Journal of Climatology, 3 : 233-242.*
- BRIFFA K.R., JONES P.D., WIGLEY T.M.L., PILCHER J.R. & BAILLIE M.G.L. 1986 :** Climate reconstruction from tree rings : part 2, spatial reconstruction of summer mean sea-level pressure patterns over Great Britain. *Journal of Climatology, 6 : 1-15.*
- BRONK RAMSEY C. 1994 :** Analysis of chronological informatio and radiocarbon calibration : the program OxCal. *Archaeological Computing Newsletter, 41 : 11-16.*
- BROWN D.M., MUNRO M.A.R., BAILLIE MGL & PILCHER J.R. 1986 :** Dendrochronology - the absolute Irish standard. *Dans : Proceedings of the 12th international 14C conference.* STUIVER M. & KRA R. (Eds.) Radiocarbon 28(A). 279-283.
- CABBOI S., DEFFRESSIGNE S. & LIMONDIN N. 1994 :** Des fermes de l'âge du Bronze. *Dans : Découvertes archéologiques sur l'autoroute A5.* Archéologia, Hors Série N°3H. 36-38.
- CHEssel D. & THIOULOUSE J. 1996 :** CoInertia. *Dans : Programmathèque ADE-4. Analyses multivariées et expression graphique des données environnementales. Fiches modules 4 Couplages et Contraintes.* THIOULOUSE J., CHEssel D., DOLEDEC S. & OLIVIER J.M. (Eds.) Laboratoire de biométrie-génétique et biologie des populations, UMR 5558 CNRS, Université Claude Bernard Lyon-1,



<http://pbil.univ-lyon1.fr/ADE-4>. 1-26.

**CHOISNEL E. & PAYEN D. 1989** : L'agrométéorologie. Dans : *Le grand atlas de la France rurale*. BRUN A., STEPHAN J.M. & BONTRON J.C. (Eds.) INRA, SCEES, J.P. de MONZA. 410-425.

**CLEMENT B. , ROZE F. & TOUFFET J. 1982** : Contribution à l'étude de la végétation de la Brière : l'analyse phytosociologique. *Botanica Rhedonica, serie A, 17* : 105-148.

**CLEVELAND W.S. 1985** : *The elements of graphing data*. Wadsworth and Brooks/Cole, Pacific Grove, California. 323 p.

**COCHARD H., BREDA N., GRANIER A. & AUSSÉNAC G. 1992** : Vulnerability to air embolism of three European oak species (*Quercus petraea*, *Q. pubescens*, *Q. robur*). *Annales des Sciences Forestières, 42* : 225-233.

**COCHARD H. & TYREE M.T. 1990** : Xylem dysfunction in *Quercus* : Vessel sizes, tyloses, cavitation and seasonal changes in embolism. *Tree Physiology, 6* : 393-407.

**COOK E., BRIFFA K.R., SHIYATOV S., MAZEPA V. & JONES P.D. 1990** : Data analysis. Dans : *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences*. COOK E. & KAIRIUKSTIS L.A. (Eds.) Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 97-162.

**CORONA E. 1983** : Dendrocronologia in Italia. *Dendrocronologia, 1* : 21-35.

**DELORME A. 1972** : *Dendrochronologische Untersuchungen an Eichen des Südlichen Weser- und Leineberglandes*. Thèse Univ. Göttingen. 137 p.

**DEVALS C. 1995** : *Opération Bassin du Brivet*. Rapport de sauvetage urgent. SRA Pays de Loire, Nantes. 153 p.

**DEVALS C. 1997** : *Le Brivet, étude des pirogues*. rapport d'opération. SRA Pays de Loire, Nantes. 47 p.

**DOUCERAIN C. & GIRARD CLOS O. 1998** : Etudes dendrochronologiques sur les bâtiments de l'ouest de la France. Dans : *La construction en Anjou au Moyen Age. Actes de la table ronde d'Angers des 29 et 30 mars 1996*. PRIGENT D. & TONNERRE N.Y. (Eds.) Presses de l'Université d'Angers. 267-293.

**DOUGLASS A.E. 1921** : Dating our prehistoric ruins. *Natural history, 21* : 27-30.

**DOUGLASS A.E. 1934** : Editorial. *Tree-ring Bulletin, 1, 1* : 2-3.

**DUCHAUFOUR P. 1984** : *Pédologie. Sol, végétation, environnement*. Masson, Paris. 289 p.

**DUPONT P. 1972** : La végétation du parc de Brière. *Penn ar bed, 69* : 282-295.

**DUPOUET J.L., DENIS J.B. & BECKER M. 1992** : A new method of standardization for examining long-term trends in tree-ring chronologies. Dans : *Tree-rings and environment : Proceedings of the international dendrochronological symposium, sept 1990, Ystad, Sweden*. BARTOLIN T.S., BERGLUND B.E., ECKSTEIN D. & SCHWEINGRUBER F.H. (Eds.) Lundqua Report 34. 85-88.

**ECKSTEIN D. 1969** : *Entwicklung und Anwendung der Dendrochronologie zur Alterbestimmung des Siedlung Haithabu*. Thèse de doctorat, Université de Hambourg. 113 p.

**EDOUARD J.L., TESSIER L. & THOMAS A. 1992** : Holocene paleoenvironment in the french Alps : dendrochronological approach. Dans : *Tree-rings and environment : Proceedings of the international dendrochronological symposium, sept 1990, Ystad, Sweden*. BARTOLIN T.S., BERGLUND B.E., ECKSTEIN D. & SCHWEINGRUBER F.H. (Eds.) Lundqua Report 34. 90-93.

**EGGER H., GASSMANN P. & BURRI N. 1985** : Situation actuelle du travail au laboratoire de dendrochronologie de Neuchâtel. *Dendrocronologia 3* : 177-192.

**FAIRBRIDGE R.W. 1961** : Eustatic changes in sea level. *Physics and Chemistry of the Earth, 4* : 99-185.

**FIRBAS F. 1949** : Spät- und nacheiszeitliche wald geschichte Mitteleuropeas nördlich der Alpen. *Fisherjena*

**FOUCAULT de B. 1986** : *Systématique, structuralisme et synsystématique des prairies hygrophiles des plaines atlantiques françaises*. Thèse d'Etat, Université de Rouen. 2 t., 675 p.

**FRITTS H.C. 1976** : *Tree rings and climate*. Academic Press, London. 567 p.

**FRITTS H.C., SMITH D.G., CARDIS J.W. & BUDELSKY C.A. 1965** : Tree-ring characteristics along a vegetation gradient in northern Arizona. *Ecology, 46, 4* : 393-401.

**GADBIN-HENRY C. 1994** : *Etude dendroécologique de Pinus pinea L. Aspects méthodologiques*. Thèse de l'Université Aix-Marseille III. 80 p.

**GADECEAU E. 1923** : La Grande Brière. *La Nature, 2854* : 225-229.

**GARNIER M. 1974a** : Longues séries de mesures de précipitations en France.Zone 1 (Nord, Région parisienne et Centre). *Mémorial de la Météorologie Nationale, N°53, fasc.1* : 1-109.

**GARNIER M. 1974b** : Longues séries de mesures de précipitations en France.Zone 3 (Nord-est, Est et Est du Massif Central). *Mémorial de la Météorologie Nationale, N°53, fasc.3* : 1-114.

**GARNIER M. 1974c** : Longues séries de mesures de précipitations en France.Zone 2 (Ouest et Sud-Ouest). *Mémorial de la Météorologie Nationale, N°53, fasc.2* : 1-109.

**GARNIER M. 1974d** : Valeur moyenne des hauteurs de précipitations en France. Période 1951-1970. *Monographie de la météorologie nationale, 91* : 117 p.

- GASSMANN P., LAMBERT G., LAVIER C., avec BERNARD V. & GIRARDCLOS O. 1996 :** Pirogues et analyses dendrochronologiques. Dans : *Pirogues monoxyles d'Europe centrale*. ARNOLD B. (Ed.) Musée d'Archéologie de Neuchâtel, Archéologie neuchâteloise, 21,t2. 89-127.
- GIRARDCLOS O. 1992 :** Datation de structures archéologiques en bois de Brognard (25) et essai de caractérisation par la dendrochronologie des relations Homme-Chênaie au premier siècle de notre ère. D.E.A, Université de Franche-Comté, Laboratoire de Chrono-Ecologie. 54 p.
- GIRARDCLOS O. & L'HOMER A. 1999 :** Datation dendrochronologique d'un coëron dans les marais de Pontorson - Baie du Mont Saint Michel- et potentialité de cette méthode dans l'ouest de la France. *Revue de l'avranchin et du pays de Granville*, mars 1999, (76) 378 : 21-33.
- GIRARDCLOS O., LAMBERT G. & DOUCERAIN C. 1997 :** Etude dendrochronologique préliminaire de bois provenant du bassin du Brivoet (44). Rapport interne laboratoire de Chrono-écologie CNRS-Univ. de Franche-Comté. SRA Pays de Loire, Nantes. 10 p.
- GIRARDCLOS O., LAMBERT G. & LAVIER C. 1996 :** Oak Tree-ring Series from France Between 4000 BC and 800 BC. Dans : *Tree Rings, Environment and Humanity. Proceedings of the International Conference on Tree Rings, May 1994, Tucson, Arizona*. DEAN J. S., MEKO D.M. & SWETNAM T.W. (Eds.) Radiocarbon 1996. 751-768.
- GODWIN H. 1940 :** Pollen analysis and forest history of England and Walles. *New Phytologist*, 39, 4 : 370-400.
- GRANIER A., BADEAU V. & BREDA N. 1995 :** Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Revue Forestière Française*, XLVII, N° sp : 59-68.
- GRAY B.M., WIGLEY T.M.L. & PILCHER J.R. 1981 :** Statistical significance and reproducibility of tree-ring response functions. *Tree-ring Bulletin*, 41 : 21-36.
- GRAYBILL. 1982 :** Chronology development and analysis. Dans : *Second International Workshop on Global Dendroclimatology, Norwich 1980, "climate from tree-rings"*. HUGHES M.K. (Ed.) Cambridge University Press.
- GUIBAL F. 1984 :** Contribution dendroclimatologique à la connaissance de la croissance du Cèdre de l'Atlas dans les reboisements du sud-est de la France. Thèse Université de Aix-Marseille III. 137 p.
- GUIBAL F. 1991 :** La dendrochronologie : méthodes et potentialités. *Revue Archipal* (30) : 85-103.
- GUIBAL F. 1996 :** Dendrochronological studies in the french mediterranean area. Dans : *Tree Rings, Environment and Humanity. Proceedings of the International Conference on Tree Rings, May 1994, Tucson, Arizona*. DEAN J. S., MEKO D.M. & SWETNAM T.W. (Eds.) Radiocarbon 1996. 505-514.
- GUIBAL F. 1992 :** L'analyse dendroécologique de quatre populations de Chênes sessiles de la dépression périvosgienne. Dans : *Cahiers du C.U.E.R., 9. L'étude d'un pays comtois : la Vôge et la Dépression périvosgienne*. BIDAULT M. (Ed.) C.U.E.R, Besançon. 155-164.
- GUIBAL F., LAMBERT G.N. & LAVIER C. 1991 :** Application de trois tests de synchronisation à trois types de données. *Dendrochronologia* 9 : 193-206.
- GUIBAL F. & PILCHER J.R. 1988 :** Remarques sur la comparaison des séries d'épaisseurs des cernes des Côtes du Nord à celles d'Ille-et-Vilaine. *Revue d'Archéométrie*, 12 : 29-33.
- GUIOT J. 1981 :** Analyse mathématique de données géophysiques. Applications à la dendrochronologie. thèse univ. catholique de Louvain.
- GUIOT J. 1986 :** ARMA techniques for modelling tree-ring response to climate and for reconstructing variation of paleoclimates. *Ecol. Modelling*, 33 : 149-171.
- GUIOT J. & ROUX M. 1993 :** Reconstruction statistique des environnements passés à partir de données paléoécologiques. Dans : *Biométrie et environnement*. LEBRETON J.D. & ASSELAIN B. (Eds.) MASSON. 123-150.
- HOFFSUMMER P. 1989 :** L'évolution des toits à deux versants dans le bassin mosan : l'apport de la dendrochronologie (XIè-XIXè siècle). Thèse en 2 volumes, Université de Liège. 326 p,352 p.
- HOLLSTEIN E. 1965 :** Jahrringchronologische Datierung von Eichenhölzer ohne Waldkante. *Bonner Jahrbücher des Reinischenlandesmuseum*, 165 : 11-27.
- HOLLSTEIN E. 1980 :** *Mitteleuropäische Eichenchronologie*. Philipp von Zabern, Mainz am Rhein. 273 p.
- HUBER B. & GIERTZ-SIEBENLIST. 1978 :** Our 1000-year Oak annualring chronology. Dans : *Dendrochronology in Europe. Principles, interpretations and applications to archaeology and history. Symposium juin 1977, Greenwich*. FLECHER J. (Ed.) British Archaeological Reports International Series 51.
- HUBER B. & VON JAZEWITSCH W. 1956 :** Tree-ring studies of the forestry-botany institutes of Tharandt and München. *Tree-ring Bulletin*, (21), 1-4 : 28-30.
- HUGHES M.K., GRAY B., PILCHER J.R., BAILLIE M.G.L. & LEGGETT P. 1978 :** Climatic signals in British Isles tree-ring chronologies. *Nature*, 272 : 605-606.
- HUNTLEY B. 1990 :** European post-glacial forests : compositional changes in response to climatic

change. *Journal of Vegetation Science* 1 : 507-518.

**HUNTLEY B. & BIRKS H.J.B. 1983** : *An atlas of past and present pollen maps for Europe, 0-13000 years ago*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

**JAMBU P. 1971** : *Contribution à l'étude de l'humification dans les sols hydromorphes calciques. Sols du Marais Poitevin*. Thèse Université de Poitiers. 191 p.

**JANSMA E. 1995** : *RememberRings : the development and application of local and regional tree-ring chronologies of Oak for the purposes of archaeological and historical research in the Netherlands*. R.O.B., Nederlandse Archeologische Rapporten, 19, Amsterdam. 149 p.

**JONES P.D., BRIFFA K.R. & PILCHER J.R. 1984** : Riverflow reconstruction from tree rings in southern Britain. *Journal of Climatology*, 4 : 461-472.

**KAENNEL M. & SCHWEINGRUBER F.H. 1995** : *Multilingual glossary of dendrochronology*. Swiss Federal Institute of Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf, Paul Haupt Publishers, Berne, Stuttgart, Vienna. 467 p.

**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.

**KRAPIEC M. 1996** : Subfossil oak chronology (474 BC-1529 AD) from southern Poland. *Dans : Tree Rings, Environment and Humanity. Proceedings of the International Conference on Tree Rings, May 1994, Tucson, Arizona*. DEAN J. S., MEKO D.M. & SWETNAM T.W. (Eds.) Radiocarbon 1996. 813-819.

**LAMARCHE V.C. & STOCKTON C.W. 1974** : Chronologies from temperature-sensitive bristlecone pines at upper treeline in western United States. *Tree-ring Bulletin*, 34 : 21-45.

**LAMARCHE V.C.Jr & HIRSCHBOECK K.K. 1984** : Frost ring in trees as records of major volcanic eruptions. *Nature*, 307 : 121-126.

**LAMBERT G. & LAVIER C. 1990** : Dendrochronologie : la datation à l'année près. *Dans : Les mystères de l'archéologie. Les sciences à la recherche du passé*. Collectif & G.M.P.C.A. (Eds.) Caisse Nationale des Monuments Historiques, Presses Universitaires de Lyon. 164-172.

**LAMBERT G., LAVIER C., PERRIER P. & VINCENOT S. 1988** : Pratique de la Dendrochronologie. *Histoire et Mesure*, III-3 : 279-308.

**LAMBERT G. & LAVIER C. . 1989** : Datation dendrochronologique de deux sites Néolithique final jurassien : la station IV de Clairvaux-les-Lacs (Jura) et la station 2AC de Chalain (Marigny Jura). *Dans : Les stations du Néolithique final de Clairvaux et de Chalain (Jura)*. PETREQUIN P. (Ed.) Gallia Préhistoire. 215-219.

**LAMBERT G.N. & LAVIER C. 1985** : L'étude dendrochronologique de la pirogue de Chalain supposée néolithique. *Dans : Présentation des collections du Musée de Lons-le-Saunier, 1 : Néolithique Chalain-Clairvaux, fouilles anciennes*. Musée d'archéologie de Lons-le-Saunier. 223-228.

**LAMBERT G.N. & LAVIER C. 1992a** : L'étalon dendrochronologique Bourgogne 29. *Dans : Les veines du temps. Lectures de bois en Bourgogne*. MAURICE B. & LAMBERT G.N. (Eds.) Catalogue d'exposition Musée Rolin, Autun. 123-156.

**LAMBERT G.N. & LAVIER C. 1992b** : *Analyse dendrochronologique d'un site du bronze Final : Laines-aux-Bois à Bréban (Aube)*. rapport de datation. CNRS, Lab. de Chrono-écologie, Univ. de Franche-Comté. 4p, 5fig.

**LAMBERT G.N., LAVIER C. & GUIBAL F. 1992** : La dendrochronologie, une méthode précise de datation. *Mémoire de la Société Géologique de France*, N°160 : 109-117.

**LANIER L., BADRE M., DELABRAZE P., DUBOURDIEU J. & FLAMMARION J.P. 1994** : *Précis de sylviculture*. 2e ed. ENGREF, Nancy. 477 p.

**LAVIER C. 1996** : *Dendrochronologie appliquée à l'archéologie : élaboration d'une chronologie du chêne (Quercus sp.) pour le Néolithique à partir des sites lacustre de Clairvaux-les-lacs et de Chalain (Jura, France)*. Mémoire de DEA Univ. Franche-Comté. 87 p.

**LEBOURGEOIS F. 1995** : *Etude dendroécologique et ecophysiologique du pin laricio de Corse (Pinus nigra laricio) en région Pays de la Loire*. thèse, université Paris XI Orsay. 206 p.

**LEBOURGEOIS F. 1997** : *RENECOFOR : Etude dendrochronologique des 102 peuplements du réseau*. Office National des Forêts, Département des recherches Techniques. 307 p.

**LEMEE G. 1978** : *Précis d'écologie végétale*. Masson, Paris. 290 p.

**LEUSCHNER H.H. 1992** : Subfossil trees. *Dans : Tree-rings and environment : Proceedings of the international dendrochronological symposium, sept 1990, Ystad, Sweden*. Lundqua Report 34. 193-197.

**LEUSCHNER H.H. & DELORME A. 1988** : Tree-ring work in Göttingen : absolute oak chronologies back to 6255 BC. *Dans : Wood and Archaeology*. HACKENS T., MUNAUT A.V. & TILL C. (Eds.) PACT, 22, II.5. 123-132.

**LEUSCHNER H.H., DELORME A & HÖFFLE H.C. 1987** : Dendrochronological study of oak trunks found in bogs of Northwest Germany. *Dans : Proceedings of the International Symposium on Ecological Aspects of Tree-Ring Analysis*. JACOBY G.C. & HORNBECK J.W. (Eds.) US Dept. of Energy, CONF-

8608144. 298-318.

**LOCATELLI C. 1994** : *Chronologies du premier millénaire avant notre ère dans le nord-est de la France. Questions et réponses du dendrochronologue.* Maîtrise Univ. Franche-Comté. 130 p.

**MAGNANON S. 1991** : *Contribution à l'étude des prairies naturelles inondables des marais de Donges et de l'estuaire de la Loire. Phyto-écologie, phytosociologie, valeur agronomique.* thèse de doctorat, Univ. Nantes.

**MAGNY M. 1993** : Holocene fluctuations of lake levels in the French Jura and sub-Alpine ranges, and their implications for past general circulation patterns. *The Holocene*, 3, 4 : 306-313.

**MAGNY M. 1995** : *Une histoire du climat. Des derniers mammouths au siècle de l'automobile.* ed. Errance. 176 p.

**MAILLARD Y. & BOULET A. 1988** : Régime des eaux des marais du bassin du Brivet (Brière, Loire-Atlantique) : compartiments hydrauliques, limnigraphie et implications hydro-écologiques. *Dans : Actes du colloque. Third international wetland conference, Rennes 19-23 sept.* 163-164.

**MANGERUD J., ANDERSEN S.T., BERGLUND B.E. & DONNER J.J. 1974** : Quaternary stratigraphy of Norden, a proposal for terminology and classification. *Boreas*, 3 : 109-128.

**MARGUERIE D. 1992** : *Evolution de la végétation sous l'impact anthropique en Armorique du Néolithique aux périodes historiques : études palynologiques et anthracologiques des sites archéologiques et des tourbières associées.* Thèse Université de Rennes. 412 p.

**MARTINEAU R. 1997** : *Rapport d'étude de la céramique protohistorique du Brivet.* Rapport administratif. SRA des Pays de Loire, Nantes. 22 p.

**MAZEPA V.S. 1982** : Method of computing annual-growth indexes from a generalized dendroclimatological series. *Soviet Journal of Ecology*, 13 : 172-177.

**MILLET B. & MANACHERE G. 1983** : *Introduction à l'étude des rythmes biologiques.* Vuibert, Paris. 88 p.

**MONSERUD R.A. 1986** : Time-series analyses of tree-ring chronologies. *Forest Science*, 32, 2 : 349-372.

**MORDANT C. & MORDANT D. 1989** : Noyen-sur-Seine, site mésolithique en milieu humide fluvial. *Dans : L'homme et l'eau au temps de la préhistoire, Actes du 112e Congrès des Sociétés Savantes de Lyon (1987).* CTHS, Paris. 34-52.

**MORZADÉC-KERFOURN M.T. 1974** : Variations de la ligne de rivage armoricaine au Quaternaire. Analyse polliniques de dépôts organiques littoraux. *Mémoires de la société géologique et minéralogique de Bretagne*, 17 : 208 p.

**MUNAUT A. V. 1967** : Etude paléocéologique d'un gisement tourbeux situé à Terneuzen (Pays-Bas). *Ber. Rijksdienst Oudheidk. Bodemonderzoek*, 17 : 7-27.

**MUNAUT A. V. 1966** : Recherches dendrochronologiques sur *Pinus silvestris*. Etude de 45 pins sylvestres récents originaires de Belgique. *Agricultura*, 14 : 193-232.

**MUNRO M.A.R. 1984** : An improved algorithm for crossdating tree-ring series. *Tree-ring Bulletin*, 44 : 17-27.

**NEFAOUI M. 1996** : *Dendroécologie, productivité et dynamique de la croissance radiale du Pin maritime naturel au Maroc.* thèse Université Aix-Marseille III, Institut Méditerranéen d'Ecologie et Paléocéologie. 2t, 146, 157 p.

**NEYSES M. 1991** : Kritische Anmerkungen zu Dendrodaten der Eisenzeit im Hunsrück-Nahe- und Mittelrheingebiet. *Dans : Studien zur Eisenzeit im Hunsrück-Nahe-Raum, actes du symposium, Birkenfeld, 1987, Trier Zeitschrift. Beiheft 13, Selbstverlag des Rheinschen Landesmuseums Trier.* 295-308.

**NIEMINEN T.M. 1988** : *Etude dendroécologique du chêne (pédonculé et sessile) et du hêtre dans une forêt de la plaine Lorraine (F.D. d'Amance).* D.E.A. Université de Nancy 1. 40 p.

**NOLA P. 1996** : Climatic signal in earlywood and latewood of deciduous Oaks from northern Italy. *Dans : Tree Rings, Environment and Humanity. Proceedings of the International Conference on Tree Rings, May 1994, Tucson, Arizona.* DEAN J. S., MEKO D.M. & SWETNAM T.W. (Eds.) Radiocarbon 1996. 249-258.

**ORTON C.R. 1983** : The use of Student's t-test for matching tree-ring patterns. *Bulletin of the Institute of Archaeology of the University of London*, 20 : 101-105.

**OZENDA P. 1994** : *Végétation du continent européen.* Delachaux et Niestlé. 271 p.

**PAUTREAU P. 1995** : *1036 avant J.-C. ... Coulon.* Parc Naturel Régional du Marais Poitevin. 71 p.

**PETERS K., JACOBY G.C. & COOK E.R. 1981** : Principal components analysis of tree-ring sites. *Tree-ring Bulletin*, 41 : 1-19.

**PETREQUIN P., ARBOGAST R.M. & MAGNY M. . 1995** : Expansions et déprises agricoles au Néolithique : populations, cultures céréalières et climat dans la Combe d'Ain (Jura, France) de 3700 à 2500 av. J.-C. *Dans : L'homme et la dégradation de l'environnement. XVe rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, Juans-les-Pins.* editions APDCA. 19-41.

- PILCHER J.R. 1987** : A 700 year dating chronology for Northern France. *BAR International Series* 333 : 127-139.
- PILCHER J.R. 1990** : The ecology of subfossil oakwoods on peat. *Dans : Ecology and conservation of irish peatlands*. DOYLE G.J. (Ed.) Royal Irish Academy, Dublin. 41-47.
- PILCHER J.R., BAILLIE M.G.L., BROWN D.M. & McCORMAC F.G. 1996** : Hydrological data from the long irish subfossil oak records. *Dans : Tree Rings, Environment and Humanity. Proceedings of the International Conference on Tree Rings, May 1994, Tucson, Arizona*. DEAN J. S., MEKO D.M. & SWETNAM T.W. (Eds.) Radiocarbon 1996. 259-264.
- PILCHER J.R., BAILLIE M.G.L., SCHIMDT B. & BECKER B. 1984** : A 7272 year Tree-ring chronology for western Europe. *Nature*, 312 (8) : 150-152.
- PILCHER J.R. & GRAY B. 1982** : The relationships between oak tree growth and climate in Britain. *Journal of Ecology*, 70 : 297-304.
- PRIGENT D. 1977** : *Contribution à l'étude de la transgression flandrienne en basse Loire. Apport de l'archéologie*. thèse Univ. Nantes. 177 p.
- RAMEAU J.C., MANSION D., DUME G., TIMBAL J., LECOINTE A., DUPONT P. & KELLER R. 1989** : *Flore forestière française. Guide écologique illustré. 1 plaines et collines*. Institut pour le développement forestier. 1785p.
- RENAUDIN S. 1996** : *Les émondes de Haute-Bretagne : Etude dendrologique du Chêne et perspectives archéologiques*. D.E.A Université de Rennes I, Laboratoire d'Anthropologie. 93 p.
- RINN F. 1989** : *TSAP, Time Series Analysis and Presentation version 3.0 Reference Manual*. Frank Rinn, Heidelberg. 263 p.
- ROMANE F. 1972** : Utilisation de l'analyse multivariable en phytoécologie. *Investigacion pesquera*, 36, 2 : 131-139.
- ROYER JM., RAMEAU JC. & BIDAULT M. 1975** : Apport de la phytosociologie à la connaissance des territoires phytogéographiques. Application à la Bourgogne calcaire. *Dans : Compte-rendu du 99e congrès national des sociétés savantes, Besançon 1974*. 290-303.
- RUFFALDI P. 1993** : *Histoire de la végétation du Jura méridional depuis le retrait du glacier würmien à partir des analyses palynologiques du lac de Cerin (Ain, France)*. Thèse, Université de Franche-Comté. 254 p.
- SAFAR W. 1994** : *Contribution à l'étude dendroécologique du Pin d'Alep (Pinus halepensis Mill.) dans une région semi-aride d'Algérie (Ouled Nail, Aurès, Hodna)*. Thèse de l'univ. Aix-Marseille III, labo. de Botanique historique. 215 p.
- SANDER C. & LEVANIC T. 1996** : Comparison of t-values calculated in different dendrochronological programmes. *Dendrocronologia*, 14 : 269-272.
- SCHWEINGRUBER F.H., ECKSTEIN D., SERRE-BACHET F. & BRÄKER O.U. 1990** : Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrocronologia*, 8 : 9-38.
- SERRE F. 1977** : A factor analysis of correspondances applied to ring widths. *Tree-Ring Bulletin*, 37 : 21-31.
- SERRE F. 1978** : The dendroclimatological value of the european larch (*Larix decidua* Mill) in the French Maritime Alps. *Tree-Ring Bulletin*, 38 : 25-34.
- SHENNAN I. 1986** : Flandrian sea-level changes in the Fenland. II : tendencies of sea-level movement, altitudinal changes, and local and regional factors. *J. Qua. Sci.*, 1,2 : 155-179.
- STUDHALTER R.A. 1956** : Early history of crossdating. *Tree-ring Bulletin*, (21), 1-4 : 31-35.
- STUIVER M. & PEARSON G.W. 1986** : High precision calibration of the radiocarbon time scale, AD 1950-500BC. *Radiocarbon*, 28,2B : 805-838.
- TESSIER L. 1984** : *Dendroclimatologie et écologie de Pinus silvestris L. et Quercus pubescens Willd. dans le Sud-Est de la France*. Thèse université d'Aix-Marseille III, laboratoire de botanique historique et palynologie. 275 p.
- THOMAS D.H. 1976** : *Figuring anthropology : first principles of probability and statistics*. Holt, Rhinehart and Winston, New York.
- THORNTHWAITE. 1948** : An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 38 : 55-94.
- TOMASSONE R., DERVIN C. & MASSON J.P. 1993** : *Biométrie. Modélisation de phénomènes biologiques*. MASSON. 553 p.
- TRENARD Y. & DUCHATEAU J.L. 1985** : Dendrochronologie du Chêne dans la région de Paris. *Dendrocronologia*, 3 : 9-23.
- VIELLET A. 1997** : *Etude dendrochronologique des chênes et des frênes (Quercus sp. - Fraxinus excelsior) provenant du site Néolithique final de Chalain -station 19- (Jura)*. 82 p. Mémoire de DEA Univ. Franche-Comté. 82 p.

- VINCE A. 1965 : *Notre Brière*. Nantes. 75 p.
- VINCE A., GRACINEAU-ALASSEUR & POSTEL-VINAY. 1981 : *Briéron...naguère*. auteurs. 288 p.
- VISSET L. 1979 : *Recherches palynologiques sur la végétation Pléistocène et Holocène de quelques sites du district phytogéographique de Basse-Loire*. thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Nantes. Société des sciences naturelles de l'Ouest de la France. 282 p.
- VISSET L. 1982 : Nouvelles recherches palynologiques (Boréal-Actuel) dans les marais de Brière : Ile d'Errand en Saint Malo-de-Guersac (Loire Atlantique France). *Bulletin de l'association française pour l'étude du Quaternaire*, 1 : 29-38.
- VISSET L. 1997 : Parc naturel régional de Brière. *Géochronique*, 62 : 1 p.
- VISSET L., GIRARD CLOS O. & LAMBERT G.N. 1994 : La forêt de chênes sur tourbe à Ile d'Errand dans les marais de Brière (Massif Armoricain - France) Palynologie et premiers résultats dendrochronologiques. *Quaternaire*, 5 (2) : 69-77.
- VISSET L. & VOELTZEL D. 1996 : Marshlands of the Loire estuary. *Dans : palaeoecological events during the last 15000 years. Regional syntheses of palaeoecological studies of lakes and mires in Europe*. BERGLUND B.E., BIRKS H.J.B., RALSKA-JASIEWICZOWA M. & WRIGHT H.E. (Eds.) John Wiley and sons. 600-612.
- VISSET L. & WILLKOMM H. 1988 : Palynologische Untersuchung der Moore der Crôle im Haut Brivet (Brière), Armorikanisches massiv - Frankreich. *Schr. Naturwiss. Ver. Schlesw.-Holst., vol 58, Kiel* : 93-102.
- WALKER F.S. 1978 : Pedonculate and sessile oaks : species determination from differences between their wood. *Dans : Dendrochronology in Europe. Principles, interpretations and applications to archaeology and history. Symposium juin 1977, Greenwich*. FLECHER J. (Ed.) British Archaeological Reports International Series 51. 329-338.
- WIGLEY T.M.L., BRIFFA K.R. & JONES P.D. 1984 : On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23 : 201-213.
- YAMAGUCHI D.K. 1986 : Interpretation of cross correlation between tree-ring series. *Tree-ring Bulletin*, 46 : 47-54.
- ZAR H.J. 1996 : *Biostatistical analysis*. 3e édition, Prentice-Hall, New Jersey. 659 p.

# Annexes





## ANNEXE 1

### Analyses multivariées utilisées

#### Analyse en composantes principales (ACP)

Les  $m$  variables, en colonne dans un tableau, définissent un espace de  $m$  dimensions  $R_m$ . L'ACP a pour but de transformer ce système d'axes non orthonormés en un système d'axes orthogonaux. Les  $m$  composantes principales résultantes sont de nouvelles variables, indépendantes, ne présentant pas de corrélation. Elles sont des combinaisons linéaires des variables initiales qui possèdent une variance maximum. La valeur propre associée à la composante exprime cette variance.

Si les variables initiales sont centrées normées, ce qui est le cas ici, la recherche des composantes principales peut être réalisée à partir de la matrice de corrélation des variables. Dans le cas contraire, plus spécifique, la recherche se fait à partir de la matrice des covariances. Les coefficients linéaires des composantes principales et les valeurs propres permettent de définir les coordonnées des points variables sur les axes principaux. Des variables seront d'autant plus proches dans cet espace qu'elles sont corrélées.

Ce qui est décrit pour l'espace  $R_m$  est valable pour un espace  $R_n$  défini par les  $n$  lignes du tableau. En fait, ces deux espaces ne sont pas indépendants, ils présentent une dualité. Les composantes principales dans l'espace des observations peuvent être déduites des précédentes (CHESSEL et MERCIER 1993).

Si l'objectif de l'analyse est exploratoire, les premiers axes, en général, 1 à 3, portant le plus de variance sont sélectionnés pour une représentation en cartes. Leur sélection se fait, en général, à partir d'un graphe des valeurs propres. Dans ce cas on ne cherche pas à conserver "beaucoup" de variance, que l'on peut penser représentative de l'information portée par le tableau, mais à sélectionner la partie d'information pertinente pour l'analyse, même si elle est faible.

Si l'objectif est au contraire de perdre le moins de variance tout en diminuant le nombre de variables utilisés, un plus grand nombre de composantes principales peut être conservé. Ce peut être le cas comme pour les variables climatiques lorsque l'on dispose de beaucoup de variables corrélées entre elles donc redondantes.

L'ACP peut être utilisée sur tous les types de données mais elle est classiquement utilisée pour les variables continues, centrées normées si elles ne sont pas homogènes.

#### Analyse Factorielle des correspondances (AFC)

Le terme générale d'un tableau  $X$ ,  $n_{ij}$ , est la valeur observée pour la  $i$  ème ligne des  $I$  qu'il compte et pour la colonne  $j$ , parmi  $J$ . On note  $n_{i.}$  la somme des  $n_{ij}$  pour une ligne, et  $n_{.j}$  la somme pour une colonne.  $n_{..}$  est la somme de toutes les valeurs du tableau. Les valeurs  $n_{ij}$  sont divisées par  $n_{.j}$  pour produire le tableau de profils des lignes et par  $n_{i.}$  pour produire celui des colonnes (BENZECRI 1980). Ce qui revient à transformer  $n_{ij}$  en fréquences. Si les AFC sont performantes sur les tables de fréquences, notamment de contingences (ROMANE 1972), implicitement elles transforment toutes les données en fréquences. Ces tableaux des profils sont utilisés comme coordonnées des deux nuages dans les espaces  $RI$  et  $RJ$ . En fait ils présentent une dualité et seul le plus petit est analysé. Ce qui est dit, par exemple, des lignes est donc valable pour les colonnes. Les valeurs  $n_{i.}$

sont rapportées à  $n..$ , ceci évalue la participation à l'ensemble de la ligne. Le résultat est attribué comme poids à chaque point de la ligne. Ceci définit également un profil ligne moyen qui est le centre de gravité du nuage. L'analyse va consister à observer la dispersion des points du nuage autour du barycentre en tenant compte des poids (BENZECRI 1980). Tout se passe comme si l'on comparait les profils des lignes au profil moyen qui définit alors une fréquence théorique, ce qui fait dire que la métrique utilisée est celle du  $X^2$  (TOMASSONE *et al.* 1993). Les points sont d'autant plus proches que leurs profils sont semblables et placés d'autant plus loin du centre de gravité que leur distribution de fréquence est originale et leur poids faible. Ce nuage possède un axe d'allongement qui sert de point de départ au système d'axes deux à deux orthogonaux. La recherche de ces axes repose sur une diagonalisation de matrice (MASSONIE *et al.* 1971). Une valeur propre est associée à chaque axe, elle représente l'inertie qu'il porte. Si l'on avait réalisé les calculs de façon indépendante pour les deux nuages, les valeurs propres produites seraient égales, ce qui permet de représenter les deux nuages dans le même espace. Les nuages  $y$  sont liés, un point colonne est au barycentre des points lignes (BENZECRI 1980).

De façon pratique, la diagonalisation réalisée par le logiciel ADE porte sur un tableau  $Z$  qui est obtenu après un double centrage multiplicatif du tableau  $X$  (CHESSEL et THIOULOUSE 1996). L'analyse porte sur les  $z_{ij}$  définis par :

$$z_{ij} = (p_{ij} - p_i \cdot p_j) / p_i \cdot p_j$$

où  $p_{ij} = n_{ij} / n..$ . Ce point de vue sous-entend que  $n..$  signifie quelque chose par rapport aux  $n_{ij}$ , le tableau doit donc présenter une certaine homogénéité que l'analyse rend implicite en faisant le centrage. Les pondérations utilisées sont alors pour les lignes les  $p_i$  et pour les colonnes les  $p_j$ . Les valeurs propres sont produites et permettent de sélectionner les axes porteurs de la part de variance que l'on juge représentative de l'information. Différents utilitaires permettent la cartographie et l'aide à l'interprétation.

Pour les premiers axes, l'AFC positionne les points pour que la corrélation lignes - colonnes soit la meilleure (CHESSEL et THIOULOUSE 1996). Ce point de vue permet d'utiliser l'AFC comme méthode d'ordination, courante en phytosociologie. Le tableau ordonné selon les coordonnées d'un axe indique la corrélation espèce-relevés. La typologie des relevés qui peut ainsi être obtenue est expliquée par des variables mésologiques, cas de relevés le long d'un transect ou par l'autécologie des espèces, comme en typologie forestière (BAILLY 1989). Dans notre objectif, l'AFC est uniquement exploratoire en cherchant à savoir s'il existe des facteurs communs à toutes les variables. Elle ne sera pas utilisée pour produire de nouvelles variables.

Dans une AFC, le tableau analysé,  $X$ , est constitué de nombres positifs ou nuls, c'est la seule contrainte. Le cas échéant, pour les standardisations de la croissance qui produisent des indices négatifs, le tableau est translaté en ajoutant l'opposé de l'indice minimum. La méthode a été particulièrement mise au point pour les fréquences, mais nous l'avons remarqué, par exemple, l'abondance - dominance de relevés est rapportée au total par ligne ou colonne.

### **Analyse Factorielle des Correspondances Multiples (ACM)**

L'ACM est une analyse multivariée adaptée aux variables qualitatives. Une variable  $j$  qualitative a  $m(j)$  modalités.  $M$  est la somme de toutes les modalités. Le tableau traité est rendu disjonctif complet : chaque modalité est mise en colonne

comme une variable booléenne. Une valeur quelconque,  $vmn$ , vaut 1 si l'individu  $n$  porte la modalité  $m$ , sinon  $vmn$  vaut 0. Le tableau possède donc  $M$  colonnes et  $N$  lignes. L'analyse est une AFC de ce tableau disjonctif. Les valeurs propres produites sont affectées par la multiplication des colonnes exclusives. Notamment, il y a autant de valeur propre nulle que de variables initiales. Elles n'ont plus de sens si elles sont inférieures à l'inverse du nombre de variables quantitatives (TOMASSONE *et al.* 1993). L'analyse est efficace pour un objectif exploratoire. On sélectionne les axes principaux à l'aide du graphe des valeurs propres, en vérifiant qu'elles ne sont pas inférieures au critère proposé par TOMASSONE. Chaque colonne, donc chaque modalité, est représenté par un point sur la carte factorielle. Les modalités peuvent donc être interprétées ensemble ou séparément. ADE propose le calcul d'un rapport de corrélation pour chaque variable et axe principal établi à l'aide de la variance des coordonnées des modalités et des individus (CHESSEL et THIOULOUSE 1996). Ce rapport évalue la participation de la variable à la formation de l'axe, il est donc très utile pour leur interprétation.

L'ACM est adaptée à l'analyse des variables descriptive du milieu, souvent issues de clés de détermination, donc qualitatives. La majorité ont des classes ordonnées dont l'agencement par rapport au axes principaux est également un outil interprétatif important.

### Couplage d'analyses

Dans un point de vue symétrique, l'analyse de deux tableaux, le plus souvent des relevés floristiques et des variables du milieu, doit être simultanée. Les tableaux peuvent être accolés mais souvent les variables sont de nature différente : les abondances - dominance des espèces sont discrètes mais les profondeurs d'horizons pédologiques sont continues. Les variables continues peuvent être mises en classes préalablement. Le tableau est ensuite rendu disjonctif complet, c'est-à-dire que chaque modalité est mise en colonne comme une variable. L'analyse factorielle des correspondances (AFC) du tableau résultant permet de réaliser une carte factorielle où les espèces, les classes des variables du milieu ainsi que les relevés peuvent être représentés (LACOSTE et ROUX 1972). ROMANE (1972) propose de réaliser un tableau croisé. La présence de l'espèce est cumulée par classe de variables. La carte factorielle obtenue permet de représenter les espèces et les variables mais plus les relevés, qui sont interprétés en fonction des espèces qu'ils contiennent. Dans ces deux cas, la typologie des relevés est réalisée en tenant compte des deux types de données. L'assemblage des données en une seule analyse suppose qu'*in fine*, on cherche à montrer qu'une relation entre les tableaux existe. Celle-ci est établie sans privilégier une source d'information. Notre objectif est de montrer que la croissance radiale est fonction du milieu mais pas nécessairement en relation avec la végétation. On suppose que si les typologies de relevés obtenues à partir des données floristiques ou mésologiques sont semblables à celle obtenue à partir de la croissance, alors elles ont la même origine, c'est-à-dire les facteurs écologiques dont les tableaux sont des images.

Dans un couplage d'analyses, les lignes des tableaux sont communes. Les deux tableaux sont analysés indépendamment mais en utilisant les mêmes pondérations des lignes. Des typologies des relevés peuvent donc être obtenues séparément, à partir de chaque analyse. Dans un second temps, la co-inertie des deux analyses est testée. Si cette co-inertie est significative alors les tableaux ont

une co-structure dont l'origine peut être commune. Dans les faits, l'analyse de cette co-structure revient à celle d'un tableau croisé. Donc, par exemple, l'analyse de la co-inertie d'une AFC d'un tableau floristique en présence - absence et d'une ACM de variables discrètes du milieu revient à une AFC de la table de contingence de ROMANE (1972) (CHOISSEL et MERCIER 1993). L'intérêt de la démarche vient du fait qu'elle peut être généralisée à tous les types d'analyses et à plus de deux tableaux (CHOISSEL et MERCIER 1993, 1996) et permet de s'affranchir de l'explication d'un tableau par un autre.

La programmathèque ADE du Laboratoire de biométrie - génétique et biologie des populations (UMR 5558 CNRS) de l'Université Claude Bernard Lyon-1 (disponible librement à l'adresse internet : <http://pbil.univ-lyon1.fr/ADE-4>), utilisé ici, permet de réaliser ces couplages. Les analyses indépendantes relèvent d'analyses multivariées, choisies en fonction de la nature des données traitées. Pour tester la co-structure observée des deux tableaux ayant leurs lignes en correspondance, elle est comparée à un grand nombre (100) de permutations aléatoires des lignes des tableaux. Si elle est significative, l'analyse de la co-inertie se fait sur un nouveau tableau dont les lignes sont les colonnes du premier tableau et les colonnes, les colonnes du second. Le premier tableau est celui qui a le moins de colonnes pour des raisons de calcul, mais le point de vue est symétrique. La matrice traitée est celle des covariances. La description complète des procédures est dans CHOISSEL et MERCIER (1993). Seuls les outils d'interprétation seront présentés dans le cadre des analyses menées.

L'analyse produit des valeurs propres qui permettent de sélectionner des axes principaux de co-inertie. Sur ces axes on peut projeter les points colonnes et lignes du tableau croisé donc les variables des tableaux initiaux. Ce point de vue permet de montrer les relations entre les tableaux. Mais nous privilégierons le fait que l'analyse permette de projeter les points lignes des tableaux initiaux, c'est-à-dire les relevés dans deux espaces définis par les deux tableaux. Ces points sont situés à la moyenne des colonnes des tableaux initiaux. Dans le cas d'une comparaison des typologies issues de la végétation et de la croissance, une carte factorielle des relevés est extraite du tableau floristique et l'autre de la croissance. Ces deux systèmes d'axes peuvent être unifiés, les deux représentations sont superposables et indiquent la similitude des typologies.

Les axes d'inertie sont définis par les analyses séparées des tableaux initiaux. Ils peuvent être projetés dans les systèmes d'axes de co-inertie. Ce qui superpose structure du tableau et co-structure. Ceci permet de déterminer les axes des structures qui participent à la co-structure, à un facteur de rotation près. L'inertie portée par un axe dans l'analyse indépendante est la valeur maximale qui pourrait être projetée sur l'axe de co-inertie. La "perte" d'inertie lors de cette projection permet de juger de la validité de la co-structure. La corrélation entre les axes d'inertie et les axes de co-inertie permettra de juger si structure et co-structure sont reliées.

## ANNEXE 2

### Régression orthogonalisée

La régression multiple permet de déterminer les coefficients de corrélation et de régression partiels que présentent des variables explicatives (ou régresseurs) avec une variable dépendante (ou plusieurs dans un cas général). Le coefficient de corrélation partiel représente la force de la relation linéaire entre une des variables explicatives et la variable expliquée dégagée de l'influence des autres régresseurs (ZAR 1996). En dendrochronologie, la largeur de cernes ou les indices de croissance constituent des variables dépendantes et les variables climatiques mensuelles les régresseurs. La régression aboutit à la constitution d'un modèle, appelé fonction de réponse (FRITTS 1976, HUGHES *et al.* 1978) qui fournit une estimation de la largeur de cernes (ou des indices) par une somme des influences relatives de chaque variable climatique.

L'emploi de la régression multiple se fait avec trois restrictions importantes. La nature de la relation entre les régresseurs et la variable dépendante est considérée linéaire et l'effet des variables explicatives est uniquement additif. D'éventuelles interactions, effets de synergie ou d'antagonisme entre les variables explicatives ne peuvent être pris en compte. De même, une variable dont l'action sur la croissance serait, selon son niveau, positive ou négative ne pourra être détectée. Enfin, les variables explicatives doivent être indépendantes les unes des autres. Or, certains des régresseurs climatiques utilisés présentent une dépendance. Par exemple, les températures et précipitations sont corrélées inversement pour le mois d'août et directement en janvier (cf. chap. 2). La régression orthogonalisée, permet de substituer à la matrice de régresseurs qui présentent une dépendance une matrice de composantes principales indépendantes. Une part des composantes, qui représente toutefois la quasi totalité de l'information de départ, est introduite dans la régression. Le produit des valeurs propres cumulé permet de déterminer les composantes retenues (GUIOT 1981). Il permet de ne conserver que les composantes qui apportent plus d'information qu'un régresseur initial et ainsi de diminuer le nombre de variables dans le modèle ce qui le rend plus robuste (BRIFFA *et al.* 1983).

Cette méthode a été mise au point en dendroclimatologie par FRITTS (1976). Elle est employée dans les analyses de la réponse climatique des chênes dans le domaine atlantique, dans les îles britanniques (BRIFFA *et al.* 1983, BRIFFA 1987). La programathèque PPHALOS développée par GUIOT et GOEURY (1996), librement accessible à l'adresse internet ftp : [banqpal.cerege.fr/PUB/3Pbase](ftp://banqpal.cerege.fr/PUB/3Pbase), permet de réaliser la procédure.

### Calibration et vérification

Le modèle est ajusté aux observations de la variable dépendante de façon à les représenter au mieux. Celui-ci produit une estimation de ces observations à partir des variables climatiques. De façon à quantifier la qualité de l'ajustement du modèle, les estimations sont comparées aux observations qui ont servi à le construire. Cette comparaison est appelée calibration. Cependant, la qualité de représentation du phénomène par le modèle, ou robustesse, est fournie par une comparaison entre les estimations et des observations indépendantes, qui n'ont pas servi à l'élaboration de l'équation. Cette comparaison constitue la vérification.

Le coefficient de corrélation entre les estimations et les observations peut servir pour les comparer. Dans l'exemple proposé (figure), l'indice de croissance est

modélisé par deux variables climatiques, le bilan hydrique cumulé d'octobre à mars, et le bilan hydrique cumulé de juin et juillet. Les deux coefficients partiels avec la série d'indices s'élèvent à 0,38 et 0,43. Les années entre 1974 et 1995 sont utilisées pour déterminer le modèle. La corrélation entre les estimations et les observations s'élève à 0,66 sur cette période. Lorsque le modèle est utilisé pour reconstruire l'indice sur la période indépendante de 1955 à 1973, l'écart est nettement plus élevé. Le coefficient de corrélation n'est plus que de 0,47. Le modèle est moyennement ajusté et peu robuste : il ne permet pas de bien représenter la croissance.

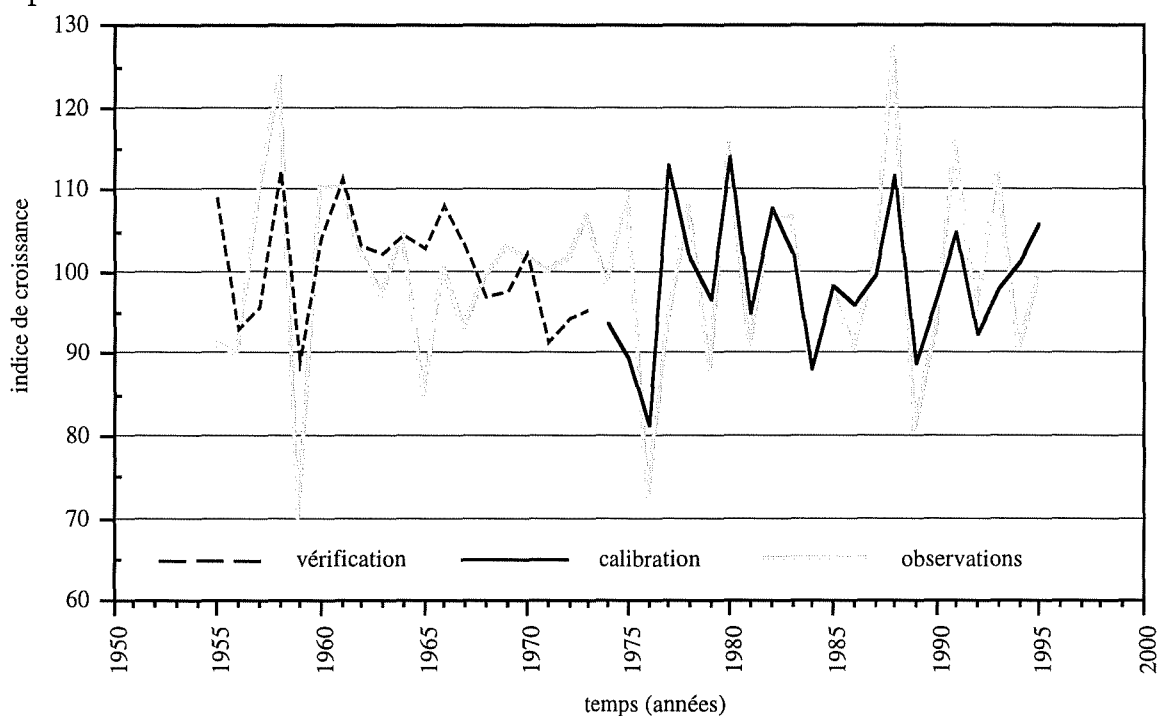


Figure : exemple de périodes de calibration et de vérification d'un modèle

### Procédure Bootstrap

L'opération qui consiste à déterminer une période de calibration et de vérification peut être renouvelée plusieurs fois. Il s'en suivra plusieurs coefficients de corrélation entre les observations et les estimations dont la moyenne et l'écart-type pourront servir à déterminer la fiabilité de la relation. Dans la méthode Bootstrap, introduite en dendroclimatologie par GUIOT (1989), les années de calibration sont tirées au sort un grand nombre de fois avec remise, si bien qu'une année peut être tirée deux fois. Les années non sélectionnées servent à la vérification.

La méthode avec remise présente deux intérêts : les hypothèses de normalité des données ne sont pas nécessaires et elle n'induit pas de perte d'observations ce qui est très utile quand le nombre d'années disponibles est faible. De façon pratique, le tirage est réalisé au moins 50 fois. On dispose donc de 50 pseudo-échantillons composés, de façon aléatoire parmi la période d'étude, d'années de calibration et de vérification. A chaque tirage, un modèle est construit. Après les 50 opérations on dispose donc de 50 coefficients de régression partiels, 50 coefficients de calibration et autant de coefficients de vérification. La moyenne et l'écart-type sont calculés pour chaque coefficient. Après 50 tirages, cette moyenne est en général stable (GUIOT 1989) et représente la fonction de réponse - type.

### Signification des coefficients

La méthode Bootstrap produit des coefficients moyens et leur écart-type associé. La signification de ces coefficients est fournie par le rapport moyenne sur écart-type. Ce quotient approche une valeur t de Student (GADBIN-HENRY 1994). Un niveau de confiance peut donc être déterminé pour chacun d'eux. La qualité globale de la fonction de réponse est donnée par la signification des coefficients de calibration et surtout de vérification. Pour chaque régresseur, le rapport est également calculé. La signification des coefficients partiels permet ainsi de déterminer les mois qui présentent la relation la plus fiable avec la variable dépendante. La signification des coefficients est codée pour les comparer entre fonctions de réponses de façon plus aisée ou en utilisant des méthodes de classification (tab.) (TESSIER 1984).

quotient (moy/s)	code	niveau de confiance
inférieur à 1,5	0	NS
1,6 à 1,9	1	90 à 95 %
2,0 à 2,9	2	95 à 99 %
supérieur à 3	3	>99 %

Tableau : signification des coefficients Bootstrap





## Résumé

Les études dendrochronologiques ont abouti, dans la moitié nord de la France, à la constitution de nombreuses références du Chêne (*Q. robur*, *petraea*) pour les périodes historiques mais l'étalonnage reste peu développé pour la pré- et protohistoire, particulièrement dans l'ouest de la France. La découverte en Brière (44) de 130 troncs de Chêne a permis la constitution d'une référence datée de 1358 à 978 av. J.-C. L'analyse réalisée dans une zone climatique (atlantique) éloignée de toute construction de référence nous a incité à développer les aspects méthodologiques de datation dendrochronologique.

Nous avons pu vérifier que le lien entre les facteurs régionaux et la croissance radiale permet de synchroniser des séries de largeurs de cerne provenant de climats atlantiques sur celles issues de climats plus continentaux.

Les restes de bois découverts dans des sites archéologiques en Lorraine permettent de construire une référence qui s'étend de 1519 à 885 av. J.-C. encore imparfaitement représentative des influences semi-continentales.

Des outils basés sur la sélection des séries constituant les chronologies moyennes ont été testés pour construire des références plus homogènes. La méthode de standardisation des largeurs brutes a été rendue évolutive. L'utilisation de ces outils permet d'obtenir des résultats de datation améliorés entre les références de Brière et de Lorraine ainsi que de ces références sur les étalons des laboratoires de Neuchâtel et Stuttgart.

Les chênes découverts en Brière se sont développés sur un sol tourbeux profond. Leur croissance radiale présente des séquences de cernes étroits qui ont été attribuées, dans des conditions analogues, à des remontées de la nappe dans le sol provoquant une asphyxie racinaire. Les observations sédimentaires et les analyses palynologiques concomitantes des troncs étayent cette hypothèse.

Nous pouvons compléter cette argumentation par une analyse dendroécologique de jeunes chênes colonisant actuellement des sols plus ou moins tourbeux.

Le développement d'une chênaie sur la tourbière de Brière implique un abaissement du niveau moyen de la nappe qui définit un événement régressif qui débute avant 1275 av. J.-C. et se termine par la disparition progressive de la chênaie vers 1000 av. J.-C.

**Mots clés :** Chêne, dendrochronologie, dendroécologie, Brière, subfossile, Age du Bronze, climat atlantique, sol hydromorphe.