

PRINCIPES ET MÉTHODES
DE LA DENDROCHRONOLOGIE

LEBOURGEOIS François

Enseignant-Chercheur

*Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois (LERFOB)
Unité Mixte de Recherches INRA-ENGREF 1092*

*Equipe Ecologie Forestière
ENGREF – 14 rue Girardet – 54042 Nancy Cedex*

[*francois.lebourgeois@engref.agroparistech.fr*](mailto:francois.lebourgeois@engref.agroparistech.fr)

Version 3. Mars 2010

PRÉAMBULE

Ce manuel est destiné avant tout aux étudiants et aux jeunes chercheurs qui débutent en dendrochronologie. Ce manuel **ne remplace pas** toute la littérature déjà publiée mais donne rapidement les bases de cette discipline. Vous trouverez dans ce manuel deux grandes parties. La première partie présente les grands principes de la dendrochronologie ainsi que les très nombreux domaines d'application. La seconde partie présente une analyse détaillée de l'utilisation de certains logiciels spécifiques (mais de référence) en dendrochronologie. Les logiciels utilisés sont gratuits et disponibles via internet sur les serveurs appropriés. Ils ont été très souvent développés par la communauté des dendrochronologues américains et sont mis à jour régulièrement (pour la plupart d'entre eux).

Bien souvent, les notices d'utilisation de ces logiciels, qui sont rédigées en anglais, ne présentent pas clairement les étapes à suivre pour traiter un dossier de A à Z. Ayant été moi-même confronté à ce problème, j'ai fait cette démarche d'explication de ces logiciels pour les rendre plus facilement accessibles aux étudiants. L'objectif principal étant que les utilisateurs potentiels acquièrent rapidement leur autonomie.

Bonne lecture

Dendrochronologiquement vôtre !

PARTIE I
PRINCIPES ET MÉTHODES

1. DOMAINES D'ETUDE DE LA DENDROCHRONOLOGIE

Bien qu'au XV^{ième} siècle, Léonard de Vinci s'intéressât déjà aux cernes, c'est le physicien et astronome américain A.E. Douglass qui, au début du siècle, posa les bases de la **dendrochronologie** moderne (du grec: *dendron* = arbre ; *kronos* = le temps ; *logos* = l'étude). La dendrochronologie est une science qui **repose sur la mesure des largeurs des cernes annuels de croissance et sur leur datation précise**. D'abord principalement utilisé dans des disciplines telles que l'archéologie ou la climatologie pour la datation précise d'arbres « fossiles » ou la reconstruction du climat passé, cet outil est de plus en plus utilisé pour étudier l'environnement et détecter ses changements. Cette approche a d'ailleurs été essentielle dans la compréhension des dépérissements forestiers observés dans les années 1990 aussi bien en Europe qu'en Amérique du Nord. A l'heure actuelle, sous le terme dendrochronologie sont regroupées toutes les disciplines qui utilisent directement ou indirectement l'information « date » contenue dans une série chronologique de cernes. Ces disciplines concernent aussi bien la climatologie (on parle alors de dendroclimatologie) que l'écologie (dendroécologie) ou encore la chimie (dendrochimie), et sont étroitement liées les unes aux autres...

Domaine	Discipline	Applications
Ecologie	Dendroécologie	Historique des feux, dépérissement des forêts, dynamique et croissance...
Climatologie	Dendroclimatologie	Périodes de froid et de sécheresse, reconstruction du climat passé, analyse du climat présent...
Géologie	Dendrogéomorphologie	Eruptions volcaniques...
Anthropologie	Dendroarchéologie, Dendroglaciologie	Datation des constructions anciennes, arbres fossiles, monuments historiques...

Toutes ces disciplines ont en commun d'utiliser le passé pour mieux comprendre le présent afin de mieux comprendre les processus environnementaux influençant le comportement des arbres et des peuplements et de mieux appréhender les évolutions futures.

2. TECHNIQUES DE PRÉLÈVEMENT DES CAROTTES

L'analyse de la croissance radiale repose sur le prélèvement dans chaque arbre d'un (ou plusieurs) bâtonnet de bois ou « carotte » sur lequel les cernes annuels de croissance peuvent être identifiés. La représentativité de la chronologie moyenne repose sur le nombre de séries individuelles ayant servi à sa construction. Plus ce nombre est grand et plus les risques de biais relatifs aux variations individuelles et stationnelles sont réduits. Ainsi, le nombre d'arbres étudiés varie selon les études et les objectifs recherchés dans une gamme de 50-100 à plus de 2000. D'une façon générale, plus le nombre d'arbres échantillonnés sera faible et plus le nombre de carottes prélevées par arbre sera élevé (de 2 à 4 selon les études). Il est évident que l'analyse de la croissance peut également se faire à partir de rondelles. C'est une méthode destructive qui ne prend en compte généralement que peu d'arbres. En revanche, cette technique permet d'avoir une très bonne idée de la variabilité intra-arbre.

Les arbres échantillonnés sont carottés à cœur généralement à une hauteur de 1,30 m (c'est-à-dire à hauteur d'homme). Trois raisons essentielles pour le choix de cette hauteur : facilité de prélèvement (par rapport à la base de l'arbre) ; diminution des biais relatifs à l'effet de l'empatement et aux effets de la concurrence initiale subit par les arbres. Les carottes sont prélevées à l'aide d'une tarière de Pressler (manuelle ou motorisée). Les plus courantes mesurent 40 cm pour un diamètre intérieur de 5 mm (**figures ci-dessous**). Avec ces dernières, on peut donc carotter des arbres de 80 cm de diamètre maximum. Il existe des tarières de 50 et 60 cm moins maniables mais permettant d'échantillonner des arbres plus gros. Le carottage est effectué le plus souvent dans une direction

quelconque en évitant toutefois les défauts visibles sur le tronc (gélivures, blessures...) et le bois de réaction (compression - tension) dans le cas de forte pente. Dans ce dernier cas, le carottage se fait généralement parallèlement aux courbes de niveau.

Après extraction, les trous de sondage peuvent être rebouchés par une baguette de hêtre préalablement désinfectée au mercurothiolate de sodium (fongicide) et la plaie de l'écorce étanchéifiée par un cicatrisant. Ceci évite l'attaque de parasites ou de champignons. Il est à noter que l'utilité d'un rebouchage est encore à l'heure actuelle discutée.



La limite de l'aubier peut-être notée en observant par transparence la carotte juste après extraction du tronc. La lumière traverse la partie humide de l'aubier (partie du bois dans laquelle circule la sève brute), lui donnant un aspect translucide, et ne traverse pas le bois de cœur (biologiquement inactif). La distance entre l'écorce et la marque indiquant la limite bois de coeur/bois d'aubier peut être mesurée en mm. Dans des nombreuses études, ce critère simple s'est révélé être un bon indicateur de la vitalité des peuplements. L'aubier peut être noté pour la majorité des espèces (chênes, sapin, pins, épicéa...) excepté pour le hêtre qui ne présente pas de différence nette et systématique de coloration du bois au moment de l'extraction.



Photos : F. Lebourgeois, 2010 – Carottage effectuée sur le placette CHS51 du réseau RENECOFOR par Sébastien Davilier.

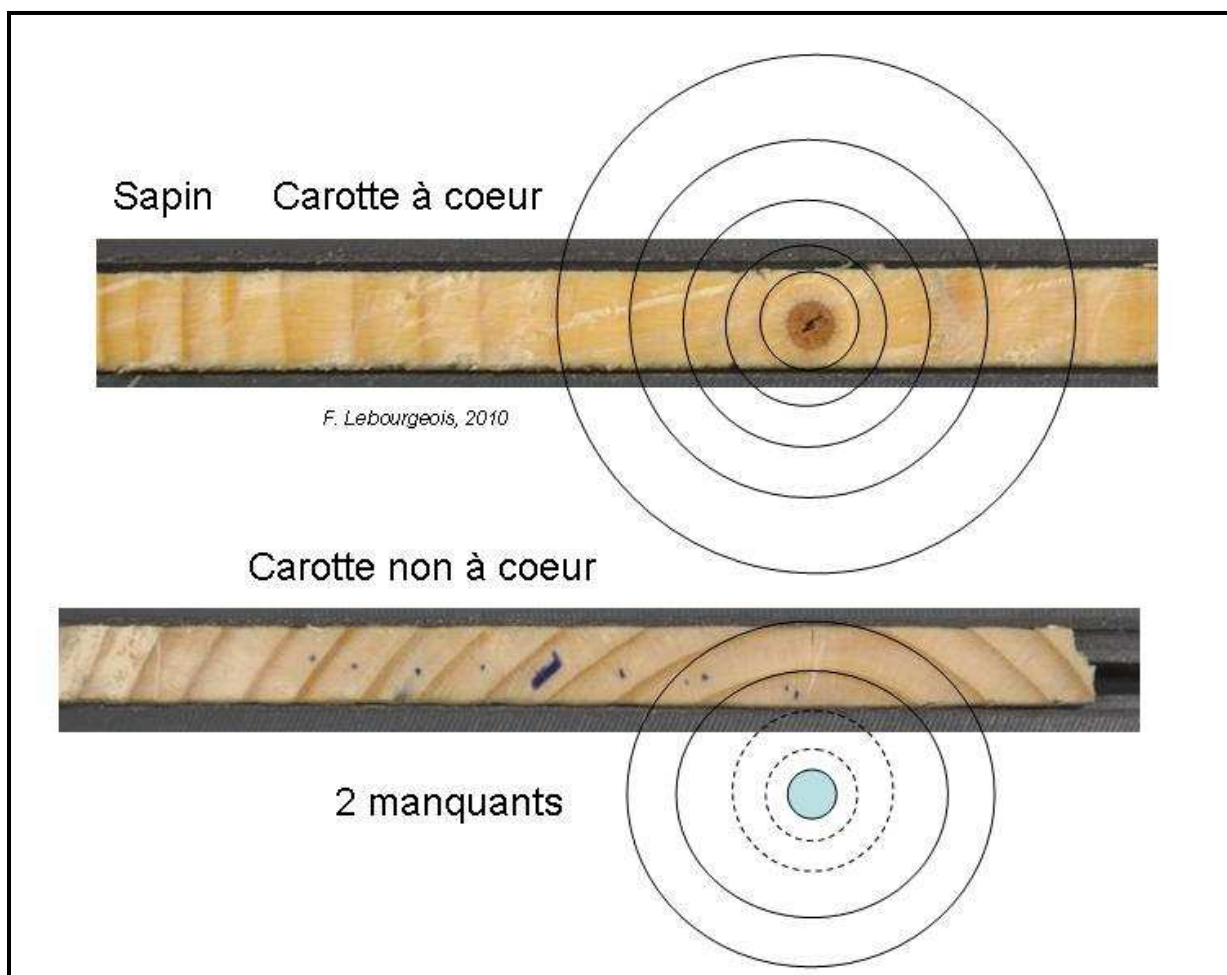


Boitiers en polycarbonate et boitiers en carton pour stockage des carottes après planage et mesure.

3. PRÉPARATION DES CAROTTES ET MESURES DES ACCROISSEMENTS ANNUELS

Avant la mesure des cernes proprement dite, les échantillons doivent être préparés de façon à améliorer la lisibilité des cernes. Il existe plusieurs techniques allant du ponçage avec un papier de verre à grain très fin au planage avec un cutter (photos précédentes). Une préparation soignée assure une parfaite observation des moindres détails de la structure du bois, et permet de mettre en évidence d'éventuels cernes très fins.

Pour les carottes ne passant pas exactement à la moelle, l'estimation de l'âge de l'arbre est améliorée par une technique facile à mettre en œuvre. La distance séparant le cœur de l'arbre et le bord interne du dernier cerne mesuré est estimée en superposant à la carotte une mire transparente sur laquelle des cernes concentriques ont été tracés. On recherche alors la position idéale de la carotte sous cette mire en faisant coïncider les rayons de courbure des cernes avec ceux des cercles de la mire. La distance séparant le bord du dernier cerne mesuré et le cœur présumé est mesurée. Cette distance est alors convertie en nombre de cernes en divisant cette longueur par la largeur moyenne des derniers cernes mesurés (généralement 5) (technique utilisée par l'équipe Ecologie et Ecophysiologie Forestière, INRA-Nancy).



Les systèmes de mesures des largeurs des cernes sont multiples : analyse d'images et scanner, machine Eklund, banc manuel **LINTAB** associé à un enregistreur automatique type **TSAPWin**, système **vidéo-informatisé** « **Becker** » (INRA, Nancy). La précision des mesures est de l'ordre du 1/100 ième de mm. Pour les mesures faites à partir d'images scannées, le système **WinDendro** est l'un des systèmes les plus utilisés (voir le site internet de *Regent Instruments INC*). Il existe un autre logiciel nommé **CooRecorder** également très utilisé. Quelque soit le type de système utilisé, la mesure des largeurs est une étape essentielle qui nécessite **rigueur et précision**.

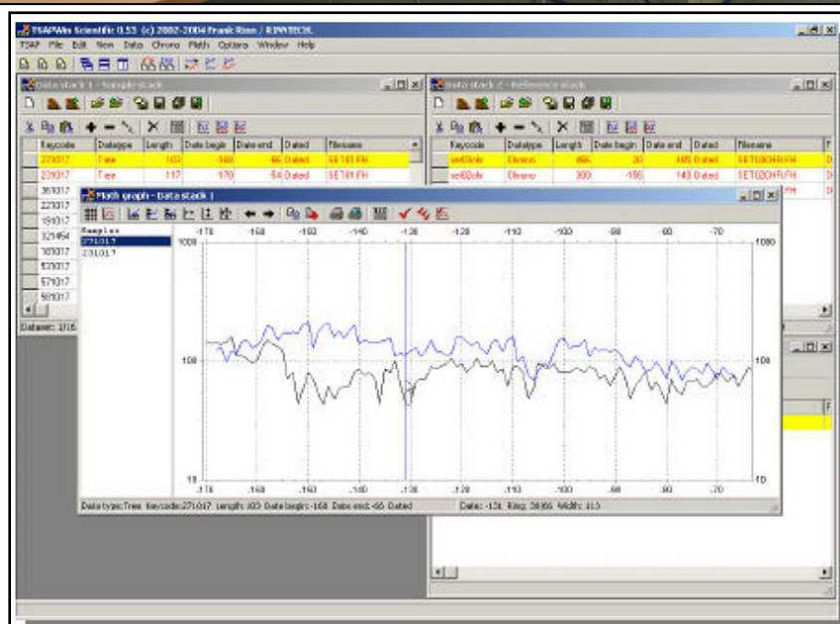
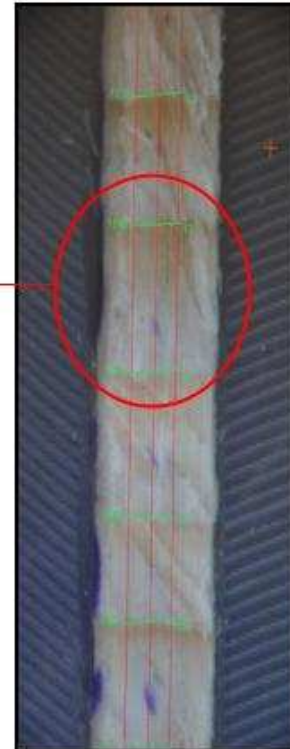
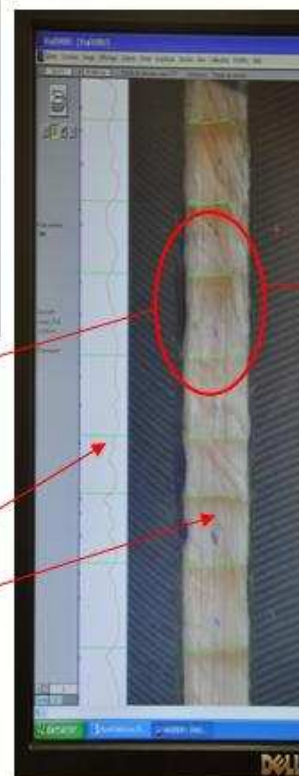


Table de mesure Lintab5 et logiciel associé TSAPWin

Scanner et logiciel Windendro

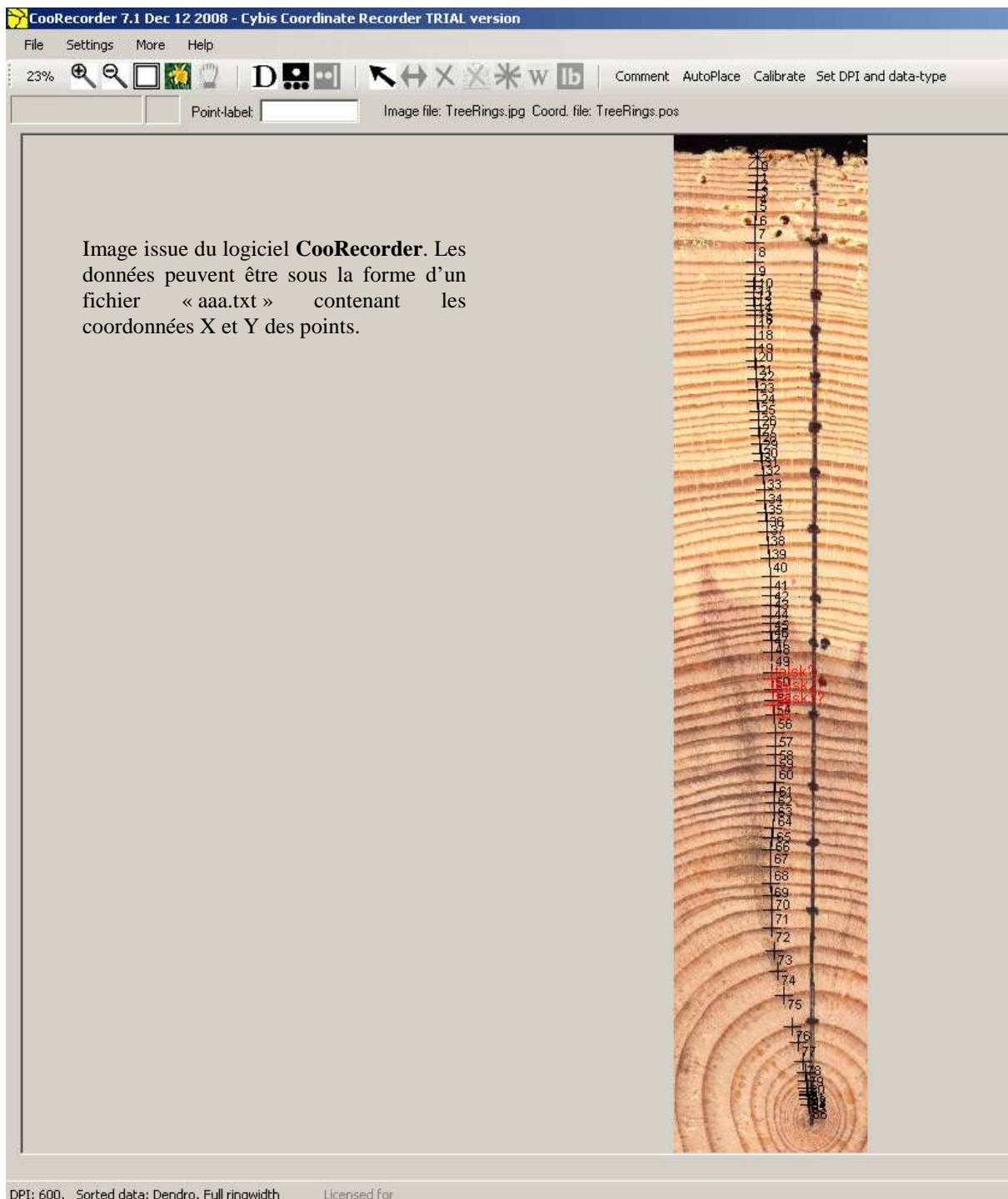


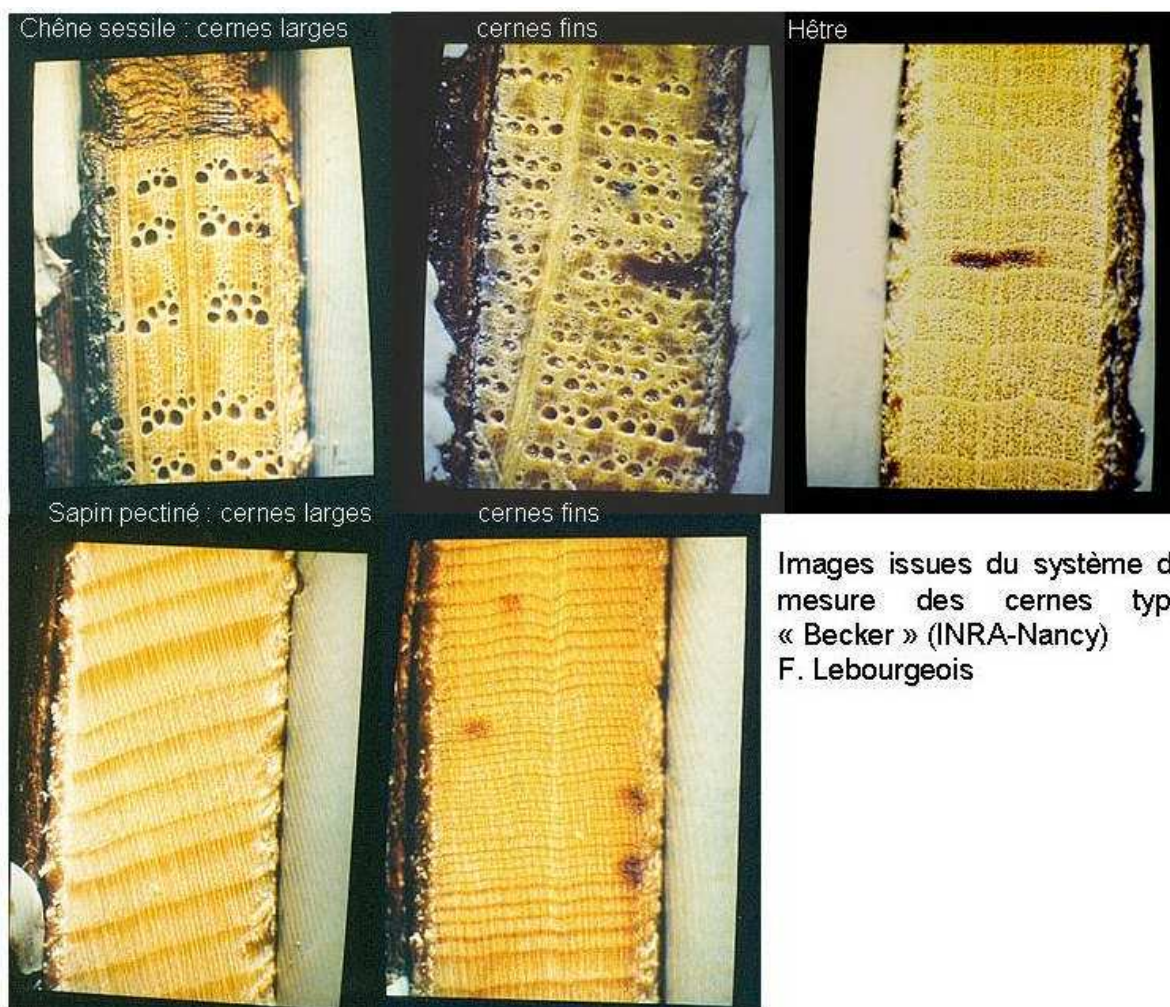
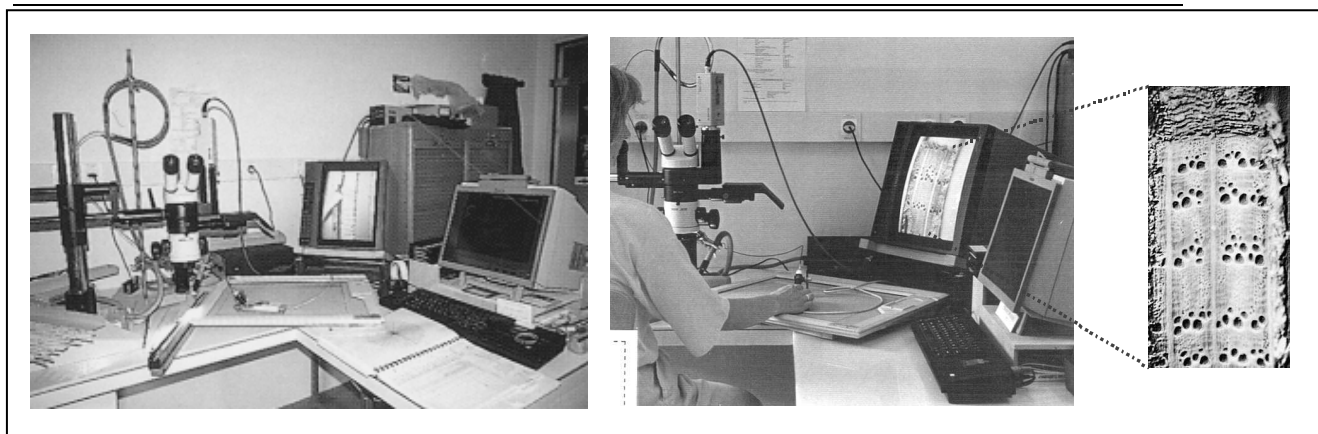
Limites des largeurs de cernes (automatiques ou manuelles)

Profil correspondant

Chemin de mesures (défini par l'opérateur)

F. Lebourgeois, Mars 2010





Les images ci-dessus présentent le système de mesure des largeurs des cernes mis au point par Becker dans les années 1990 (INRA-Nancy) (Photos F. Lebourgeois). Les cernes sont mesurés au centième de millimètre à l'aide d'un système vidéo-informatisé spécifique. L'image grossie de la carotte est transmise à un écran de type "télévision". Un viseur lumineux relié à une table à digitaliser se superpose à celle-ci grâce à un système de chambre claire. L'opérateur déplace ce viseur le long de l'image de la carotte en appuyant sur une touche à chaque limite de cerne. L'impulsion ainsi produite permet au micro-ordinateur gérant la table à digitaliser de calculer le déplacement effectué par le viseur. Cette distance, dépendante de l'échelle de grossissement, est directement convertie en largeur de cerne réelle et encodée sur support informatique. Elle est visualisée sur l'écran du micro-ordinateur sous forme d'un bâtonnet lumineux de hauteur proportionnelle à la largeur du cerne

mesuré. Divers contrôles et corrections sont possibles en cours de saisie afin de conserver un haut degré de précision. Outre la largeur du cerne complet, les largeurs de bois initial et de bois final peuvent être mesurées séparément dans chaque cerne ; la largeur totale étant la somme des deux largeurs. Ceci a permis, lors de différentes études, de mettre en évidence des différences de comportement des deux composantes du cerne vis-à-vis des aléas climatiques, et donc analyser plus finement les relations cerne – climat.

4. LES PRINCIPES DE LA DENDROCHRONOLOGIE (Cook et Kairiukstis, 1990 ; Fritts, 1976)

4.1. LE PRINCIPE D'UNIFORMITÉ

Les processus physiques et biologiques qui gouvernent la croissance des arbres poussant actuellement sont les mêmes que ceux du passé et ont le même type d'action. Le présent est la clé du passé. Dans le cadre des changements actuels de l'environnement, certains chercheurs ont modifié cette phrase en disant « le passé est la clé du futur », c'est-à-dire que la connaissance des conditions environnementales qui ont opéré dans le passé peut permettre de prédire ces conditions dans le futur. Cependant, depuis le début des années 2000, certaines études montrent que la sensibilité et la réactivité des arbres aux facteurs environnementaux évoluent. Ainsi, les facteurs qui ont gouverné la croissance dans le passé ne seront peut-être pas les mêmes que ceux qui vont contrôler la croissance dans le futur. Ce problème est connu sous le nom de « Divergence » (Büntgen *et al.*, 2008 ; D'Arrigo *et al.*, 2008).

4.2. LE PRINCIPE DU FACTEUR LIMITANT

Ce principe énonce que la croissance des arbres et des peuplements ne peut dépasser le niveau permis par le facteur le plus limitant. Ainsi, dans un contexte montagnard de haute altitude, la croissance sera essentiellement limitée par les températures et la longueur de la saison de végétation. Dans les régions arides, ce sont les précipitations qui gouverneront la croissance des peuplements.

4.3. LE PRINCIPE DE L'AMPLITUDE ÉCOLOGIQUE

Une espèce peut pousser, se reproduire et se propager à travers une gamme d'habitats importante ou restreinte. Elle sera plus sensible aux facteurs du milieu en limite de son aire.

4.4. LE MODÈLE LINÉAIRE DE CROISSANCE (COOK, 1987, 1990)

Dans les régions où le climat impose à la végétation des saisons de croissance et des périodes de repos bien marquées, les arbres élaborent chaque année, dans leurs différents compartiments ligneux, un anneau de croissance ou cerne annuel, qui résulte de l'activité d'une assise génératrice de cellules, le cambium. La largeur est un des principaux paramètres utilisés pour décrire un cerne. Celle-ci va dépendre d'un très grand nombre de facteurs liés à l'arbre lui-même (espèce, âge, concurrence intra- ou interspécifique...) ou à son environnement (type de station, climat, attaque parasitaire, interventions humaines...). **Les largeurs de cernes sont donc des intégrateurs complexes des caractéristiques intrinsèques de l'arbre et de ses conditions environnementales de croissance.**

Classiquement, le cerne élaboré au temps t est considéré comme la résultante d'une combinaison linéaire de plusieurs **signaux** :

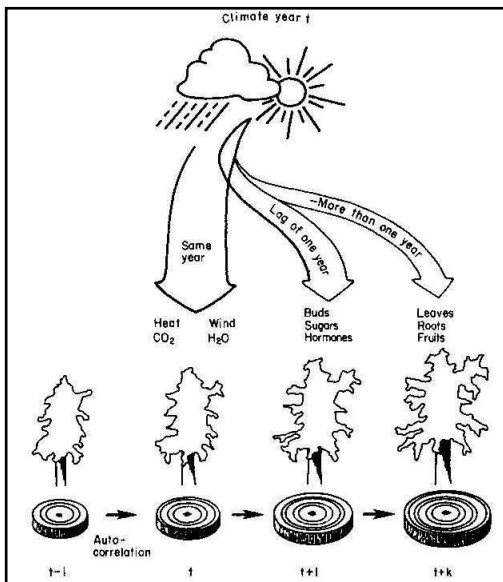
$$R_t = A_t + C_t + D1t + D2t + E_t$$

où,

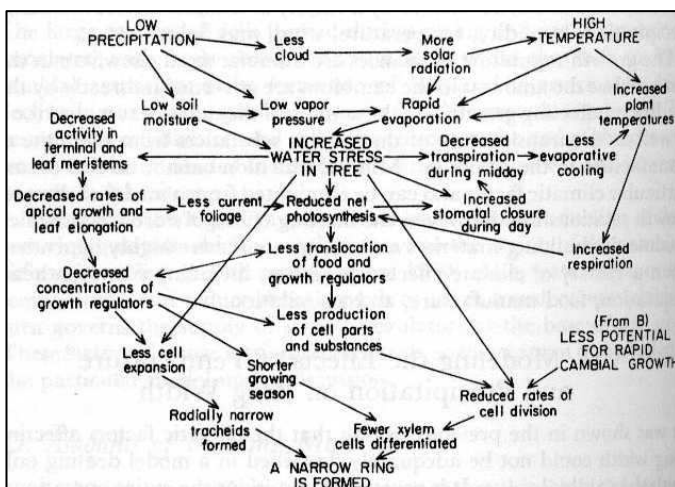
- **R_t** représente la largeur mesurée du cerne ;
- **A_t** correspond à l'effet de l'âge d'élaboration du cerne (=âge cambial) sur son accroissement. D'une manière générale, l'arbre élabore des cernes larges dans son jeune âge. Par la suite, ses accroissements sont plus fins puis se stabilisent jusqu'à sa mort ;
- **C_t** exprime les effets du climat régional ou local ;
- **D1t** correspond aux conditions stationnelles locales telles que la fertilité du milieu, la sylviculture, les attaques parasitaires, l'alimentation en eau... dont les effets ne sont pas obligatoirement identiques pour tous les arbres du même site (variations microstationnelles) ;
- **D2t** intègre les perturbations régionales qui affectent l'ensemble des arbres du peuplement. Ce signal reflète les effets à plus long terme des changements (relativement lents) des conditions

environnementales de croissance des arbres. Il prend en compte des modifications du type pollutions atmosphériques (dépôts azotés, pluies acidifiantes, concentrations en ozone...), augmentation de la teneur en CO₂, évolution des pratiques sylvicoles... ;

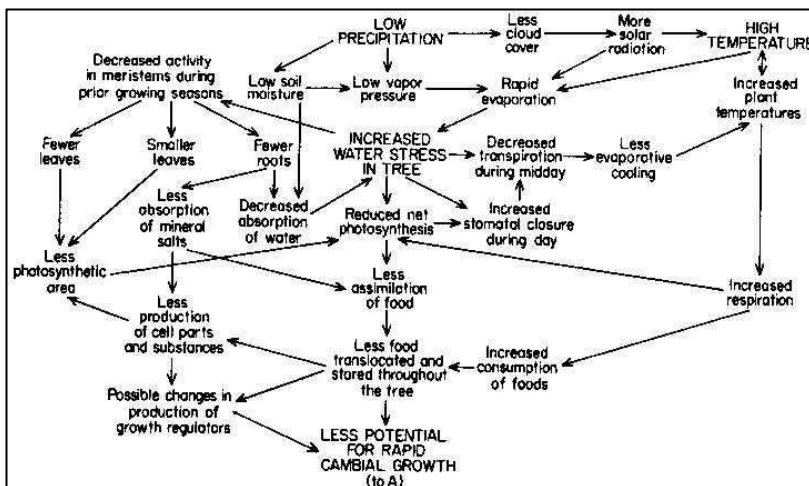
- Et est le signal aléatoire caractérisant la variabilité propre à chaque arbre, ou celle non prise en compte par les autres signaux (potentiel génétique de l'arbre, erreurs de mesure...).



Principe général de l'effet du climat sur la mise en place du cerne (d'après Fritts, 1976, page 26, Fig. 1.10)

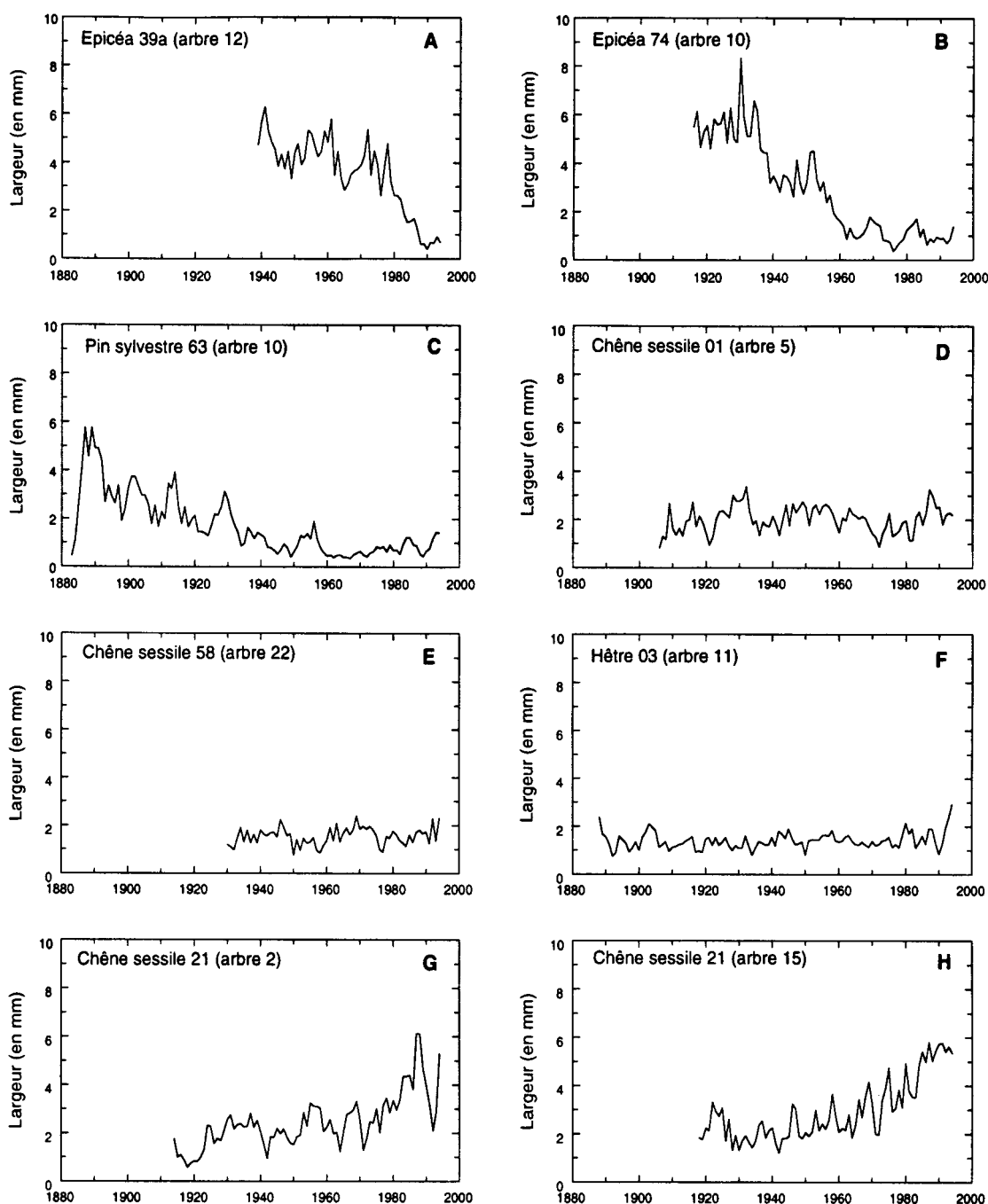


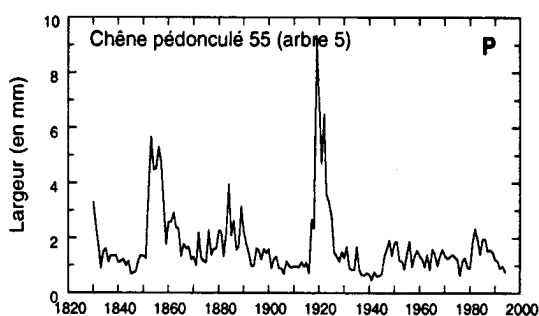
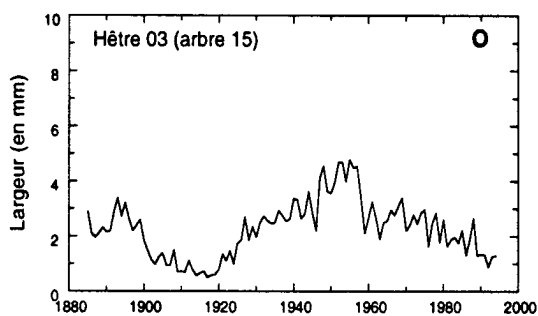
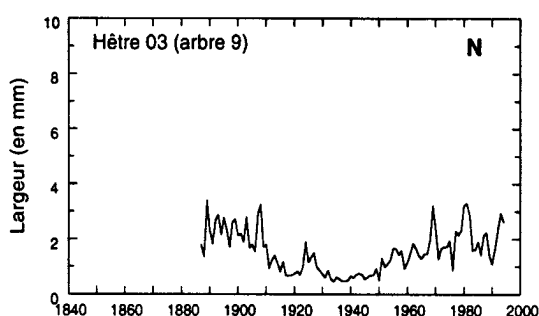
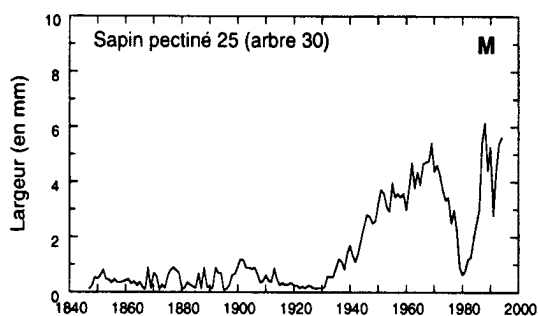
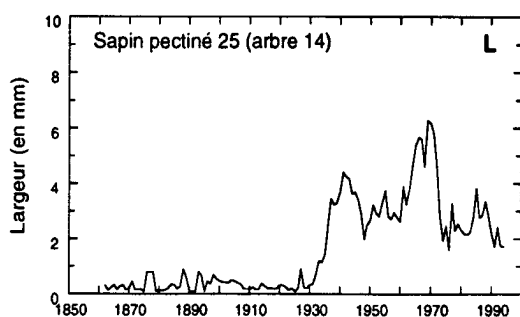
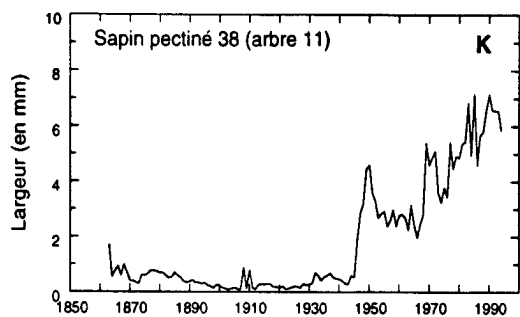
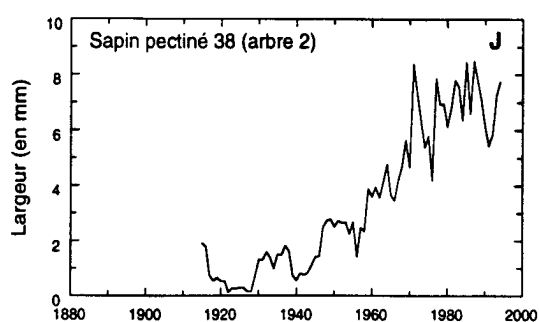
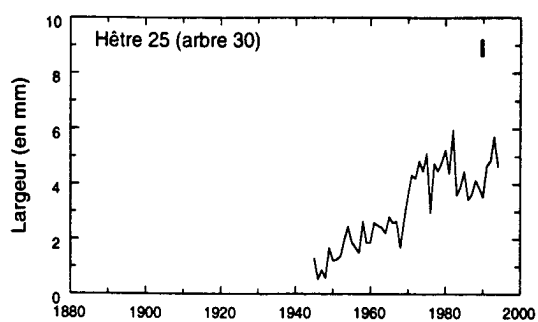
Principe général de l'effet du climat au cours de la saison de végétation sur la mise en place du cerne dans le cas d'un site sec (d'après Fritts, 1976).



Aperçu des mécanismes mis en œuvre au cours de la saison précédente (notion d'arrière-effet) (d'après Fritts, 1976).

Les Figures a à p présentent des profils de croissance qui illustrent les effets de ces différents signaux endogènes et exogènes. Comme le montrent les différents graphes, le comportement individuel des arbres est très variable au cours du temps. La croissance peut diminuer (effet de l'âge ; **figures a à c**), être stable (**figures d à f**) ou augmenter (**figures g à j**). Les effets de la concurrence interspécifique et de la sylviculture apparaissent nettement dans les dendrogrammes suivants. En ce qui concerne les sapins (**figures k à m**), les augmentations brutales de croissance observées sont la résultante de la mise en lumière de ces arbres préexistants suite à la coupe des arbres dominants de la placette (hêtre et épicéa notamment). Ces exemples illustrent parfaitement la capacité du sapin à pousser sous couvert pendant plusieurs dizaines d'années (espèce dryade), mais également sa forte capacité de réaction même à un âge avancé. (D'après Lebourgeois F., 1997. *RENECOFOR - Etude dendrochronologique des 102 peuplements du réseau*. Editeur : Office National de Forêts, Département des Recherches Techniques, ISBN 2 - 84207 - 075 - 5, 307 pages)





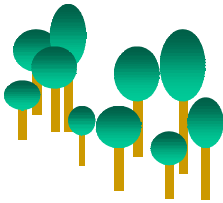


4.5. LA SÉLECTION DES SITES

La sélection des sites a pour objectif de maximiser le signal environnemental à étudier. Ainsi, si on s'intéresse au seul climat, on pourra échantillonner en limite altitudinale de la forêt afin d'amplifier le signal climatique des séries de cerne. Si on veut analyser les effets des paramètres écologiques (disponibilité en eau des sols, fertilité minérale...), on échantillonnera de préférence une gamme variée de milieux.

4.6. LE FACTEUR DE RÉPLICATION

Le signal étudié peut être amplifié et la somme des « bruits » minimisée en échantillonnant plus d'une carotte par arbre et plus d'un arbre par site.

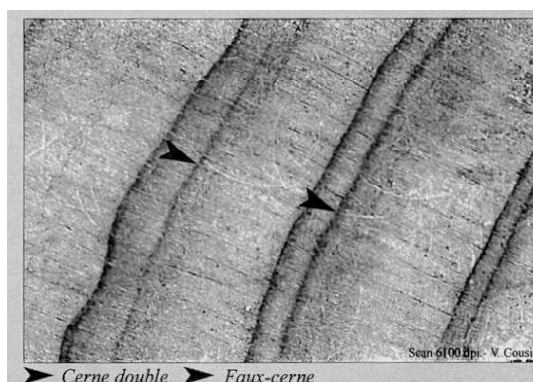
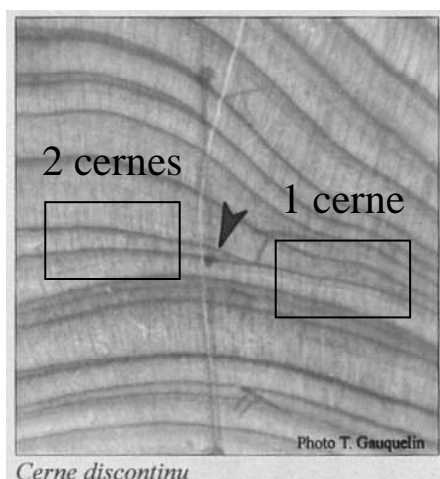
	arbre	peuplement	écosystèmes
échelle	Parcelle	Forêt	Massif-Région
Nb total d'arbres	+	++	+++
Nb carottes/arbre	+++	++	+
			
	Hêtre - Parcelle 50 Forêt de Haye	Hêtraie Forêt de Haye	Les hêtraies Plateau calcaire de Lorraine

4.7. INTERDATATION DES PROFILS DE CROISSANCE

Connaissant la date de formation du dernier cerne sous l'écorce, attribuer une date à chaque cerne compté en direction de la moelle semble évident. Cependant, les choses ne sont pas aussi simples ! Il faut tenir compte des erreurs éventuelles lors de la saisie mais également d'anomalies de croissance ou anatomiques du type « faux cerne » ou « double cerne » (deux « bandes » de bois final formées la même année), « cerne manquant » (absence du cerne sur le secteur du tronc traversé par la carotte) ou plus simplement d'erreur lors de la mesure des cernes (oubli d'un cerne ou cerne compté deux fois). **L'interdatation est une étape essentielle qui permet de vérifier l'agencement synchrone des séries individuelles de croissance et ainsi d'attribuer à chaque cerne son année exacte d'élaboration.**

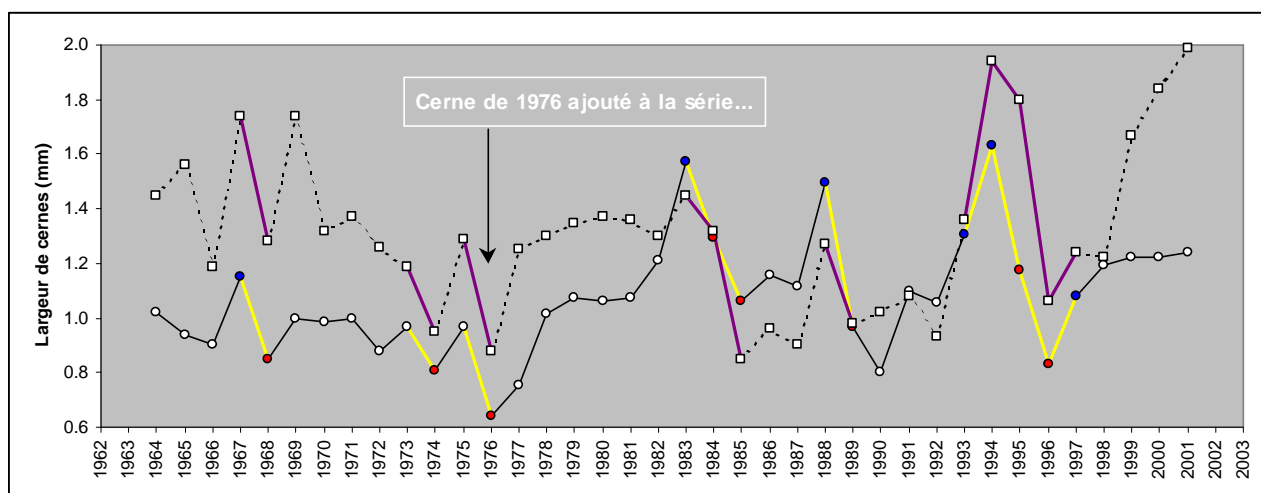
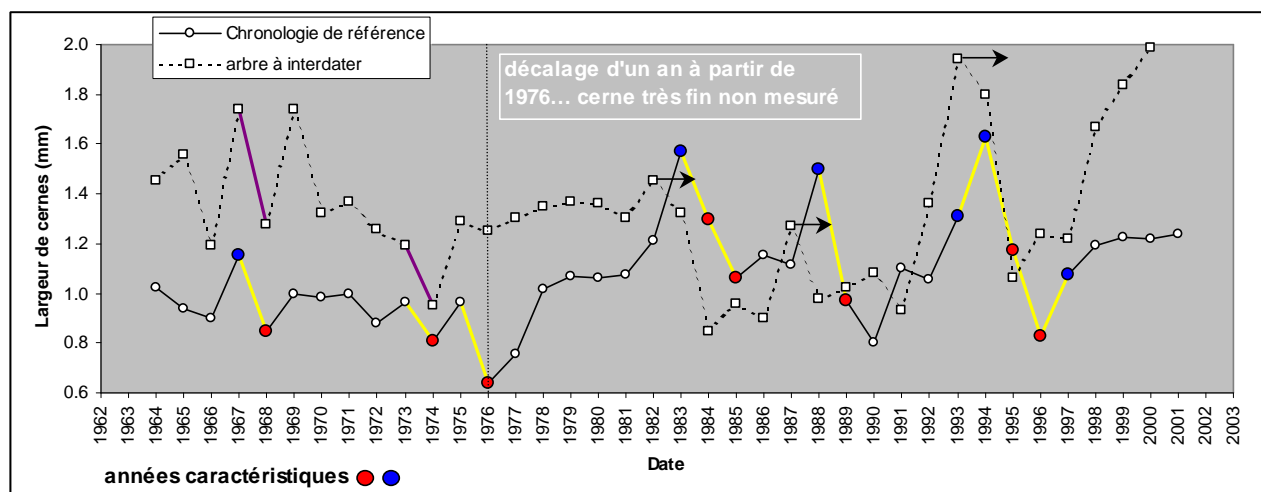
Le principe fondamental de cette interdatation (ou synchronisation) repose sur l'existence « d'années caractéristiques » auxquelles correspondent des conditions de croissance remarquables. Ces années témoignent d'événements extrêmes survenus dans la vie de l'arbre, et plus généralement de l'action limitante ou stimulante des facteurs climatiques sur la croissance qui, selon leur intensité et leur durée, ont pour effet de générer des séries de cernes plus étroits ou plus larges que la moyenne. Pour des arbres soumis au même environnement, les fluctuations climatiques inter-annuelles vont entraîner des variations synchrones de la structure des cernes (croissance forte ou faible).

Ces cernes larges ou fins (pic ou creux sur le profil), constituent les véritables repères chronologiques communs appelés « années caractéristiques ». **(Voir Partie II pour les méthodes d'interdatation).**



Genévrier Thurifère (*Juniperus thurifera*) (Bertaudière, 1999)

Les figures ci-dessous montrent un exemple d'une série chronologique à interdater présentant un cerne absent en 1976. La figure du haut montre un décalage systématique d'une année à partir de 1976. La figure du bas montre le calage chronologique après ajout du cerne 1976 oublié lors de la mesure.



Les tableaux suivants présentent les années caractéristiques observées dans des peuplements forestiers français feuillus et résineux. Les données proviennent essentiellement du réseau Renecofor et ont été publiées dans de nombreux articles (Lebourgeois, 1997, 2005, 2006a, b, 2007 ; Lebourgeois *et al.*, 2003, 2004 ; Lebourgeois *et al.*, 2009 ; Lebourgeois *et al.*, 2005).

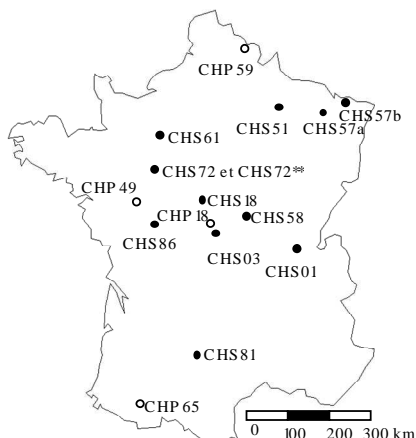
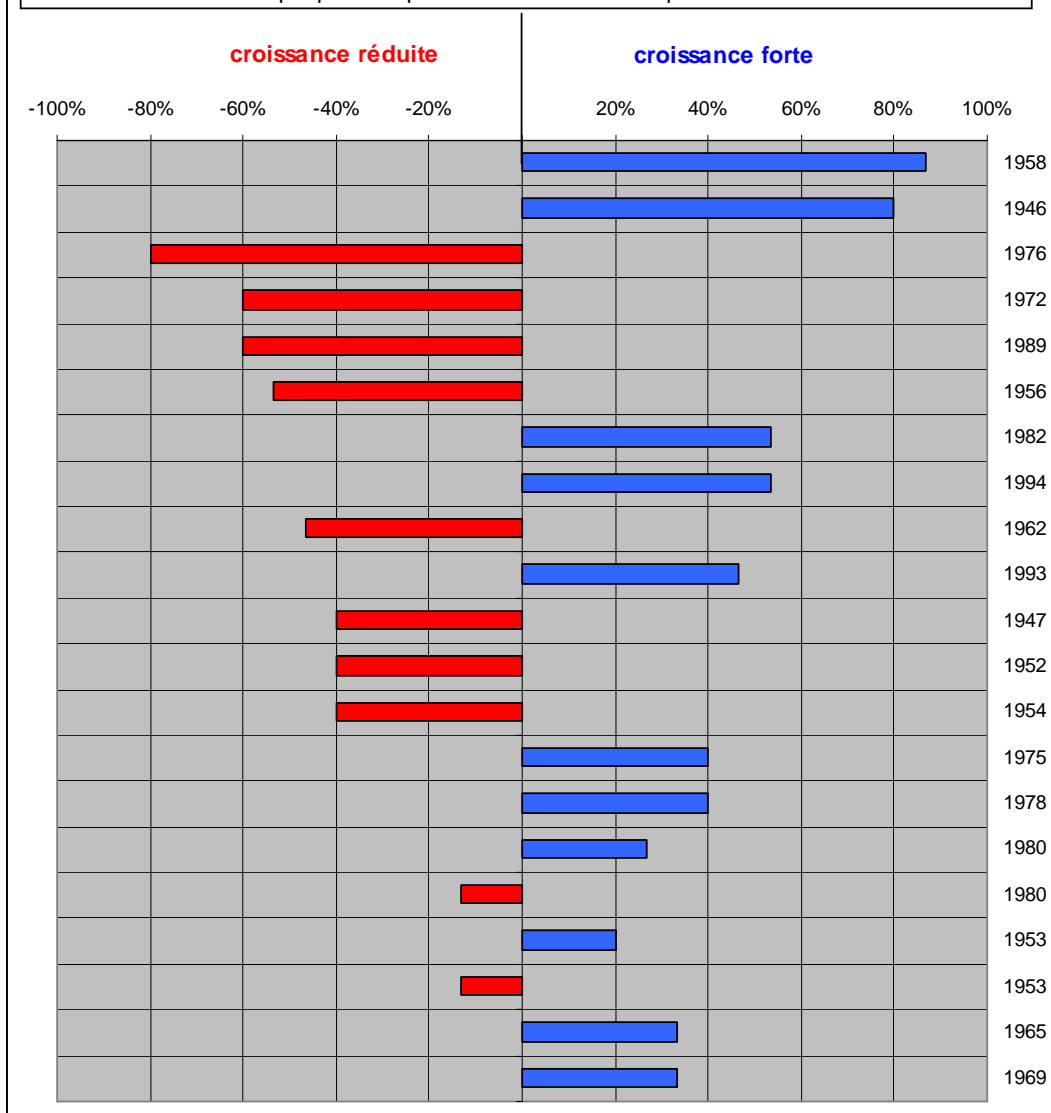
Chênaies sessiliflores et pédonculées

	Longitude		Latitude		Site
	001°52' W	02°35' E	47°27' 22" N	47°48' 31" N	
1900					chp49
1901					chs72 **
1902					chs72
1903					chs86
1904					chs61
1905					chs18
1906					chp18
1907					chs03
1908					chs58
1909					chs01
1910					chp59
1911					chs51
1912					chs57a
1913					chs57b
1914					chp65
1915					chs81
1916					
1917					
1918					
1919					
1920					
1921					
1922					
1923					
1924					
1925					
1926					
1927					
1928					
1929					
1930					
1931					
1932					
1933					
1934					
1935					
1936					
1937					
1938					
1939					
1940					
1941					
1942					
1943					
1944					
1945					
1946					

	Longitude		Latitude		Site
	001°52' W	02°35' E	47°27' 22" N	47°48' 31" N	
1947					chp49
1948					chs72 **
1949					chs72
1950					chs86
1951					chs61
1952					chs18
1953					chp18
1954					chs03
1955					chs58
1956					chs01
1957					chp59
1958					chs51
1959					chs57a
1960					chs57b
1961					chp65
1962					chs81
1963					
1964					
1965					
1966					
1967					
1968					
1969					
1970					
1971					
1972					
1973					
1974					
1975					
1976					
1977					
1978					
1979					
1980					
1981					
1982					
1983					
1984					
1985					
1986					
1987					
1988					
1989					
1990					
1991					
1992					
1993					
1994					

Années caractéristiques les plus fréquemment observées pour les chênaies françaises (hors contexte méditerranéen) sur la période 1945-1994.

L'étude porte sur **16 peuplements** (4 Ch. pédonculées et 12 Ch. sessiliflores) comportant chacun de 18 à 30 arbres dominants. Seules les années observées dans au moins 5 sites sont présentées. Une année est caractéristique quand la variation de croissance relative avec l'année précédente est d'au moins 10% (en plus ou en moins) et qu'au moins 75 des arbres du peuplement présentent le même comportement.



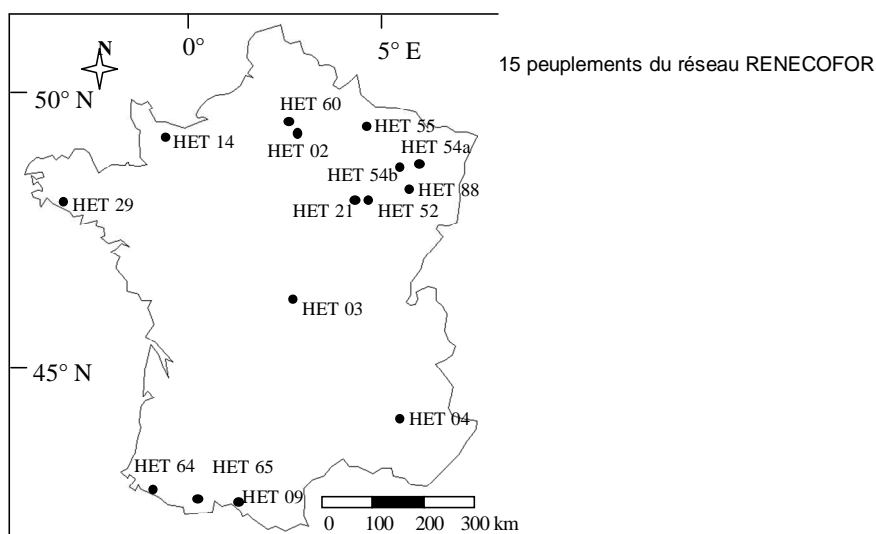
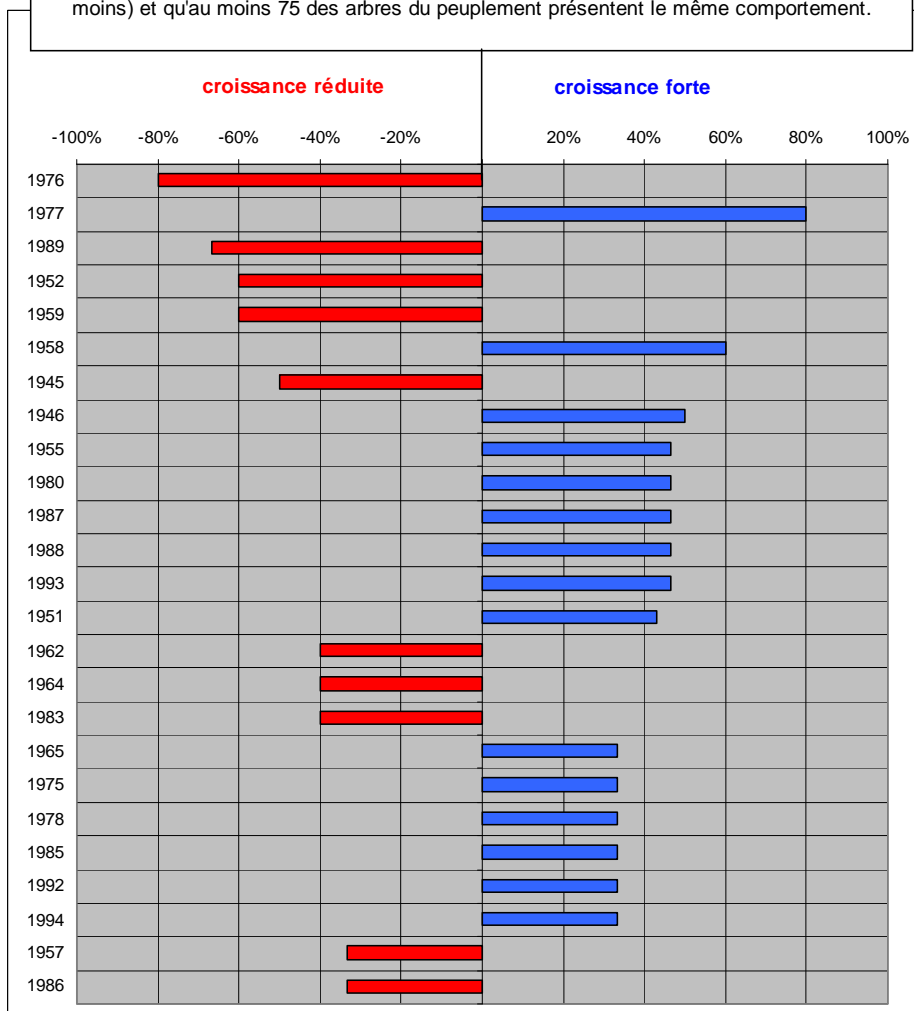
15 peuplements du réseau RENECOFOR et chs72** : Futaie des Clos en FD de Bercé (coordonnée moyenne pour la FD de Bercé)

Hêtraies

	Longitude	Latitude	Site
1900	3°07'36" E	49°12'21" N	HET02
1901	2°59'54" E	46°11'37" N	HET03
1902	5°48'00" E	44°07'52" N	HET04
1903	1°16'56" E	42°55'53" N	HET09
1904	0°51'23" W	49°10'57" N	HET14
1905	4°51'18" E	47°48'50" N	HET21
1906	3°32'34" W	47°50'16" N	HET29
1907	5°04'17" E	47°47'46" N	HET52
1908	6°42'23" E	48°30'35" N	HET54A
1909	6°04'04" E	48°38'57" N	HET54B
1910	5°00'17" E	49°10'15" N	HET55
1911	2°52'34" E	49°19'27" N	HET60
1912	0°39'29" W	43°09'01" N	HET64
1913	0°26'12" E	43°01'36" N	HET65
1914	6°14'50" E	48°06'21" N	HET88
1915			
1916			
1917			
1918			
1919			
1920			
1921			
1922			
1923			
1924			
1925			
1926			
1927			
1928			
1929			
1930			
1931			
1932			
1933			
1934			
1935			
1936			
1937			
1938			
1939			
1940			
1941			
1942			
1943			
1944			
1945			
1946			
1947			
1948			
1949			
1950			
1951			
1952			
1953			
1954			
1955			
1956			
1957			
1958			
1959			
1960			
1961			
1962			
1963			
1964			
1965			
1966			
1967			
1968			
1969			
1970			
1971			
1972			
1973			
1974			
1975			
1976			
1977			
1978			
1979			
1980			
1981			
1982			
1983			
1984			
1985			
1986			
1987			
1988			
1989			
1990			
1991			
1992			
1993			
1994			

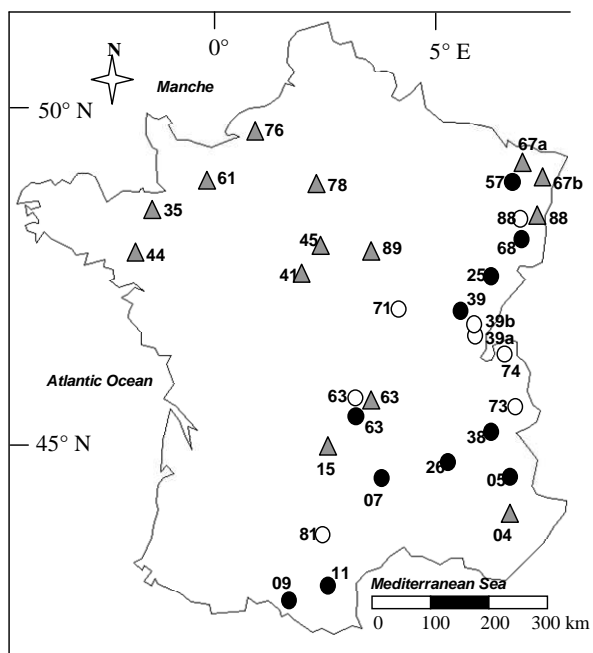
Années caractéristiques les plus fréquemment observées pour les hêtraies françaises (hors contexte méditerranéen) sur la période 1945-1994.

L'étude porte sur **15 peuplements** comportant chacun de 26 à 30 arbres dominants. Seules les années observées dans au moins 5 sites sont présentées. Une année est caractéristique quand la variation de croissance relative avec l'année précédente est d'au moins 10% (en plus ou en moins) et qu'au moins 75 des arbres du peuplement présentent le même comportement.



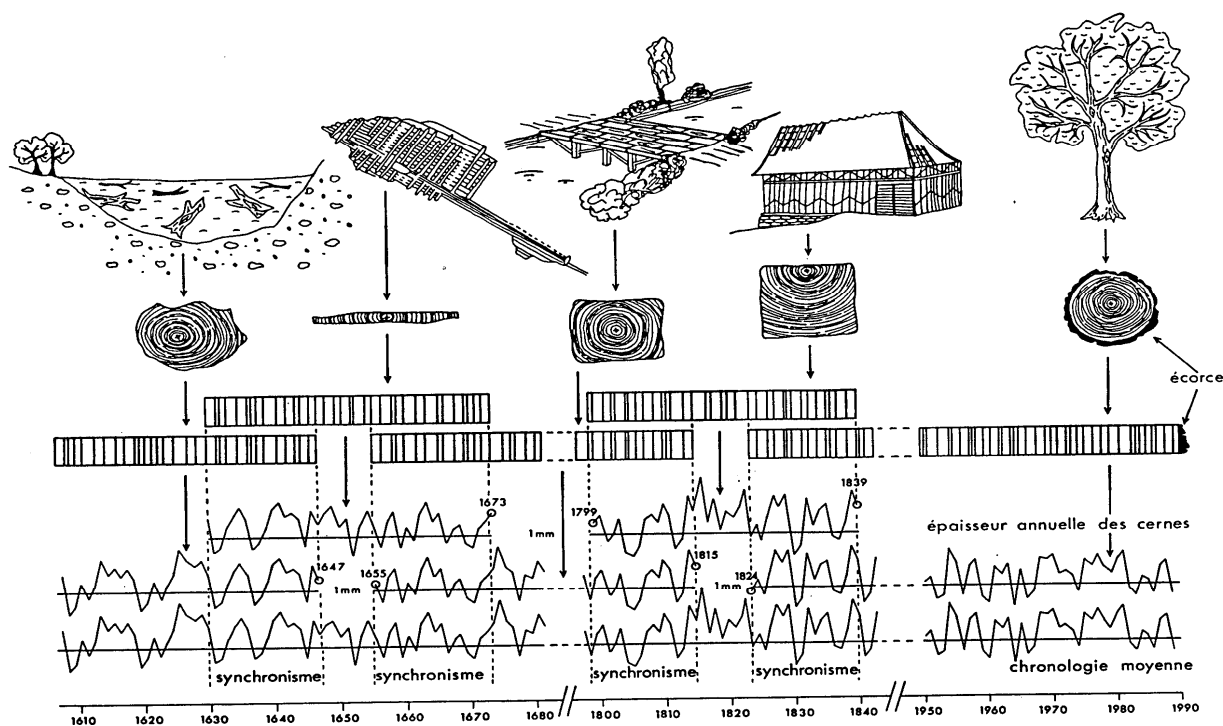
Analyse des cernes : principes et méthodes de la dendrochronologie

	<i>Epicéa commun</i>	<i>Sapin</i>		<i>Pin sylvestre</i>	
Alt. (m)	1014	1105	802	128	731
RUM (mm)	108	113	99	119	68
P année (mm)	1320	1078	1219	691	1018
T Jan (°C)	1.2	0.7	2.1	3.7	1.9
T Juil (°C)	16.8	17.7	17.8	18.3	18.2
N peupl.	8	6	5	8	6
1949	-				-
1950		-			+
1951			+		+
1952			-		-
1955	+	+			
1956		-			
1957					+
1959				-	
1960				+	
1961			+		
1962	-	-	-		-
1963	+			+	
1964		+		-	
1965		-		+	
1966			+	+	
1969		+		-	
1970		-			
1971				+	
1973	-			-	
1976	-	-	-	-	-
1977		+	+		
1980	+				+
1982					+
1983					-
1984		-			+
1985		+			
1986	-	-	-		
1987		+	+		
1988			+		
1989			-	-	
1991				-	-
1992					+
1993	+	+			
1994				+	



33 peuplements du réseau RENCOFOR
 Période 1949-1994
 (Lebourgeois et al., 2009, Journal of Vegetation Science)

Ces années caractéristiques sont à la base des travaux en **dendroarchéologie** visant à étudier et à dater des échantillons de bois fossiles ou très anciens (habitation, œuvres d'art...). Il existe de très nombreux laboratoires publics et privés spécialisés dans cette thématique.



(Lambert et al. 1992)

Méthode de datation et logiciel : LAMBERT, G. 2006 . Dendrochronologie, histoire et archéologie, modélisation du temps ; le logiciel Dendron II et le projet Historic Oaks. Dissertation HDR, University of Franche-Comté, Besançon (F). 2 vol., 151 and 205 pp.

4.8. QUELQUES PARAMÈTRES STATISTIQUES

- *Largeur moyenne, écart type et coefficient de variation*

L'accroissement moyen annuel (en mm/an) et l'écart-type des largeurs des cernes peuvent être calculés pour chaque arbre sur la base des chronologies individuelles ou pour le peuplement sur la base de la chronologie de référence (=maîtresse, *Master Chronology*). A partir de ces deux valeurs, le coefficient de variation (moyenne divisée par l'écart-type) peut être calculé. Ce paramètre, exprimé sans dimension, traduit l'écart relatif des valeurs à la moyenne.

- *Sensibilité moyenne (SM), coefficient d'interdatation (SR) et autocorrélation (AC)*

La sensibilité moyenne (SM) (*mean sensitivity*) et l'autocorrélation d'ordre 1 (AC) de chaque série de cernes permettent d'appréhender l'intensité et le mode de réponse des arbres au facteur du milieu, notamment au facteur climatique (Douglass, 1937 ; Fritts, 1976 ; Schulman, 1945). La sensibilité moyenne définit la variation moyenne entre deux épaisseurs annuelles successives. Elle exprime l'ampleur des changements affectant à court terme l'épaisseur des cernes et varie de 0, pour deux cernes successifs égaux, à 2 lorsque l'épaisseur de l'un d'entre eux est nulle. Elle quantifie la sensibilité des arbres au climat tel qu'il résulte de l'interaction des facteurs du milieu et s'exprime par le rapport :

$$S_j = \frac{1}{n-1} \times \sum_{t=1}^{t=n-1} \left| \frac{2(x_{t+1} - x_t)}{x_{t+1} + x_t} \right|$$

x_t = cerne formé l'année t x_{t+1} = cerne formé l'année t+1 n= nombre d'années disponibles
Pour la population entière, la sensibilité moyenne est :

$$SM_i = \frac{1}{n-1} \times \sum_{t=1}^{t=n-1} S_j$$

Le coefficient d'interdatation SR correspond au plus ou moins bon synchronisme des séries élémentaires dont est issue la chronologie maîtresse. C'est le rapport de la sensibilité moyenne calculée directement sur la chronologie maîtresse (SM_m) à la moyenne des sensibilités moyennes calculées sur les séries élémentaires correspondantes (SM_i) :

$$SR = \frac{SM_m}{SM_i}$$

Les valeurs les plus proches de 1 expriment un synchronisme maximum. L'asynchronisme total est exprimé par des valeurs qui dépendent de la taille de l'échantillon analysé. Pour un groupe de n séries, une valeur de SR égale à $1/\sqrt{n}$ correspondrait à des séries dont les épaisseurs de cernes varieraient de façon purement aléatoire (Munaut, 1966, 1978 ; Schulman, 1956).

La confrontation de ces deux paramètres (SM et SR) permet une appréciation plus objective de l'intensité et du mode de réponse des arbres au facteur climatique. La combinaison « faible sensibilité moyenne et fort coefficient d'interdatation » dénote une réponse modérée, mais très homogène, des individus au climat. A l'opposé, une forte sensibilité moyenne couplée à un faible coefficient d'interdatation signifie une réponse climatique plus modulée par l'intervention de facteurs microstationnels susceptibles d'agir de façon sélective sur les individus (Nefaoui, 1996 ; Tessier, 1982, 1986, 1989).

L'autocorrélation d'ordre 1 estime l'interdépendance entre deux cernes successifs de la même série chronologique, c'est-à-dire quantifie l'effet de la persistance lié aux conditions conduisant à l'élaboration du cerne de l'année (t-1) sur la mise en place du cerne de l'année suivante (t).

Une étude menée sur 41 peuplements forestiers répartis sur l'ensemble de la France (RENECOFOR) (Lebourgeois, 1999) montre que la sensibilité moyenne, qui reflète la variance haute-fréquence des séries de cernes, varie (calcul sur les données brutes) :

- **Selon la méthode de calcul.** Le coefficient établi sur les séries individuelles puis moyenné sur l'ensemble des arbres (SM_i) est toujours plus élevé que la valeur calculée directement à partir de la chronologie moyenne (SM_m) et ceci quels que soient le compartiment du cerne et la période considérés. Ces résultats sont cohérents avec les observations faites par Gadbin-Henry (1994) sur *Pinus Pinea*, Nefaoui (1996) sur *Pinus pinaster* et Desplanque *et al.* (1998) sur *Abies alba* et *Picea abies*. Ceci résulte en grande partie de la minimisation des variations atypiques propres à chaque individu lors du calcul de la série moyenne ;
- **Selon l'unité d'expression du cerne.** La sensibilité moyenne est toujours plus élevée pour les séries de cernes exprimées en surface. Ceci suggère que la surface intègre plus fortement les variations inter-annuelles de croissance des arbres que la largeur ;
- **Selon le compartiment anatomique du cerne.** Pour les chênes et les résineux, la sensibilité moyenne est plus forte pour le bois final que pour le bois initial (**Figure ci-dessous**). Pour le hêtre, les valeurs les plus élevées sont observées pour le bois initial. Ceci suggère une réactivité différente des deux compartiments du cerne aux variations climatiques inter-annuelles.

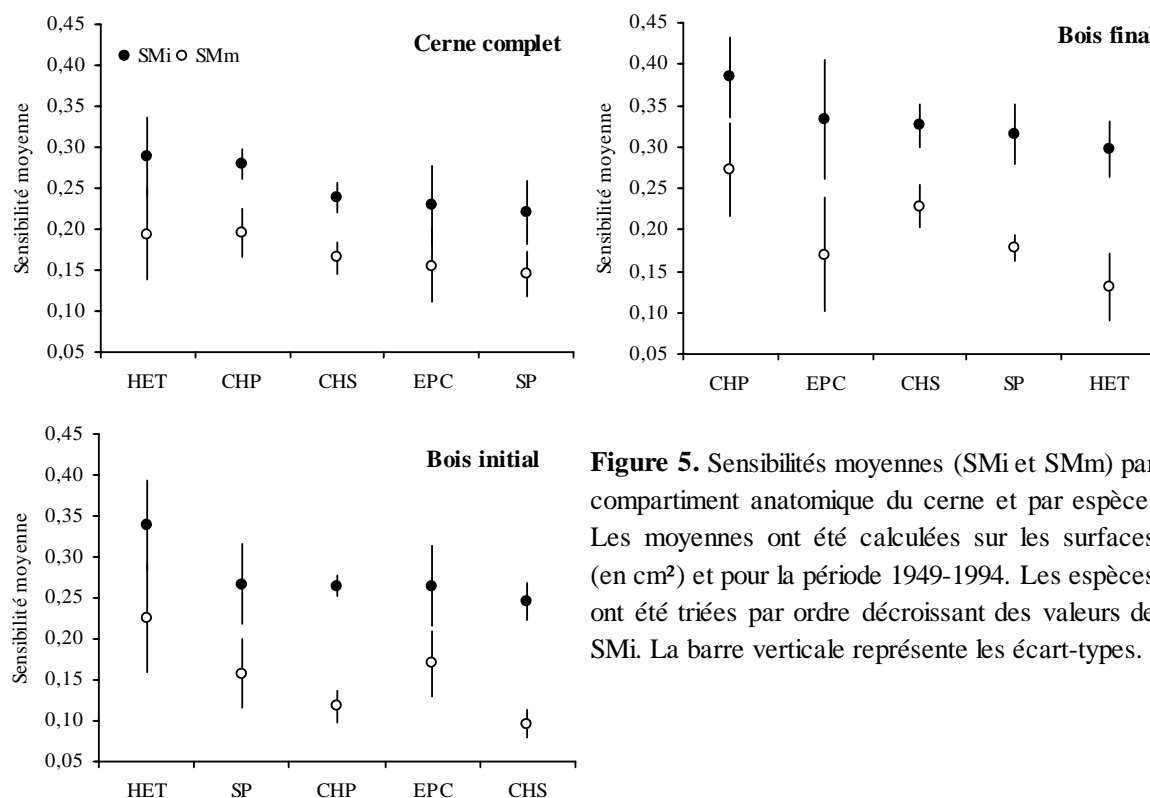
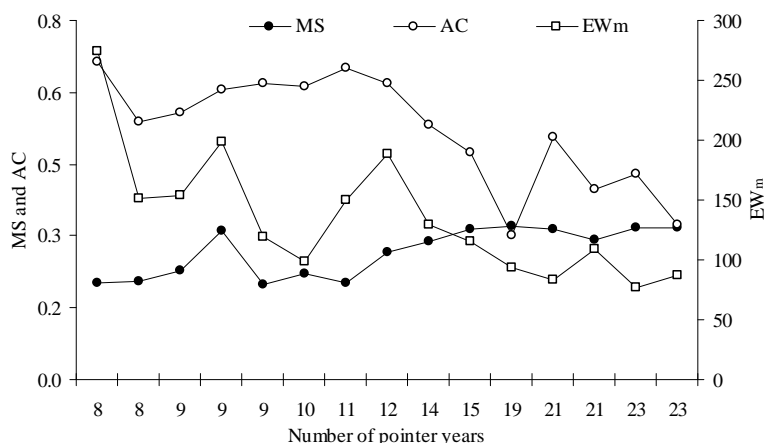


Figure 5. Sensibilités moyennes (SM_i et SM_m) par compartiment anatomique du cerne et par espèce. Les moyennes ont été calculées sur les surfaces (en cm^2) et pour la période 1949-1994. Les espèces ont été triées par ordre décroissant des valeurs de SM_i . La barre verticale représente les écart-types.

Il existe une relation étroite entre les caractéristiques stationnelles de croissance des arbres et les caractéristiques des cernes. Pour 15 hêtraies du RENECOFOR, Lebourgeois (1999) a montré que le nombre d'années caractéristiques augmente quand la réserve utile maximale en eau du sol diminue. La sensibilité moyenne augmente et l'autocorrélation diminue. Sous le seuil de 100 mm, la fréquence des années caractéristiques dépasse 40% (plus de 20 années caractéristiques sur la période 1949-1994). MS est supérieure à 0,3 et AC inférieure à 0,5.



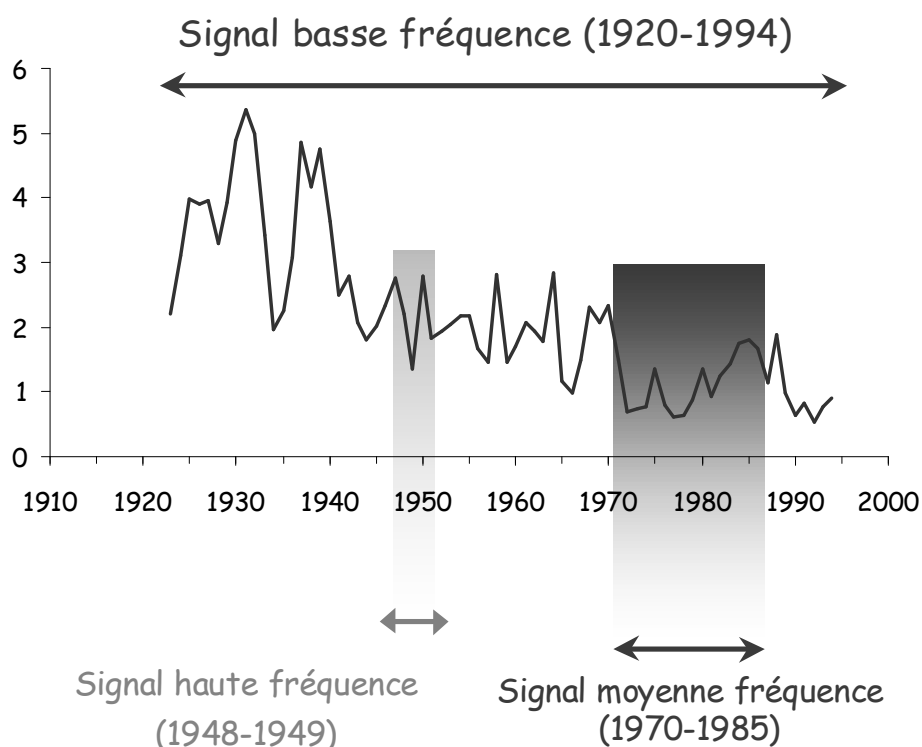
Relation entre le nombre d'années caractéristiques (calculées sur le cerne complet), la réserve utile en eau maximale du sol (EW_m), la sensibilité moyenne (MS) et l'autocorrélation (AC) des largeurs de cernes pour 15 hêtraies du Réseau RENECOFOR (Lebourgeois, 1999).

Il est également important de noter que la sensibilité va être très différente si on la calcule sur les données brutes ou sur les données standardisées. En effet, sur les données brutes, les variations de croissance vont intégrer l'ensemble des signaux liés non seulement aux facteurs du milieu mais également aux facteurs endogènes (âge par exemple). Ainsi, si le calcul se fait sur des séries de cernes présentant des âges très différents, les valeurs différentes de SM observées vont contenir un fort effet « âge cambial ». Si on calcule les SM sur les séries standardisées, les valeurs sont généralement plus faibles mais reflètent davantage les effets propres aux facteurs du milieu (climat notamment). Il est donc très important de préciser les données utilisées pour le calcul.

4.9. CHOIX DE L'INFORMATION À TRAITER : NOTION D'ÉCHELLES DE TEMPS

L'ensemble des signaux agit sur les accroissements radiaux à des **échelles de temps** ou **fréquences** différentes. Classiquement, l'analyse des séries chronologiques peut se faire à 3 échelles (*figure suivante*) :

- **L'échelle inter-annuelle** ou **haute fréquence** intègre les variations annuelles de croissance des arbres. Celles-ci concernent la physiologie de l'espèce et ont pour origines les fluctuations aléatoires des conditions environnementales tel que le climat (facteur principal) ou les perturbations ponctuelles comme les incendies, les attaques de parasites... ;
- **L'échelle de la décennie** ou **moyenne fréquence** permet de mettre en évidence les variations de croissance sur plusieurs années. Ces fluctuations peuvent être là encore d'origine climatique (crises de croissance dans le cas de sécheresses répétées, d'arrière-effets...), mais également être la résultante des pratiques sylvicoles (forte éclaircie, éclaircie sélective...) ou de phénomènes de dépérissement ;
- **L'échelle du siècle** (ou plus...) ou **basse fréquence** intègre les variations à très long terme. Celles-ci concernent les tendances de croissance dues à l'âge (décroissance biologique normale des largeurs de cernes quand l'arbre vieillit), mais également les variations lentes et continues des conditions environnementales (évolution de la sylviculture, pollutions atmosphériques, dérive climatique...).



Ces notions d'échelles de temps sont extrêmement importantes car les méthodes employées pour analyser les différents signaux dépendent de la fréquence à laquelle on désire les étudier. Selon les buts recherchés, les paramètres du modèle linéaire de Cook (1987) constitueront soit **le signal** à étudier ou **le bruit de fond** à éliminer. A l'heure actuelle, les techniques d'analyse des signaux haute

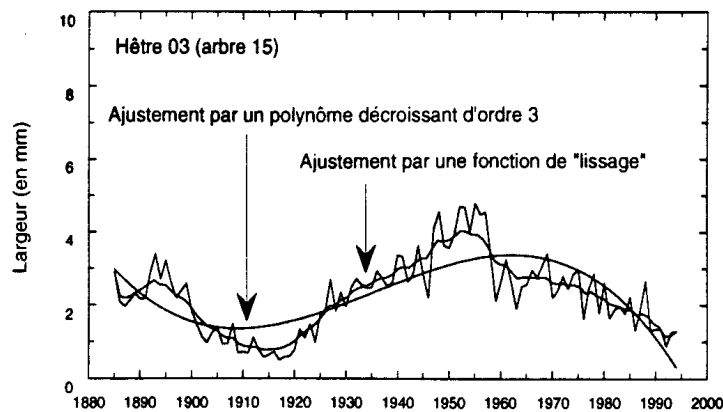
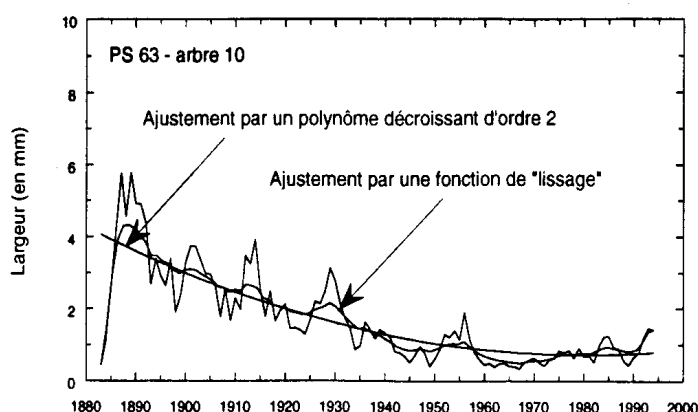
et moyenne fréquences sont très évoluées et concernent principalement l'analyse des relations cerne-climat. Les signaux basse fréquence, non liés aux effets de l'âge des arbres, sont en revanche moins étudiés, et les méthodes « d'extraction » de ces signaux sont encore largement discutées. Les études concernent essentiellement les évolutions à long terme de la croissance des arbres (Becker, 1987, 1989 ; Becker *et al.*, 1995a ; Becker *et al.*, 1995b ; Bontemps, 2006 ; Bontemps *et al.*, 2009 ; Bontemps *et al.*, 2005 ; Lebourgeois *et al.*, 2000)

4.10. PRINCIPE DE LA STANDARDISATION DES SÉRIES CHRONOLOGIQUES DE CERNES

La standardisation est fondée sur le principe de la séparation du **signal** que l'on cherche à étudier des **bruits de fonds** indésirables qui lui sont associés. Classiquement, l'étude des effets des facteurs environnementaux sur la croissance radiale (climat, pollutions, parasites...) ne peut se faire qu'après élimination de l'effet dépressif de l'âge de l'arbre sur l'élaboration des cernes. Les méthodes d'extraction du signal âge dans les séries de cernes sont nombreuses et, à l'heure actuelle, le choix de l'une ou l'autre dépend en partie des objectifs de l'étude et de la stratégie d'échantillonnage adoptée (effectif d'arbres et de sites, répartition des classes d'âge, domaine climatique...). L'ensemble de ces méthodes est cependant fondé sur le même principe qui consiste, dans un premier temps, à ajuster les données initiales brutes (R_t où t est l'année de 1 à n) par une fonction mathématique qui fournit une série de valeurs prédites (G_t), puis à calculer des indices (R_t/G_t) ou des résidus ($R_t - G_t$) dégagés des effets indésirables du signal âge. A partir de ces valeurs standardisées (qui sont exprimées en % ou sans unité), on peut alors comparer valablement la croissance d'arbres d'âges différents, calculer une courbe représentative de la croissance moyenne du peuplement et analyser le signal « date » dans les séries de cerne.

Les méthodes d'extraction du signal âge peuvent être regroupées en trois grandes classes : **déterministe, stochastique et standardisation régionale « courbe âge »**. Le principe des méthodes déterministes et stochastiques ont été amplement développées par ¹Cook *et al.* (1990).

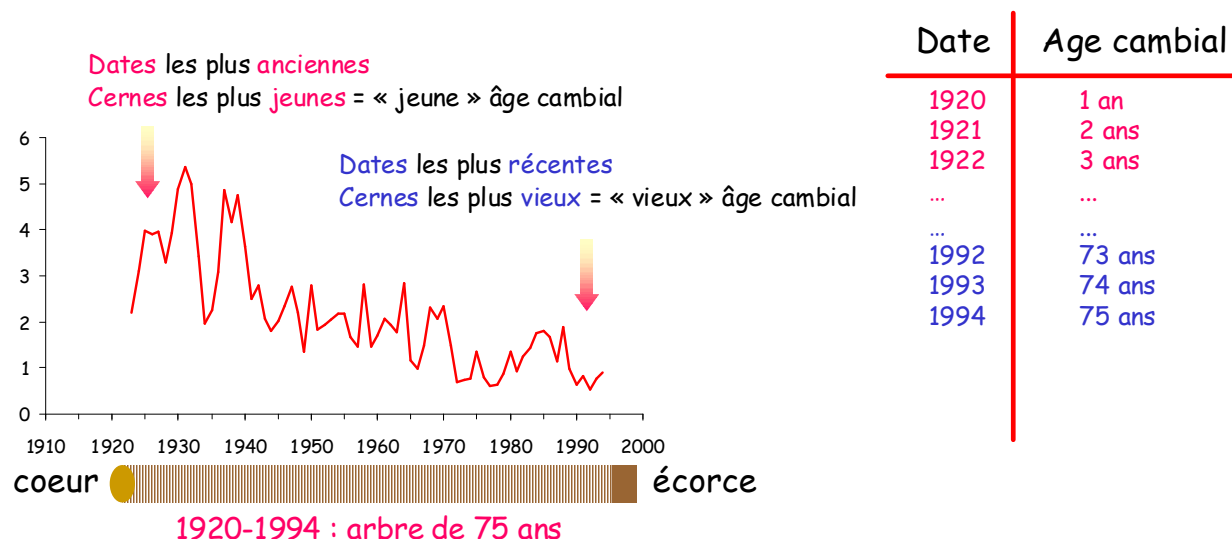
La première méthode consiste à ajuster chaque série individuelle de cernes par un modèle mathématique connu et défini *a priori* : modèle linéaire ($G_t = b_0 + b_1t$), polynomial ($G_t = b_0 + b_1t + b_2t^2 \dots$), exponentiel ($G_t = a \exp^{-bt} + k$), hyperbolique ($1/G_t = a + b(t-k)$), puissance ($G_t = at^{-b}$).... La seconde méthode ajuste plus précisément le modèle mathématique aux données brutes et fait appel à des fonctions complexes définies *a posteriori* (lissage des courbes) (**figures ci-dessous**).



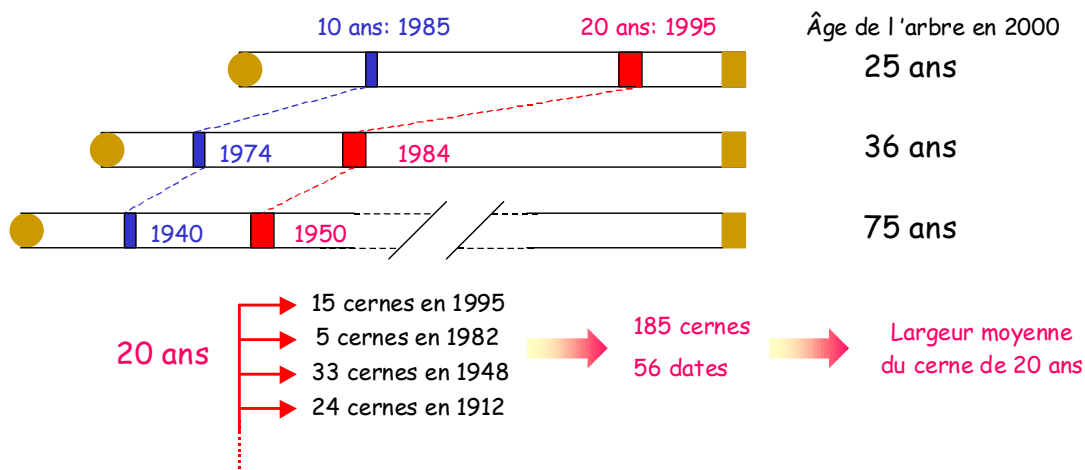
¹ Cook, E.R., Briffa K., Shiyatov S., Mazepa V., 1990. Tree-Ring standardisation and growth trend estimation. in " *Methods of dendrochronology : Applications in the environmental sciences* ". Kluwer Academic Publishers. COOK E.R., KAIRIUKSTIS L.A. (eds.), 104-123.

Toutes ces méthodes sont présentées dans la **Partie II : Utilisation des programmes de dendrochronologie**.

La troisième méthode est fondée sur la standardisation des données initiales à partir de la courbe régionale liant les largeurs (ou surfaces) des cernes à l'âge cambial (=âge de l'arbre au moment où le cerne a été élaboré) (**courbe âge régionale**). **Les courbes «âge» régionales permettent d'éliminer l'effet de l'âge sur les largeurs des cernes annuels, c'est-à-dire de tenir compte de la décroissance biologique normale des largeurs de cernes quand l'arbre vieillit...**

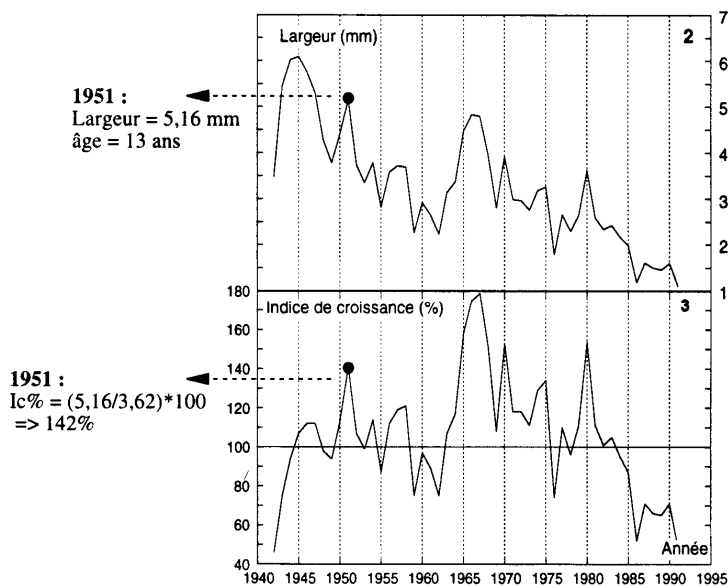
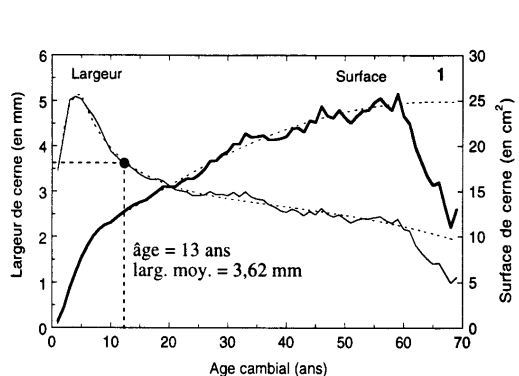


La construction de la courbe âge consiste à calculer la largeur moyenne (=« normale ») des cernes pour chaque âge cambial. Pour cela, il faut disposer d'un nombre d'arbres importants d'âges actuels variés...



Par rapport aux méthodes précédentes, cette standardisation est plus difficile à mettre en œuvre car, pour être statistiquement fiable, elle nécessite l'échantillonnage d'un très grand nombre d'arbres (généralement supérieur à 500) localisés dans un même domaine climatique ainsi que des classes d'âges actuels variées (20 à 200 ans et plus) le plus équilibrées possible. Après avoir calculé la largeur moyenne du cerne pour chaque âge cambial et tracé la relation, chaque largeur est transformée en indice de croissance en faisant le rapport de la largeur observée sur la largeur moyenne de référence pour l'âge cambial correspondant (**figures ci-dessous**). Par rapport aux méthodes précédentes, cette standardisation a l'avantage d'éliminer en grande partie et

« sélectivement » le signal basse fréquence lié à l'âge et de conserver les autres signaux (haute, moyenne et basse fréquence) liés à la date et aux autres facteurs du milieu.



PARTIE II

UTILISATION DES LOGICIELS

INTERDATATION

1. PROGRAMME « INTERDAT.EXE »

1.1. PRINCIPES DE CALCUL

Il faut rappeler que l'interdatation (ou « cross-dating ») est une étape essentiellement visuelle et que, *in fine*, c'est l'opérateur qui décide ou non de corriger les éventuelles erreurs. L'objectif est de vérifier l'agencement synchrone des séries chronologiques par comparaison avec une référence. L'interdatation peut se faire à partir des données brutes ou sur des séries d'indices détendancés. Cette interdatation est plus aisée sur des arbres encore vivants (car on connaît alors la date exacte de prélèvement des échantillons) que sur des arbres morts ou sur des échantillons de bois anciens « anonymes » pour lesquels aucune information date n'est disponible (par exemple poutre dans des bâtiments du moyen-âge..). **Nous ne parlerons pas ici des techniques complexes de dendroarchéologie.**

Le programme présenté ici a été conçu pour l'interdatation de carottes d'arbres vivants. Ainsi, Michel Becker puis Jean-Luc Dupouey (INRA-Nancy) ont mis au point un programme permettant de calculer les années caractéristiques et de corriger les séries élémentaires mal interdatées.

L'interdatation des carottes est réalisée à l'aide de deux méthodes complémentaires : Le calcul statistique des années caractéristiques et la construction d'une chronologie de référence.

La première étape consiste à calculer, pour chaque arbre de la placette et chaque année disponible, l'évolution du rapport (ERC_n) entre la largeur du cerne de l'année n (L_n) et celle du cerne de l'année n-1 (L_{n-1}). Le calcul se fait sur les données brutes (largeur ou surface) :

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

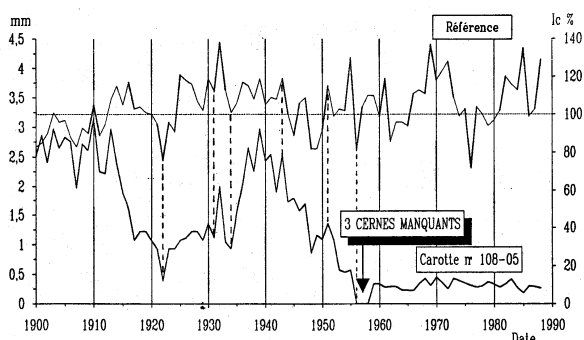
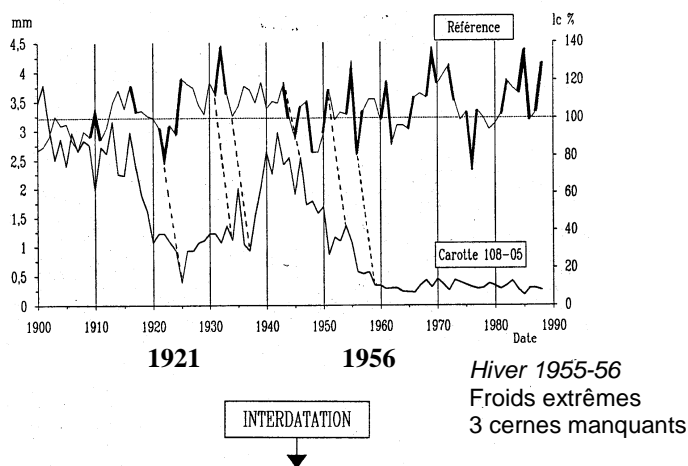
Une moyenne des ERC peut être ensuite calculée pour chaque date disponible en utilisant l'ensemble des carottes de la placette. On obtient alors une valeur moyenne de l'évolution relative de la croissance radiale pour l'ensemble de l'échantillon entre deux années consécutives.

Une année n est alors considérée **comme caractéristique** quand :

- L'écart relatif moyen est d'au moins 10%. Cette différence est positive dans le cas d'une forte croissance et négative dans le cas inverse ;
- Au moins 70 % des arbres échantillonnés présentent le même comportement pour le cerne correspondant ;
- L'effectif d'arbres pris en compte pour le calcul est au minimum de 10 (dans la majorité des cas).

Une année est d'autant plus caractéristique que l'écart relatif moyen est important et que le pourcentage d'arbres présentant le même comportement est élevé.

Une fois ces années caractéristiques définies, une courbe de référence provisoire est déterminée sur l'ensemble des arbres disponibles en calculant la moyenne des largeurs de cernes par date ; courbe sur laquelle apparaissent en couleur les différents cernes caractéristiques. Chaque profil individuel est alors comparé visuellement à cette courbe (figure ci-dessous) (d'après Bert 1992). L'interdatation est facilitée par la possibilité de faire défiler horizontalement et dans les deux sens les profils l'un par rapport à l'autre, d'éprouver diverses hypothèses de correction et de corriger les données initiales si nécessaire. Si un décalage est observé, la carotte correspondante est réexaminée sous une loupe binoculaire afin de déceler les causes du décalage. Quand tous les profils sont interdatés, l'ensemble du processus est réitéré, ce qui permet de définir précisément les années vraiment caractéristiques et de calculer une courbe de référence finale.



- **La sixième colonne** correspond au dernier cerne mesuré ; ici 2001.

Sauvegarde des données

Le fichier doit d'abord être sauvegardé en format txt (essai.txt) ou en format csv (essai.csv). Comme le programme interdat.exe ne reconnaît que les séparateurs en virgule, il faut ouvrir le fichier (essai.txt ou essai.csv) sous word et remplacer tous les points-virgules (; pour le fichier csv) ou les tabulations (^t pour le fichier txt) par des virgules (.). Le fichier final doit se présenter comme ci-dessous :

```
001341,2,1,2,1930,2001,223.1, ...
001531,2,1,8,1921,2001,202,172,213,199,
180.6,127.1,175.8,244, ...
```

Une fois les transformations effectuées, il faut enregistrer sous en donnant l'extension **.den** au fichier et en mettant le tout entre guillemets.

Nom du fichier :	« essai.den »
Type de fichier :	Texte seulement (*.txt)

1.2. ORGANISATION DES DONNÉES ET DES FICHIERS (SOUS EXCEL)

001341	2	1	2	1930	2001													223.1	...
001531	2	1	8	1921	2001	202	172	213	199	180.6	127.1	175.8	244	203.3				199.2	...
001591	2	1	10	1938	2001														...
002033	2	1	10	1797	2001	68.2	44.5	59.2	71.4	79	81.2	131.4	198	218.7	237.6				...
002043	2	1	0	1802	2001														...
002083	2	1	12	1805	2001														...
003174	2	1	0	1780	2001														...
...
ident	dc	pr	c	de	c	largeurs des cernes (en 1/100 mm)													

Les data brutes sont présentées en ligne, c'est-à-dire que chaque ligne représente une série de largeur de cernes. La première ligne du fichier contient directement les data et non les noms des colonnes correspondantes.

- **Les trois premières colonnes** (ident) sont des identificateurs (numéro, texte, vide, etc.). L'association des trois identificateurs doit être unique ;
- **La quatrième colonne** correspond à la distance au cœur (dc) en mm ;
- **La cinquième colonne** représente le premier cerne mesuré dans la série (date la plus ancienne). Par exemple, pour la première ligne (001341), la valeur du cerne de 1930 est 223.1 (=2.231 mm) ;

1.3. OUVERTURE DU PROGRAMME INTERDAT.EXE

Le fichier **essai.den** peut être lu directement par le programme **interdat.exe**. Il suffit de cliquer sur le programme pour l'ouvrir.

- **Etape numéro 1 : calcul des années caractéristiques**

Fichier

Ouvrir référence

Se placer dans le bon dossier et ouvrir le fichier **essai.den**. Une fenêtre apparaît avec les data : Num, Placette, Arbre, Carotte, %inter, Début, Fin. **Attention**, les vrais identificateurs du fichier ne correspondent peut-être pas forcément à une placette, un arbre et une carotte ! Ce n'est pas grave car ce sont juste des noms de colonne donnés par défaut qui ne jouent aucun rôle dans le calcul. De la même façon, la colonne distance à cœur n'apparaît plus dans cette fenêtre. Il faut savoir

également que ces données ne sont pas utilisées dans la procédure de calcul des années. A ce niveau là, on peut choisir de **[Tout ajouter]** ou **[Ajouter]** seulement certaines données pour le calcul des années caractéristiques. Pour la solution **[Ajouter]**, il faut cliquer sur les arbres sélectionnés. Après avoir choisi l'option, il faut cliquer sur **[Valider]**. Le calcul des années caractéristiques et de la chronologie maîtresse ne prend que quelques secondes. Une fois la procédure terminée, la courbe moyenne avec les années caractéristiques surlignées en couleur apparaît dans la fenêtre graphique du haut. On peut zoomer ou non pour voir la courbe en entier.

Affichage

Années caractéristiques

Ce menu permet de visualiser les années caractéristiques calculées sur le jeu de données : Année, Nombre, Valeur Moyenne, %Positif, %Négatif, %Stable. Les années caractéristiques sont marquées par un symbole jaune. En cliquant sur les identificateurs des colonnes, les données sont triées par ordre croissant des valeurs.

• Etape numéro 2 : interdatation des profils

Fichier

Ouvrir Courbes à interdater

On ouvre de nouveau le fichier *essai.den*. Le choix de l'arbre à interdater se fait dans la fenêtre du haut par un clic sur la ligne correspondante. Le profil de l'arbre apparaît dans la seconde fenêtre graphique sous la chronologie maîtresse. La comparaison des courbes est possible par défilement des profils. Le curseur à déplacer se trouve sous le second profil. Pour corriger les données, il faut cliquer sur le bouton gauche de la souris. 4 solutions sont possibles : **[Supprimer]**, **[Diviser 50-50]**, **[Diviser]**, **[Annuler]**. Suivre les instructions pour la correction et la sauvegarde.

2. CONTRÔLE DE LA QUALITÉ DE L'INTERDATATION (COFECHA.EXE)

Le laboratoire « Tree-Ring Research » de l'Université d'Arizona a mis au point depuis une vingtaine d'années une librairie de programmes (disponibles gratuitement sur le Web <http://web.utk.edu/~grissino/software.htm>) permettant de traiter des données de cernes : interdatation, standardisation, modélisation, etc. Parmi les programmes les plus utilisés, on peut citer les programmes COFECHA et ARSTAN. Ce sont des programmes exécutables sans code (xx.exe)

2.1. MISE EN FORME DES DONNÉES AVEC LE PROGRAMME CASE (ET FMT) (VERSION 6.02P)

Ce programme lit un fichier avec une ou plusieurs séries chronologiques en colonne « casewise format » (fichier txt) et les convertit en « compact format » (fichier rwm). **La conversion est indispensable** pour faire tourner les autres programmes. La capacité de traitement est de 4096 lignes et 200 colonnes en plus de la première réservée pour les années. Les colonnes sont séparées par une tabulation, une virgule ou par un ou plusieurs espaces. Le programme présente les 8 premières lignes du fichier de base et demande si la première ligne contient bien les identificateurs des séries. Le programme scanne la première colonne. Si les données sont séquentielles, il demande si le premier nombre est la date de la première ligne des données.

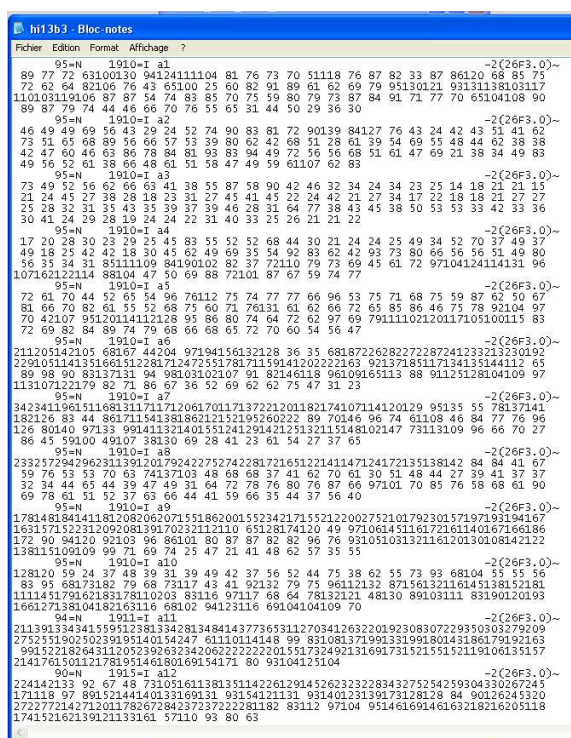
Exemple : fichier [essai.txt] Les données sont exprimées en dixièmes de mm.

year	a1	a2	a3	a4
1943	.	0.1110	0.1210	.
1944	.	0.1840	0.1490	.
1945	.	0.2240	0.1390	.
1946	0.1260	0.1900	0.2040	.
1947	0.1120	0.1900	0.2610	.
1948	0.1180	0.2460	0.2740	.
1949	0.1390	0.1220	0.0990	0.1590
1950	0.1790	0.3050	0.1430	0.2150
1951	0.0890	0.1690	0.2750	0.2810
1952	0.0390	0.1080	0.2230	0.1730
1953	0.0970	0.2820	0.2550	0.2920
1954	0.1360	0.3940	0.3220	0.3270

1955	0.1600	0.2300	0.2190	0.2600
1956	0.1260	0.2610	0.1580	0.2770
1957	0.1380	0.2450	0.2110	0.2820
...

Après utilisation du programme CASE, le fichier s'appelle [essai.rwm] et est de la forme :

```
18 = N 1946=I 1 ~3(20F4.0)~
126 112 118 139 179 etc.
21 = N 1943=I 2 ~3(20F4.0)~
111 184 224 190 190 246 etc.
```



(copie d'écran d'un fichier h13b3.rwm)

Parmi les options proposées par le programme CASE, les options Keep et Cut sont importantes à connaître. L'option Keep garde tous les zéros en début des lignes et, par défaut, il y aura des valeurs à partir de 1715. **Avec l'option Cut, les valeurs 0 liées aux données manquantes sont éliminées. Il faut donc utiliser la fonction Cut.**

Pour retransformer les données en fichier txt, il faut utiliser **le programme FMT**.

2.2. OBJECTIFS ET DÉROULEMENT DU PROGRAMME COFECHA (QUALITY CONTROL AND DATING CHECK OF TREE-RING MEASUREMENTS ; R.L. HOLMES, 1999) (VERSION 6.02P)

Le programme COFECHA permet de vérifier la qualité d'un jeu de données, les éventuelles erreurs de datation et les problèmes de mesures sur des séquences de cernes. Le niveau de corrélation entre les données correctement interdatées diffère selon les espèces, la localisation géographique, l'homogénéité des sites, la compétition et le degré de perturbation au sein du peuplement. La sensibilité des arbres aux facteurs environnementaux varie également au cours de leur développement ce qui peut également expliquer des divergences de datation entre les individus. Pour toutes ces raisons, ce programme ne donne pas une réponse définitive quant au rejet ou à l'acceptation de telle ou telle correction pour un arbre ou pour un groupe d'arbres. **C'est « seulement » un outil statistique d'aide à la décision pour l'utilisateur qui reste *in fine* libre de son choix quant aux corrections des séries.**

Avant l'interdatation et la mise en évidence des problèmes éventuels, **les données sont standardisées** de façon à éliminer les variations atypiques qui pourraient perturber l'analyse. Ceci est une différence fondamentale avec la méthode précédente de Becker qui travaille (en routine) sur les données brutes.

Pour chaque série élémentaire, les étapes suivantes sont effectuées :

- 1) **Elimination du signal basse fréquence** : chaque série est d'abord ajustée (=lissée) par un filtre digital basse fréquence. Il s'agit d'un ajustement polynomiale du troisième degré dans lequel 50% de l'amplitude du signal est éliminé pour une fenêtre d'environ 32 ans (« cubic smoothing spline with 50% cutoff of 32 years ») (smoothing spline = lissage ou ajustement par morceaux). Il n'y a pas de règle générale sur la longueur d'ajustement de la fenêtre (wavelength = longueur de la

vague). On considère généralement que la variance résiduelle du signal basse fréquence est trop forte si la fenêtre d'ajustement est trop petite (10, 20 ans). Ainsi, on considère que le bruit est largement réduit pour des fenêtres de l'ordre de 50 ans. Une fois ajustée, chaque valeur réelle est divisée par la valeur correspondante de la courbe d'ajustement. On obtient ainsi des séries élémentaires sans tendance ou sans « vague » (séries stationnaires).

- 2) **Elimination du signal moyenne fréquence** : chaque série « standardisée » est de nouveau ajustée par un processus autorégressif de façon à éliminer les signaux moyennes fréquences qui ont persisté suite à l'ajustement par la fonction spline. On obtient donc des séries de cernes indépendants à l'échelle haute-fréquence (variation d'une année sur l'autre), ce qui rend les données à interdater davantage conformes à l'hypothèse d'indépendance des séries nécessaire au calcul des corrélations de Pearson. Cet ajustement permet d'être plus conforme à l'hypothèse.

- 3) **Transformation des valeurs standardisées en logarithme** : le fait que la variance (ou l'écart-type) soit proportionnelle à la moyenne est souvent symptomatique du fait que la distribution de l'erreur ne suit pas une loi normale. La transformation logarithmique est la plus appropriée quand l'écart-type est proportionnel à la moyenne ou que les effets sont multiplicatifs. Cette situation est assez fréquente lorsque des processus de croissance ou de multiplication sont en jeu. Pour éviter cela, chaque cerne est transformé en log par la formule suivante $\log(x+x_0)$. Le facteur x_0 qui est égal à 1/6 de la valeur moyenne permet d'éviter les valeurs nulles ($\log = \text{infini}$ pour zéro). Après cette transformation en log, on obtient une nouvelle série de données positives ou négatives.

Après que toutes les séries aient été transformées, **la chronologie maîtresse** est calculée en divisant, pour chaque date, la somme des indices par le nombre de cernes disponibles (moyenne arithmétique).

Pour l'interdatation, chaque série élémentaire standardisée est divisée en séquences de cernes de 50 ans (=segments de cernes). Cette longueur importante donne un degré de liberté suffisant (minimum : 30 ans ; maximum : 100 ans).

Le programme compare la corrélation (au seuil de 1%) de chaque séquence avec la séquence correspondante calculée sur la chronologie maîtresse (moyenne de toutes les séries), mais également avec un décalage de (+1 à +10 ans) et (-1 à -10 ans). En l'absence d'erreurs, la corrélation la plus forte sera obtenue entre les deux mêmes séquences. En cas d'erreurs, la corrélation la plus élevée sera obtenue avec une date décalée. Les segments successifs sont décalés de 25 ans ce qui fait un recouvrement de 50% à chaque étape. Le premier segment commence avec la première date disponible et le dernier se termine par la dernière date.

Selon la taille du segment analysé, le niveau de la corrélation nécessaire pour être significatif au seuil de 1% varie :

Long. du seg.	Corrélation (1%)
10 ans	0.7155
15	0.5923
20	0.5155
25	0.4622
30	0.4226
35	0.3916
40	0.3665
50	0.3281
60	0.2997
70	0.2776
80	0.2597
90	0.2449
100	0.2324
120	0.2122

Si dans chaque intervalle, une forte proportion d'arbres qui constituent la série maîtresse est mal interdatée, la datation de cette série sera également erronée et la plupart des séries présentera des faibles corrélations pour cet intervalle. Des tests ont montré que la vérification de l'interdatation par ce programme est encore bonne même si plus de 50% des arbres présentent des erreurs (mais non systématiques pour un intervalle particulier).

2.3. SORTIE DU PROGRAMME COFECHA

L'exécution de COFECHA aboutit à la création d'un fichier [essaiCOF.out] que l'on ouvre avec le bloc notes (sous PC). C'est un fichier contenant la synthèse de l'analyse et des résultats. Ce fichier de sortie contient 7 parties :

PARTIE 1: Titre, options sélectionnées (9 au total), cernes absents par séries.

Par défaut, ce sont les options présentées dans la partie 2.2 qui sont prises en compte. On trouve également un bref résumé des différents paramètres. **Par exemple**, pour un fichier de 30 séries chronologiques présentant chacune des données sur la période 1952-1994, on aura :

** Intervalle de temps pour le série maîtresse datée	1952 à 1994	43 ans
** Intervalle de temps continu	1952 à 1994	43 ans
** Segment avec deux ou plus de séries	1952 à 1994	43 ans

```

*****
*C* Nbre de séries datées      30      *C*
*O* Série maîtresse 1952 1994 43 ans *O*
*F* Nbre total de cernes      1290    *F*
*E* Nbre total de cernes contrôlés 1290 *E*
*C* Intercorrélation des séries 0.529 *C*
*H* Sensibilité moyenne      0.203   *H*
*A* Segments avec problèmes  4       *A*
*** Long. Moyenne des séries  43.0   ***
*****
    
```

Exemple de fichier de sortie... en haut le début du fichier... en bas, la fin (copie d'écran)

```

HI13B3COF - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
Dendrochronology Program Library Run HI13B Program COF 11:06 Mon 05 Oct 2009 Page 1
PROGRAM COFECHA Version 6.02P 27308

QUALITY CONTROL AND DATING CHECK OF TREE-RING MEASUREMENTS
Title of run: hi13b3
File of DATED series: hi13b3
CONTENTS:
Part 1: Title page, options selected, summary, absent rings by series
Part 2: Histogram of time spans
Part 3: Master series with sample depth and absent rings by year
Part 4: Bar plot of Master dating series
Part 5: Correlation by segment of each series with Master
Part 6: Potential problems: low correlation, divergent year-to-year changes, absent rings, outliers
Part 7: Descriptive statistics

RUN CONTROL OPTIONS SELECTED VALUE
1 Cubic smoothing spline 50% wavelength cutoff for filtering 32 years
2 Segments examined are 50 years lagged successively by 25 years
3 Autoregressive model applied A Residuals are used in master dating series and testing
4 Series transformed to logarithms Y Each series log-transformed for master dating series and testing
5 CORRELATION is Pearson (parametric, quantitative)
Critical correlation, 99% confidence level .3281
6 Master dating series saved N
7 Ring measurements listed N
8 Parts printed 1234567
9 Absent rings are omitted from master series and segment correlations (Y)

Time span of Master dating series is 1910 to 2004 95 years
Continuous time span is 1910 to 2004 95 years
Portion with two or more series is 1910 to 2004 95 years

*****
*C* Number of dated series 24 *C*
*O* Master series 1910 2004 95 yrs *O*
*F* Total rings in all series 2242 *F*
*E* Total dated rings checked 2242 *E*
*C* Series intercorrelation .190 *C*
*H* Average mean sensitivity .256 *H*
*A* Segments, possible problems 66 *A*
*** Mean length of series 93.4 ***
*****

ABSENT RINGS listed by SERIES: (See Master Dating Series for absent rings listed by year)
No ring measurements of zero value
    
```

```

HI13B3COF - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
[C] Year-to-year changes diverging by over 4.0 std deviations:
1944 1945 4.2 SD

-----
a23 1910 to 2004 95 years Series 23
[B] Entire series, effect on correlation (.564) is:
Lower 1963 -.047 1967 -.018 1996 -.010 1972 -.010 Higher 1945 .111 1962 .022 1915 .015 1913 .013

-----
a24 1915 to 2004 90 years Series 24
[B] Entire series, effect on correlation (.616) is:
Lower 1975 -.040 1924 -.016 2002 -.014 1929 -.012 Higher 1945 .121 1962 .010 1921 .010 1915 .009

PART 7: DESCRIPTIVE STATISTICS: hi13b3 11:06 Mon 05 Oct 2009 Page 8

Seq Series Interval NO. NO. Corr //----- Unfiltered -----\\ //--- Filtered ----\\
years Segmt Flags with Mean Max Std Auto Mean Max Std Auto AR
msmt msmt dev corr value dev corr corr O
1 a1 1910 2004 95 4 2 .427 .80 1.38 .245 .546 .232 2.49 .446 -.042 1
2 a2 1910 2004 95 4 4 .009 .60 1.39 .205 .454 .288 2.65 .442 .056 2
3 a3 1910 2004 95 4 4 -.042 .36 .90 .156 .642 .245 2.82 .557 -.076 1
4 a4 1910 2004 95 4 4 -.013 .65 1.90 .331 .686 .305 2.78 .459 -.034 1
5 a5 1910 2004 95 4 4 .263 .78 1.31 .198 .467 .193 2.93 .526 -.014 1
6 a6 1910 2004 95 4 4 -.089 1.33 2.87 .621 .697 .277 2.87 .547 .012 2
7 a7 1910 2004 95 4 4 -.193 1.20 3.42 .604 .703 .357 2.66 .547 .038 2
8 a8 1910 2004 95 4 4 .005 .90 2.96 .656 .917 .237 2.74 .453 -.015 1
9 a9 1910 2004 95 4 3 .223 1.34 2.75 .556 .784 .225 2.66 .521 -.051 2
10 a10 1910 2004 95 4 2 .364 1.01 2.03 .447 .561 .320 2.70 .537 -.035 1
11 a11 1911 2004 94 4 4 .060 2.14 5.59 .937 .793 .224 2.48 .369 -.018 2
12 a12 1915 2004 90 4 4 .057 1.68 3.43 .720 .752 .249 2.37 .321 -.095 1
13 a13 1910 2004 95 4 4 -.240 1.59 3.83 .773 .788 .243 2.78 .503 -.045 1
14 a14 1916 2004 89 4 2 .255 1.73 4.84 .878 .718 .265 2.52 .377 -.022 2
15 a15 1910 2004 95 4 0 .486 1.54 3.53 .731 .667 .285 2.58 .597 .045 1
16 a16 1910 2004 95 4 4 -.079 1.08 2.11 .356 .299 .332 2.48 .376 -.017 1
17 a17 1910 2004 95 4 0 .556 1.35 2.94 .459 .398 .256 2.43 .363 -.033 2
18 a18 1915 2004 90 4 4 .163 1.27 2.74 .360 .580 .179 2.58 .417 .021 1
19 a19 1923 2004 82 4 2 .376 1.21 4.05 .587 .696 .257 2.64 .468 .020 1
20 a20 1910 2004 95 4 2 .496 1.34 2.89 .477 .591 .222 2.80 .352 .074 2
21 a21 1910 2004 95 4 3 .216 1.36 4.19 .703 .676 .282 2.70 .391 -.018 1
22 a22 1913 2004 92 4 2 .120 1.66 3.75 .479 .439 .200 2.80 .613 .068 1
23 a23 1910 2004 95 4 0 .564 1.42 3.12 .512 .693 .229 2.69 .429 .029 1
24 a24 1915 2004 90 4 0 .616 1.59 3.16 .540 .559 .225 2.53 .378 .032 1
Total or mean: 2242 96 66 .190 1.24 5.59 .520 .629 .256 2.93 .458 -.002

-- [ COFECHA HI13B3COF ] --
    
```

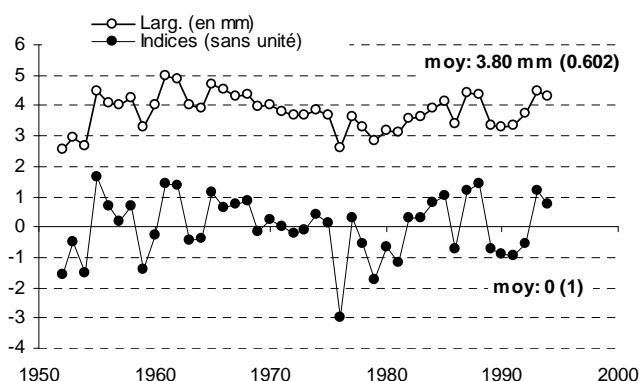
PARTIE 2: Histogrammes des intervalles de temps pris en compte pour chaque série

PARTIE 3: Indices de croissance standardisés de la chronologie maîtresse avec le nombre de données par date et le nombre de cernes manquants par année.

Les indices de croissance de la chronologie maîtresse sont présentés avec le nombre de cernes disponibles par année. L'organisation des données est la suivante (série complète 1952-1994) :

Year	Value	No Ab
1952	-1.545	30
1953	-0.504	30
1954	-1.524	30
1955	1.662	30
1956	0.666	30
1957	0.188	30
1958	0.714	30
1959	-1.414	30
1960	-0.272	30
1961	1.45	30
1962	1.339	30
...

On peut ainsi établir le graphique de la courbe standardisée (voir figure ci-dessous). La courbe obtenue sur les données brutes (en mm) est également présentée de façon à mieux visualiser les effets de la standardisation.



Pour la série maîtresse, la moyenne est égale à 0 et l'écart-type à 1.

PARTIE 4: Figure en squelette (Skeleton Plot) de la série maîtresse

La figure ci-dessous est équivalent au « skeleton plot », avec des barres d'autant plus grandes que les cernes sont larges. La longueur relative de chaque cerne est représentée par des barres avec un code alphabétique : les lettres en minuscule indique un cerne plus étroit que la moyenne locale ; les lettres en majuscule un cerne plus large. Le symbole @ indique des cernes dont la largeur est très proche de la moyenne. Pour chaque année, une lettre est affectée selon l'augmentation de l'écart par rapport à la moyenne : plus le rang de la lettre est élevé dans l'alphabet et plus l'écart avec la moyenne est grand (progression de ¼ à chaque fois). A = ¼ de déviation par rapport à la moyenne; B = 1/2 ; C = 3/4 ; D = écart doublé, etc. Par exemple, l'année 1976 présente un cerne 6 fois plus fin que la moyenne (lettre l en minuscule) ; l'année 1985 un cerne deux fois plus large. Ce graphique est une aide pour l'interdatation car il repère dates correspond à des croissances particulières.

1952f
 1953---b
 1954f
 1955-----G
 1956-----C
 1957----A
 1958-----C
 1959f
 1960----a
 1961-----F
 1962-----E
 1963---b
 1964---a
 1965-----E
 1966-----C
 1967-----C
 1968-----D
 1969----a
 1970-----A
 1971----@
 1972---a
 1973---@
 1974-----B
 1975----A
 1976l
 1977-----A
 1978---b
 1979g
 1980--c
 1981-e
 1982-----A
 1983-----A
 1984-----C
 1985-----D
 1986--c
 1987-----E
 1988-----F
 1989--c
 1990-d
 1991-d
 1992---b
 1993-----E
 1994-----C

PARTIE 5: Corrélation par segment de chaque séquence de chaque série avec la série maîtresse

Les résultats se présentent dans la forme ci-dessous.

Seq	Series	Time_span	Correl.
1	1	1952-1994	0.67
2	2	1952-1994	.28A
3	3	1952-1994	0.39
4	4	1952-1994	0.64
5	5	1952-1994	0.79
6	6	1952-1994	0.77
7	7	1952-1994	0.66
8	8	1952-1994	0.44
9	9	1952-1994	0.46
10	10	1952-1994	0.6
11	11	1952-1994	0.57
12	12	1952-1994	0.42
13	13	1952-1994	0.42
14	14	1952-1994	.23A
15	15	1952-1994	0.76
16	16	1952-1994	0.34
17	17	1952-1994	0.51
18	18	1952-1994	.29A
19	19	1952-1994	0.42
20	20	1952-1994	0.55
21	21	1952-1994	0.67
22	22	1952-1994	.32A
23	23	1952-1994	0.56
24	24	1952-1994	0.77
25	25	1952-1994	0.46
26	26	1952-1994	0.68
27	27	1952-1994	0.39
28	28	1952-1994	0.59
29	29	1952-1994	0.6
30	30	1952-1994	0.65

Av segment correlation 0.53

La comparaison des segments se fait sur une période de 50 ans. Or, dans l'exemple utilisé, les arbres sont âgés de 43 ans. Il n'y a donc qu'un segment de comparé par série. Dans un tel cas, il est bien sûr souhaitable de changer dans les options du programme l'intervalle de temps analyser (par exemple 30 ans au lieu de 50). Pour chaque segment, la corrélation avec le même segment sur la chronologie maîtresse est donnée. La lettre « **A** » est indiquée si la corrélation est inférieure à la valeur 0.3281

correspondant au seuil de 1% pour un test t univarié avec 48 ddl. La lettre « **B** » est indiquée si, pour le segment considéré, on observe une meilleure corrélation avec un autre segment de la chronologie maîtresse. Dans cet exemple, il y a donc 4 séries (2, 14, 18 et 32) qui présentent des corrélations inférieures au seuil de 1%. Ceci correspond à l'avant dernière ligne du résumé (partie 1 : segments avec problèmes = 4).

PARTIE 6: Problèmes potentiels : faible corrélation, divergence dans les variations inter-annuelles, cernes absents, etc.

C'est la **partie essentielle du programme** qui répertorie tous les problèmes potentiels dans chaque segment de chaque série.

[A] : Dans ce paragraphe, tous les segments (de chaque série) avec des problèmes éventuels sont présentés. Une ligne est affichée pour chaque segment qui présente des meilleures corrélations avec la série maîtresse dans le cas d'un décalage de -10 à +10 ans des dates. La corrélation actuelle correspond à la position « +0 ». La position « +1 ou -1 » correspond à un décalage d'une année (décalage positif ou négatif), etc. Si une plus forte corrélation est obtenue, alors la valeur est précisée (*) ainsi que la position de la corrélation la plus forte. Dans les segments considérés, l'interdatation peut donc être erronée. **Des erreurs de datation sont souvent observées dans le cas des faibles corrélations à la position « +0 » et des corrélations les plus fortes pour les faibles décalages (-2, -1, +1, ou +2 ans).** Si des problèmes d'interdatation concernent plusieurs cernes, alors deux ou plusieurs segments successifs seront mieux corrélés avec la chronologie maîtresse pour une position différente de « +0 ».

[B] : Pour la série entière (c'est-à-dire pour tous les segments) et les segments listés en [A] et contenant des erreurs éventuelles, les cernes dont la présence modifie le plus la corrélation (diminution ou augmentation) avec la série maîtresse sont présentés. Chaque cerne est identifié par sa date et par son indice de croissance.

[C] : Les variations interannuelles d'indices pour deux cernes successifs sont présentées quand, la différence de « largeur » pour les deux années est au moins de 4 écart-types par rapport à la variation interannuelle observée pour la même paire d'années dans les autres séries. Cette information peut permettre une localisation précise des erreurs.

[D] : Listes des cernes manquants (valeur zéro de l'indice)

[E] : Ce paragraphe liste les cernes présentant des indices de croissance particuliers : divergence de +3 (cerne très large) ou -4.5 (cerne très fin) écart-types par rapport à la moyenne observée des autres séries pour cette date. Ces années particulières peuvent être des années caractéristiques utilisables pour la datation ou des erreurs pour la série considérée.

A la fin de l'analyse et des choix des corrections, le dossier corrigé doit être de nouveau traité par le programme COFECHA afin de vérifier la justesse des modifications apportées.

PARTIE 7: Statistiques descriptives.

Séq	Series	Inter.	Nb années	Nb seg.	Nb probl.	Correl. avec CM	Series brutes (en mm)				Series filtrées				
							Moy	Max	std	AC	MS	Max	std	AC	AR
1	1	1952-1994	43	1	0	0.667	0.41	0.61	0.096	0.633	0.163	2.68	0.728	-0.037	1
2	2	1952-1994	43	1	1	0.276	0.32	0.45	0.077	0.506	0.179	2.56	0.537	0.037	1
3	3	1952-1994	43	1	0	0.392	0.41	0.64	0.122	0.576	0.199	2.41	0.386	0.04	2
4	4	1952-1994	43	1	0	0.636	0.41	0.62	0.131	0.697	0.201	2.6	0.551	-0.03	1
5	5	1952-1994	43	1	0	0.791	0.43	0.65	0.121	0.784	0.149	2.48	0.423	0.017	1
6	6	1952-1994	43	1	0	0.766	0.45	0.61	0.095	0.389	0.185	2.58	0.539	-0.044	1
7	7	1952-1994	43	1	0	0.658	0.44	0.73	0.138	0.757	0.175	2.64	0.622	-0.066	1
8	8	1952-1994	43	1	0	0.439	0.36	0.53	0.075	0.422	0.175	2.55	0.56	-0.065	1
9	9	1952-1994	43	1	0	0.461	0.45	0.69	0.109	0.643	0.169	2.71	0.612	0.196	1
10	10	1952-1994	43	1	0	0.601	0.29	0.71	0.217	0.908	0.345	2.43	0.502	0.063	1
11	11	1952-1994	43	1	0	0.569	0.36	0.58	0.112	0.776	0.187	2.33	0.445	-0.089	1
12	12	1952-1994	43	1	0	0.422	0.5	0.76	0.155	0.677	0.206	2.37	0.424	0.106	1
13	13	1952-1994	43	1	0	0.415	0.49	0.84	0.159	0.633	0.199	2.76	0.678	0.033	1
14	14	1952-1994	43	1	1	0.225	0.37	0.67	0.148	0.731	0.262	2.3	0.359	0.009	2
15	15	1952-1994	43	1	0	0.76	0.4	0.75	0.134	0.645	0.211	2.93	0.698	-0.128	1
16	16	1952-1994	43	1	0	0.34	0.48	0.72	0.168	0.739	0.237	2.62	0.589	0.171	2
17	17	1952-1994	43	1	0	0.507	0.46	0.69	0.122	0.605	0.188	2.59	0.488	-0.077	1
18	18	1952-1994	43	1	1	0.293	0.28	0.53	0.113	0.835	0.199	2.57	0.481	0.034	1
19	19	1952-1994	43	1	0	0.416	0.38	0.76	0.196	0.895	0.209	2.77	0.625	0.199	1
20	20	1952-1994	43	1	0	0.546	0.36	0.59	0.108	0.521	0.263	2.5	0.485	-0.086	1
21	21	1952-1994	43	1	0	0.669	0.37	0.57	0.08	0.31	0.199	2.38	0.382	-0.025	1
22	22	1952-1994	43	1	1	0.325	0.32	0.53	0.092	0.675	0.178	2.77	0.548	0.057	1
23	23	1952-1994	43	1	0	0.562	0.31	0.63	0.099	0.593	0.24	2.72	0.567	0.08	1
24	24	1952-1994	43	1	0	0.768	0.43	0.75	0.12	0.715	0.179	2.46	0.423	0.085	1
25	25	1952-1994	43	1	0	0.455	0.42	0.66	0.141	0.754	0.177	2.82	0.735	0.07	2
26	26	1952-1994	43	1	0	0.677	0.44	0.89	0.196	0.859	0.191	2.56	0.581	0.032	1
27	27	1952-1994	43	1	0	0.386	0.24	0.43	0.059	0.635	0.166	2.49	0.662	0.111	1
28	28	1952-1994	43	1	0	0.591	0.25	0.44	0.087	0.753	0.215	2.42	0.465	0.028	1
29	29	1952-1994	43	1	0	0.604	0.2	0.43	0.084	0.712	0.262	2.66	0.539	-0.002	2
30	30	1952-1994	43	1	0	0.647	0.38	0.57	0.089	0.573	0.18	2.41	0.42	-0.007	1
----	----	-----	----	----	----	-----	----	----	-----	----	----	----	----	----	----
Total or mean:			1290	30	4	0.529	0.38	0.89	0.121	0.665	0.203	2.93	0.535	0.024	

Le tableau de synthèse se présente comme ci-dessus (pour l'exemple considéré). Colonnes 1 à 6 : caractéristiques des séries. Colonne n°7 : corrélation entre chaque série et la chronologie maîtresse (CM). Colonnes 8 à 12 :

caractéristiques des séries brutes : largeur moyenne des cernes (ici en 1/10 de mm => 0.41 = 4.1 mm), valeur maximale ; écart-type, AC = autocorrélation (indique la dépendance du cerne n+1 par rapport au cerne n) ; MS = sensibilité moyenne. Colonnes 13 à 16 : caractéristiques des séries filtrées : indice max, écart-type, autocorrélation AR et niveau du modèle auto-régressif (AR) appliqué à chaque série.

Après la détermination des erreurs, les corrections peuvent être réalisées directement en utilisant le programme **EDRM.exe**. Si les corrections sont trop nombreuses, il est toutefois recommandé d'utiliser plutôt un éditeur de texte. En éditant une série, on peut éliminer, ajouter ou diviser des données, etc.

3. STANDARDISATION DES SÉRIES (PROG. ARSTAN) (Version 6.02P)

- Cook, E.R. 1985. *A Time Series Approach to Tree-Ring Standardization.*, Unpublished PhD Dissertation. University of Arizona, Tucson, AZ, USA
- Cook, E.R. and K. Peters. 1981. *The Smoothing Spline: A New Approach to Standardizing Forest Interior Tree-Ring Widths Series for Dendroclimatic Studies.* *Tree-Ring Bulletin* 41:45-53.

Le programme ARSTAN permet la standardisation des données brutes. La finalité est d'obtenir des séries d'indices stationnaires dans lesquelles seul le signal haute fréquence est conservé. Ces séries stationnaires sont alors dégagées des effets des tendances liées à l'âge, à la géométrie des troncs, ou encore des perturbations locales entraînant des variations plus ou moins fortes et durables des accroissements. **Ces séries d'indices (concept de « *percentage departures* » défini par Schulman 1945) ont pour moyenne 1 et une variance relativement constante.** Quand la standardisation est correcte, la corrélation entre les indices moyens et les écart-types correspondants est donc très faible voire nulle. Ces indices I_t sont généralement obtenus en divisant chaque valeur mesurée (R_t) par la valeur prédite par l'ajustement (G_t). Le programme contient de très nombreuses options (17 principales modifiables) de façon à pouvoir ajuster l'analyse à tout type de données.

Au début de l'exécution, le programme demande un nom de « travail » de cinq lettres ou de chiffres au maximum (exemple : het). Tous les fichiers de sortie auront ce nom. Par défaut, le nom est « z ». Après, le programme demande le nom du fichier contenant les données à traiter (80 caractères au maximum). Il doit être au bon format [exemple : het.rwm] (fichier obtenu après utilisation du programme CASE).

Le programme ARSTAN produit trois chronologies maîtresse à partir d'un jeu de données. Les grandes étapes du programme sont les suivantes :

- A. Double ajustement de chacune des séries élémentaires brutes par des fonctions exponentielle, polynomiale, etc.

- B. Calcul des indices de croissance (division ou soustraction des valeurs observées et des valeurs prédites). Le programme calcule alors une chronologie maîtresse (« **standard chronology** » ; STD version) en faisant la moyenne par date des indices disponibles (detrended ring-index series averaged into « standard » chronology) ;
- C. Modélisation des séries d'indices par des processus autorégressifs afin d'éliminer l'autocorrélation résiduelle. (processus propre à chaque série). Obtention de nouvelles séries d'indices dégagés des bruits blancs résiduels (« white noise » residual ring-index series). Si le double ajustement est correct, la nouvelle standardisation par ces processus autorégressifs ne doit pas changer fondamentalement la chronologie maîtresse obtenue. Le programme calcule une chronologie de ces résidus (« **residual chronology** » ; RES version) ;
- D. Un nouveau modèle autorégressif est appliqué sur les séries de résidus afin d'éliminer de la chronologie maîtresse toute persistance d'un signal non stationnaire (processus AR identique pour toutes les séries de résidus). Le programme calcule une nouvelle chronologie à partir de ces séries d'indices (« **ARSTAN chronology** » ; ARS version). Si on ne choisit pas l'option processus autorégressif, cette chronologie n'est pas calculée.

Les paragraphes suivants présentent les options du programme.

[1] : Information sur les séries contenues dans le fichier : première et dernière année, longueur des séries (purement informatif).

```

C:\ J:\Dendro\ARSTAN.EXE
COMMON INTERVAL, Optimum 1940 to 1994      55 years,  30 series,  1650 rings

TITLE FOR THIS RUN => ep39acc

                A R S T A N
Options which may be to modified:                Current values
1  INFORMATION on series in file
2  DETRENDING method  (Double detrending)        1 128 50.0%
4  SPECIAL TREATMENT, selected series           0
5  STABILIZE VARIANCE, LOG TRANS, NORMALIZE     N  0  N  N
6  Compute indices by Division, Subtraction, Trend in variance  D
7  PRINT PLOTS of 10-year means of series       N
8  LIST values of series                        N
9  SAVE individual series in format              N
10 COLUMNS of ident indicating TREE or TREE MASK 1 to 5
11 TREE SUMMARIES produced, format              N -
12 AUTOREGRESSIVE MODELING; method              E
13 CHRONOLOGY COMPUTATION, FORMAT, ID           R  C  EP39A
14 YEAR-BY-YEAR LIST of chronology              Y
15 COMMON INTERVAL analysis                     1940 1994 0
16 RED NOISE fraction common interval analysis  N
17 Number of EIGENVECTORS & AMPS to save        8

<<CR> to execute Program ARSTAN>  Option number =>

```

```

C:\ J:\Dendro\ARSTAN.EXE
5  STABILIZE VARIANCE, LOG TRANS, NORMALIZE     N  0  N  N
6  Compute indices by Division, Subtraction, Trend in variance  D
7  PRINT PLOTS of 10-year means of series       N
8  LIST values of series                        N
9  SAVE individual series in format              N
10 COLUMNS of ident indicating TREE or TREE MASK 1 to 5
11 TREE SUMMARIES produced, format              N -
12 AUTOREGRESSIVE MODELING; method              E
13 CHRONOLOGY COMPUTATION, FORMAT, ID           R  C  EP39A
14 YEAR-BY-YEAR LIST of chronology              Y
15 COMMON INTERVAL analysis                     1940 1994 0
16 RED NOISE fraction common interval analysis  N
17 Number of EIGENVECTORS & AMPS to save        8

<<CR> to execute Program ARSTAN>  Option number => 2

First DETRENDING CURVE option L:
L = 1  Negative exponential curve or linear regression
L = 2  Neg expo, linear regr. of neg. slope or horiz. line
L = 3  Linear regression (trend line)
L = 4  Horizontal line through the mean (no detrending)
L > 4  Cubic smoothing spline of selected frequency response
L <-1  Spline of 50% frequency response of L percent of series length
L =-1  No line fit; chronology is arithmetic mean of series
L = 0  Statistics only: No detrending, no chronology
First detrending L =>

```

[2] : Choix des méthodes d'ajustement (double ajustement pour chaque série élémentaire). La standardisation consiste à éliminer les tendances dans les séries (« detrending »). Elle nécessite tout d'abord le choix d'une méthode d'ajustement des données élémentaires (but de l'option [2]) et le choix d'une méthode de calcul des indices (voir [6]). Par défaut, on a les valeurs 1 & 128 c'est-à-dire que l'on a, pour chaque série individuelle, un ajustement par une fonction exponentielle négative sur 128 ans. (*Remarque : le mot anglais spline signifie « latte » et par extension « morceaux ». Une courbe spline est une courbe qui permet des ajustements par morceaux*). La procédure classique correspond à un double ajustement. Les mêmes 8 options sont possibles pour chacun des deux ajustements : **options [L]**.

- L=1 : ajustement par une fonction exponentielle négative (« *negative exponential curve* ») ou par une droite (« *linear regression line* ») si l'ajustement précédent n'est pas possible. L'ajustement exponentiel négatif est de la forme : $Curve Y = A * EXP(-B*T) + C*T + D$. Les coefficients A, B, C et D sont ajustés pour chaque série élémentaire Y. B= pente ; T = la date. Ce type d'ajustement est très souvent utilisé car il est conforme à l'hypothèse de la diminution des largeurs de cernes due à l'effet de l'âge et de l'augmentation du diamètre du tronc (effet géométrique). Il est à noter que l'ajustement est souvent meilleur au début (jeunes cernes et dates anciennes) qu'à la fin de la série (vieux cernes et dates récentes) ;
- L=2 : ajustement par une fonction exponentielle négative ou par une droite avec une pente négative ou pas d'ajustement ;
- L=3 : régression linéaire (droite) ;
- L=4 : pas d'ajustement (droite horizontale sur la moyenne) ;
- L > 4 : ajustement polynomial du troisième degré par morceaux (« *cubic smoothing spline* »). Cette méthode permet un ajustement grâce à une succession de polynômes de troisième degré. Il se fait en un seul passage et n'est donc pas un

processus itératif. On peut choisir la somme de la variance qui peut être éliminée pour une fréquence particulière. Pour éliminer le signal basse fréquence, on choisira une très longue fenêtre d'analyse (« long wavelenghts »). Pour éliminer le signal moyenne (et haute) fréquence, on choisira une fenêtre d'analyse réduite (« short wavelenghts »). La taille de la fenêtre peut être ajustée à l'infini. Dans cette option, le programme va éliminer 50% de la variance pour une période de temps (fréquence) fixé de L années (spline rigidity). Si on fixe un nombre d'années pour la fenêtre d'ajustement, le programme sort un listing de la distribution de la variance pour plusieurs fenêtres. Par exemple, pour une fenêtre de 20 ans avec 50% de variance, on a le résultat suivant. Ainsi, si on a une fenêtre de 50 ans, il ne reste que 2.5% de la variance dans les cernes.

Wavelenght	Variance contenue dans les cernes
6.34	99%
8.01	97.5%
9.59	95%
11.54	90%
14.14	80%
15.19	75%
16.81	66.7%
20	50%
26.32	25%
28.29	20%
49.98	2.5%

- L < -1 : ajustement par morceaux avec une rigidité égale au pourcentage fixé par la longueur de la série. Par exemple, si la valeur est -75, la fenêtre pour laquelle il y a élimination de 50% du signal est égale à 75% de la longueur de chaque série ;
- L = -1 : aucune courbe d'ajustement ou division par la moyenne. La chronologie est une moyenne arithmétique des séries ;
- L = 0 : statistiques seules ; pas d'ajustement, pas de chronologie.

La procédure classique consiste à choisir d'abord l'option L=1 puis L >4. Pour chaque série élémentaire, les indices obtenus par l'ajustement exponentiel ou la droite (L=1) sont de nouveau ajustés par des courbes polynomiales d'ordre 3 à fenêtre mobile de x années (L >4). *In fine*, on obtient pour chaque série, une chronologie d'indices dans laquelle seul le signal haute fréquence est conservé (voir partie fichiers de sortie du programme ARSTAN pour plus de détails).

Avant l'ajustement, les séries peuvent être transformées en log par la formule suivante $\log(x+x_0)$. Le facteur x_0 qui est égal à 1/6 de la valeur moyenne de la série permet d'éviter les valeurs nulles ($\log = \text{infini}$ pour zéro). Après cette transformation en log, on obtient une nouvelle séries de données positives ou négatives.

Les séries peuvent être normalisées après ajustement. La variance de toutes les séries peut être fixée à 1 de façon à ce que le poids de chaque série soit le même dans la chronologie maîtresse.

La rigidité de la fenêtre d'ajustement peut être spécifiée. Si la courbe spécifiée pour le premier ajustement ne peut pas être ajustée, la rigidité pour la fenêtre d'ajustement pour la seconde étape est un pourcentage de celle indiquée pour celle-ci. Par exemple, si le premier ajustement est 1 c'est-à-dire que les séries sont ajustées par une courbe exponentielle négative, le second ajustement est -100 (ajustement par morceaux de rigidité égale à la longueur de la série), et la rigidité relative est 67. La première courbe est une exponentielle négative et la seconde un ajustement par morceau égal à la longueur de la série $N * 1.0$. Si l'exponentielle négative ne peut pas être ajustée, le premier ajustement est une droite et le second un ajustement par morceau de rigidité $N * 1 * 0.67$

[3] : Visualisation des étapes intermédiaires d'ajustement des données (option inactivée en routine).

Cette option permet de visualiser les courbes d'ajustement de chaque série et d'essayer différentes méthodes. Les statistiques des séries ajustées sont présentées. On peut quitter la

procédure à tout moment. La procédure continuera automatiquement en utilisant les options sélectionnées dans le menu principal.

[4] : Traitement spécifique de certaines séries (en routine : aucune série traitée à part)

Cette option permet de traiter des cas particuliers.

[5] : Stabilisation de la variance (aucune stabilisation en routine)

Pour certains arbres, certaines conditions, certaines espèces, etc., la variance des accroissements change fortement au cours du temps. Dans de tels cas, il est souhaitable de la stabiliser. Le programme permet de stabiliser la variance pour chaque série ajustée, pour le chronologie maîtresse ou pour les deux. Les options inclues celles des choix des méthodes d'ajustement [2] ainsi qu'une transformation en racines carrées ou une transformation en log avec ajout d'une constante pour éviter les valeurs nulles (1/6 de la moyenne de la série). Les auteurs des programmes recommandent l'utilisation d'un ajustement polynomiale du troisième degré si la variance doit être stabilisée.

[6] : Calcul des indices de croissance pour chaque série ajustée

Après les ajustements, deux méthodes de calcul des indices de croissance sont disponibles

- Division (rapport) : les données mesurées sont divisées par les données des courbes ajustées (valeurs prédites) afin d'obtenir une série d'indices stationnaires de moyenne 1 (en routine)
- Soustraction (résidus) : mesures – valeurs ajustées

[7] : Listing des moyennes décennales des différents indices pour chaque série (le choix de l'intervalle de calcul est possible)

[8] : Liste des valeurs des séries individuelles

[9] : Sauvegarde des séries individuelles dans le format brut (séries mesurées) ou dans le format CASE (rwm)

[10] : Colonnes contenant les identificateurs des arbres dans les séries. Par exemple, si une

série se nomme ABC08A, ABC (3 colonnes) = code du site ; 08 (1 colonne) = nom de l'arbre ; A (1 colonne) = nom du rayon mesuré dans l'arbre.

[11] : Résumé des chronologies pour chaque arbre

[12] : Choix du niveau de la modélisation des processus autorégressifs

Afin d'éliminer les bruits qui peuvent être encore contenus dans les séries d'indices issus de la standardisation précédente, chacune des séries est de nouveau standardisée à l'aide de processus autorégressif. L'ordre des processus autorégressif peut être indique pour toutes les séries ou être spécifique à chacune d'elle (élimination du bruit balnc) :

- S : même ordre pour toutes les séries (ordre 1, 2, 3, etc.). Modèle unique en considérant toutes les séries
- E : ordre spécifique à chaque série en se fondant sur le critère du plus petit AIC (en routine)
- U : l'opérateur choisit l'ordre à appliquer à chaque série sans prendre en compte le critère AIC
- N : aucun processus autorégressif appliqué

Le choix de l'ordre du processus autorégressif retenu est fondé sur la sélection du coefficient avec le premier plus petit AIC (Akaike Information Criterion). Pour un processus autorégressif (AR) avec une statistique gaussienne, AIC (p) est définie comme :

$$AIC(p) = N \ln(s^2(p)) + 2p$$

Où N est le nombre d'échantillons et $s^2(p)$ est la variance estimée du bruit blanc (i.e. erreur de prédiction), une fonction décroissante de p. Le terme 2p est une pénalité pour l'utilisation de coefficients AR extrêmes qui ne réduisent pas fortement la prédiction de l'erreur. Le AIC minimum est seulement un des critères pour la sélection du rang du processus AR. Un autre critère est la prédiction de l'erreur finale (FPE (p)) qui sélectionne l'ordre du modèle qui minimise la fonction FPE(p) définie comme :

$$FPE(p) = s^2(p) \times (N+p+1)/(N-p-1)$$

Le terme $(N+p+1)/(N-p-1)$ augmente avec l'ordre p et représente les erreurs dans les estimations des paramètres AR.

[13] : Calcul de la chronologie maîtresse

Le calcul de la chronologie maîtresse peut se faire selon deux méthodes (Cook 1985):

- Moyenne robuste à double pondération (« Biweight robust Mean ») (en routine). Quand on suspecte la présence de données particulières dans les séries (erreurs, valeurs extrêmes, etc.), il est conseillé de calculer ce type de moyenne plutôt que la moyenne arithmétique classique. Cette moyenne admet la probabilité de présence d'un bruit résiduel dans les données (perturbations endogènes avec des effets à plus ou moins long terme) non distribué normalement. Cette moyenne est calculée pour chaque année t par itération avec la formule ci-dessous. m = nombre d'indices disponibles pour l'année t ; I_t = valeur de l'indice ; c = constante dont la valeur est souvent fixée à 6 ou 9. Elle fixe le niveau à partir duquel on attribue la valeur zéro à une donnée particulière. S_t^* correspond à la déviation médiane absolue (MAD).

$$\bar{I}_t^* = \sum_{j=1}^m w_j I_t$$

$$\text{avec } w_t = \left[1 - \left(\frac{I_t - \bar{I}_t^*}{c S_t^*} \right)^2 \right]^2$$

$$\text{quand } \left(\frac{I_t - \bar{I}_t^*}{c S_t^*} \right)^2 < 1$$

$$\text{et } S_t^* = \text{mediane} \left\{ \left| I_t - \bar{I}_t^* \right| \right\}$$

- Moyenne arithmétique : pour chaque date, somme des indices divisée par le nombre de cernes disponibles

$$\bar{I}_t = \sum_{j=1}^m I_t / m$$

Dans le fichier de sortie hetars.out, on donne la valeur qu'il faut ajouter pour avoir une moyenne exactement à 1. On trouve également une comparaison des deux méthodes de calcul pour les chronologies maîtresse. Dans l'exemple considéré, l'erreur moyenne de variance est réduite de 15.819% en utilisant la moyenne robuste à double pondération au lieu de la simple moyenne arithmétique pour la chronologie STD (14.033% pour la chronologie RES).

[14] : liste des indices de la chronologie par année avec les statistiques sur les indices

[15] : Intervalle commun pour l'analyse de la fraction du « bruit-rouge (red-noise) des données (différence entre les séries ajustées (detrended series) et les résidus des séries (residual series)).

[16] : Nombre de valeurs propres conservées et amplitude prise en compte (en routine 6).

Fichiers de sortie du programme ARSTAN

Selon le choix des options, le programme crée de **10 à 20 fichiers de sortie**. Les noms des fichiers sont de la forme : P04CCARS.xxx = les trois premières lettres P04CC correspondent au nom du fichier de travail choisi; les trois lettres suivantes ARS correspondent au nom du programme ARSTAN; les xxx indiquent l'extension.

- **P04CCARS.OUT** : listing des résultats. Ce fichier s'ouvre avec un éditeur de texte (wordpad, notepad, etc.). Il contient le résumé de toutes les options choisies et de tous les résultats. C'est le **fichier de base** à consulter après avoir fait tourner le programme.

Ci-dessous la première fenêtre du fichier

```

P04CCARS - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
Dendrochronology Program Library Run P04CC Program ARS 11:47 Thu 27 Feb 2008 Page 1
PROGRAM ARSTAN Version 6.02P 26723
-----
Title of run: p04cc
Data file: p04cc
options specified for this run Selected values
  2 Detrending method 2 5 50.0%
    The selected cubic smoothing spline will preserve 50.00% of the variance
      contained in the measurement series at a wavelength of 5.00 years.
    This is 7.35% of mean series length.
    Alternate spline, relative rigidity 67%
    Spline, minimum rigidity 5
  4 Special treatment, selected series 0
  5 Stabilize variance N 0
    Log-transform measurement series N
    Normalize detrended series N
  6 Indices computed by division, subtraction, or
    lower Trend in variance D
  7 Print plots of 10-year means of series N
  8 List values of series N
  9 Save individual series in format N
 10 Columns in ident indicating tree 1 to 5
 11 Tree summaries produced N - format
 12 Autoregressive modeling method E
    All series used in AR modeling
    Force rewhitening of Residual chronology 0 order
 13 Chronology computation R Format: C Ident: P04CC
 14 Year-by-year list of chronology Y
==> Time span of data 1878 to 1994 117 years, 30 series, 2042 rings
    Mean length of series is 68.07 years.
 15 Common interval analysis 0
    Common interval, optimum 1943 to 1994 52 years, 29 series, 1508 rings
    Common interval adjusted for order of pooled AR model
 16 Common interval analysis of red-noise fraction N
 17 Number of eigenvectors & amplitudes to save 8

Effect of options selected
First detrending: Neg exp/Regr <0/Mean
(The asymptote of an exponential curve is allowed to be negative.)
Second detrending: spline 5 years

Percent of variance in index series with 50.00% of variance at wavelength of 5.00 years
wavelength 1.58 2.00 2.40 2.88 3.53 3.80 4.20 5.00 5.95 6.58 7.07 8.66 10.44 12.50 15.77
variance 99.0% 97.5% 95.0% 90.0% 80.0% 75.0% 66.7% 50.0% 33.3% 25.0% 20.0% 10.0% 5.0% 2.5% 1.0%

Alternate spline for second detrending: 67% of selected spline
Minimum spline rigidity: 5 years
Indices computed as Ratio: Measurement divided by Curve
    
```

P04CCARS - Bloc notes

Fichier Edition Format Affichage ?

0 detrended series contain 0 index values over 3.0

0 STATISTICS of TREE-RING MEASUREMENTS 11:47 Thu 27 Feb 2008 Page 2

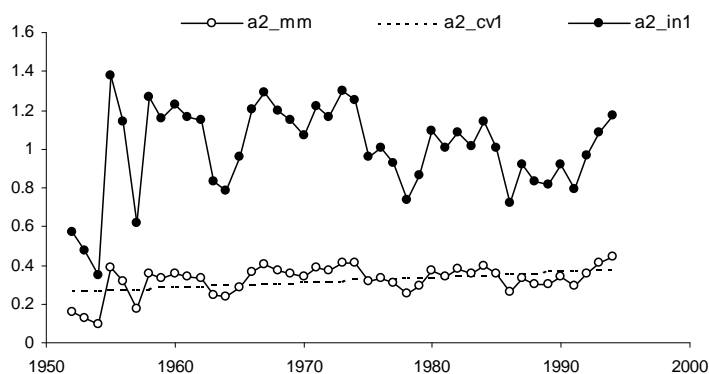
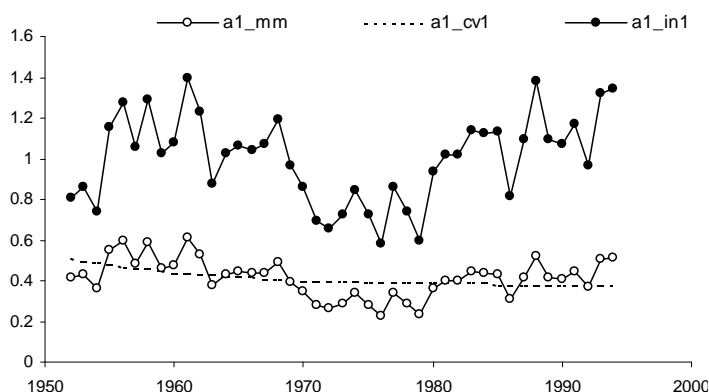
Seq	Series	Interval	Years	Mean	Median	Mean sens	Std dev	Skew-ness	Kurtosis	Trend var %	Partial ord 1	autocorr ord 2	ord 3	L-Box Prob
1	a1	1938 1994	57	2.486	2.310	.170	1.134	1.187	.975	-.9614	.81	.07	.09	.000
2	a2	1926 1994	69	2.422	2.050	.182	1.196	.970	.640	-2.0783	.86	-.02	.09	.000
3	a3	1913 1994	82	2.517	2.345	.149	.973	.852	.238	.0945	.84	.06	.07	.000
4	a4	1928 1994	67	2.176	1.970	.148	.782	.936	.015	-.9046	.80	.34	-.03	.000
5	a5	1934 1994	61	3.063	2.940	.152	.993	.689	-.130	-.8538	.79	.14	.05	.000
6	a6	1936 1994	59	2.577	1.840	.158	1.295	.854	-.683	-1.3992	.89	.07	.24	.000
7	a7	1938 1994	57	2.271	1.750	.195	1.446	.758	-.694	-1.1360	.88	.44	-.06	.000
8	a8	1945 1994	50	2.372	2.110	.225	1.234	2.156	5.665	-1.4547	.78	-.01	.02	.000
9	a9	1940 1994	55	2.181	1.540	.176	1.530	1.608	1.077	-2.3144	.92	-.02	.27	.000
10	a10	1901 1994	94	1.272	1.010	.219	.928	1.119	.650	-.3680	.91	.17	.16	.000
11	a11	1913 1994	82	1.848	1.165	.187	1.385	1.240	.273	-.4260	.94	.14	-.03	.000
12	a12	1932 1994	63	2.275	1.840	.126	1.176	1.391	1.378	-1.2605	.89	.02	.07	.000
13	a13	1940 1994	55	2.653	1.910	.162	1.570	1.579	1.381	-3.2252	.93	-.06	-.08	.000
14	a14	1932 1994	63	3.146	2.450	.156	1.623	1.069	-.107	-1.6858	.92	.14	-.26	.000
15	a15	1907 1994	88	2.041	1.935	.186	.801	.508	-.554	-.3468	.80	.28	.16	.000
16	a16	1942 1994	53	2.336	2.070	.224	1.307	.738	-.333	-1.7804	.88	-.18	.01	.000
17	a17	1931 1994	64	2.392	2.190	.196	.917	.849	.206	-1.1897	.82	.12	-.10	.000
18	a18	1909 1994	86	2.119	1.560	.249	1.420	1.518	1.231	-.9311	.93	.09	-.03	.000
19	a19	1930 1994	65	2.565	2.440	.169	.905	.561	-.224	-.5684	.77	.11	.06	.000
20	a20	1895 1994	100	1.582	1.360	.226	1.111	1.343	1.606	.3497	.88	-.02	.10	.000
21	a21	1933 1994	62	2.591	2.470	.199	.906	.814	-.098	-.9453	.78	.30	.05	.000
22	a22	1926 1994	69	2.478	2.210	.191	1.315	1.526	1.880	-.8838	.89	.02	.05	.000
23	a23	1912 1994	83	2.740	2.780	.224	1.550	.074	-.811	-1.8860	.90	.09	.30	.000
24	a24	1938 1994	57	2.830	2.500	.143	1.047	.755	-.640	-.9776	.83	.21	.20	.000
25	a25	1942 1994	53	2.982	2.960	.177	1.004	.409	.018	-.2293	.74	.09	.26	.000
26	a26	1935 1994	60	2.612	2.305	.162	1.320	1.198	.266	-1.4830	.89	.22	-.09	.000
27	a27	1931 1994	64	1.857	1.450	.169	1.230	1.458	.916	-1.7292	.92	.18	-.27	.000
28	a28	1878 1994	117	1.513	1.060	.256	1.228	1.512	1.347	-.3226	.85	.14	.04	.000
29	a29	1940 1994	55	3.055	2.920	.156	1.035	.219	-1.074	-.1054	.85	.26	-.17	.000
30	a30	1943 1994	52	2.893	2.650	.136	1.047	1.232	1.163	-.8419	.75	.18	.06	.000
30	Series means		68.1	2.395	2.070	.182	1.180	1.037	.526	-1.0615	.85	.12	.04	.000

0 STATISTICS of DETRENDED SERIES 11:47 Thu 27 Feb 2008 Page 3

Seq	Series	Interval	Years	Mean	Median	Mean sens	Std dev	Skew-ness	Kurtosis	Trend var %	Partial ord 1	autocorr ord 2	ord 3	L-Box Prob	Detrending
1	a1	1938 1994	57	.997	1.003	.143	.103	-.232	.563	.0102	-.58	-.41	-.48	.009	NExpD/S 5v50%D
2	a2	1926 1994	69	.997	.999	.140	.102	-.506	.583	.0265	-.34	-.56	-.56	.002	Regr-D/S 5v50%D
3	a3	1913 1994	82	.997	.996	.100	.077	.258	.279	-.0567	-.37	-.49	-.43	.001	Regr-D/S 5v50%D
4	a4	1928 1994	67	.998	1.000	.125	.085	-.312	.061	.0044	-.59	-.41	-.46	.000	NExpD/S 5v50%D
5	a5	1934 1994	61	.997	1.015	.118	.083	-.449	-.194	-.0182	-.40	-.54	-.22	.000	NExpD/S 5v50%D
6	a6	1936 1994	59	.998	1.006	.127	.090	-.187	-.126	.0794	-.55	-.69	-.29	.000	NExpD/S 5v50%D
7	a7	1938 1994	57	.997	.996	.163	.112	-.254	-.205	.0706	-.63	-.51	-.45	.000	NExpD/S 5v50%D

La seconde fenêtre correspond au résumé des statistiques sur les données de base. On retrouve les intervalles des séries chronologiques, les largeurs moyennes et médianes, la sensibilité moyenne, l'autocorrélation... Les fenêtres suivantes contiennent les présentations détaillées des différents traitements effectués. Les données brutes de base sont dans le fichier : **P04CCARS.MSM** .

- **P04CCARS.CV1** : Ce fichier contient les valeurs prédites par le premier ajustement des données brutes : ajustement par une courbe exponentielle ou par une droite (exemples ci-dessous pour 2 arbres ; data brutes en mm ronds blancs ; ajustements = pointillés). Le type d'ajustement est récapitulé dans le fichier **P04CCARS.out** (copie d'écran ci-dessous)
- **P04CCARS.IN1** : Ce fichier contient les indices issus du premier ajustement (CV1) : rapport des valeurs observées sur les valeurs prédites (ronds noirs). La moyenne des indices est 1.



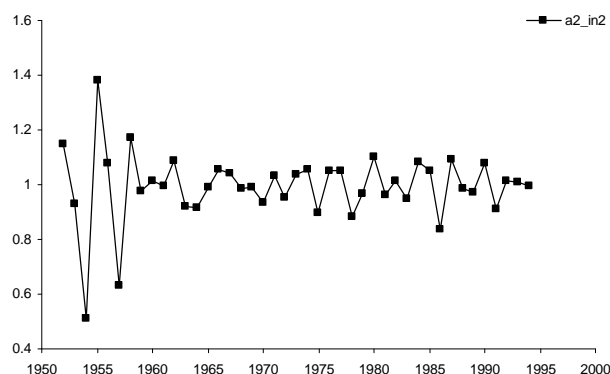
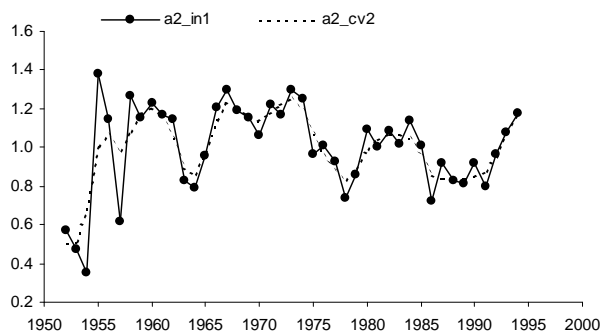
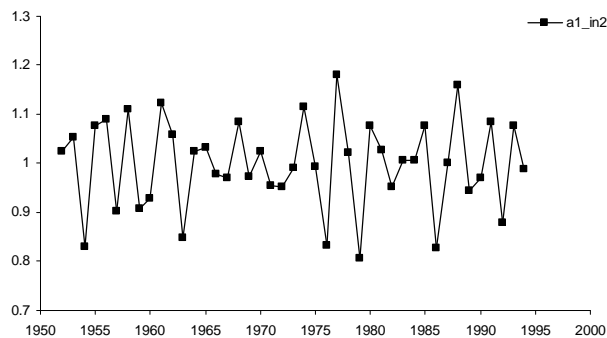
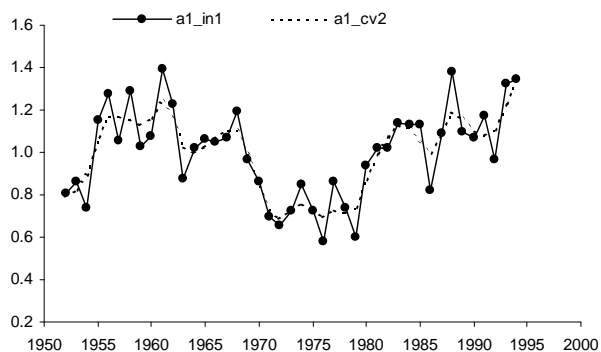
P04CCARS - Bloc-notes

Fichier Edition Format Affichage ?

Curve $Y = A * \text{EXP}(-B*T) + C*T + D$

Curve	Type	A	B	C	D
a1	Negative exponential	3.9781430	.0544723	.0000000	1.2953850
a2	Linear regression	.0000000	.0000000	-.0158290	2.9756090
a3	Linear regression	.0000000	.0000000	-.0220891	3.4334060
a4	Negative exponential	2.7477850	.0534941	.0000000	1.4502170
a5	Negative exponential	3.4046290	.0404292	.0000000	1.8248680
a6	Negative exponential	4.8992840	.0359397	.0000000	.5800152
a7	Negative exponential	6.2418950	.0263464	.0000000	-.9175893
a8	Negative exponential	3.8901900	.0865281	.0000000	1.5221520
a9	Negative exponential	5.3245480	.0540939	.0000000	.5279518
a10	Linear regression	.0000000	.0000000	-.0052621	1.5223950
a11	Linear regression	.0000000	.0000000	-.0322148	3.1848410
a12	Negative exponential	4.5569390	.0574112	.0000000	1.0835680
a13	Negative exponential	5.2650780	.0682666	.0000000	1.3302320
a14	Negative exponential	5.9366460	.0371547	.0000000	.8963019
a15	Linear regression	.0000000	.0000000	-.0082507	2.4082910
a16	Negative exponential	4.1465240	.0815645	.0000000	1.4280250
a17	Negative exponential	2.5478990	.0591173	.0000000	1.7527260
a18	Linear regression	.0000000	.0000000	-.0184191	2.9200690
a19	Linear regression	.0000000	.0000000	-.0336093	3.6738750
a20	Linear regression	.0000000	.0000000	-.0147642	2.3277940
a21	Negative exponential	2.8979820	.0606527	.0000000	1.8608660
a22	Negative exponential	4.6314200	.0271012	.0000000	.4112910
a23	Line through mean	.0000000	.0000000	.0000000	2.7402410
a24	Negative exponential	4.0986530	.0296885	.0000000	.8832914
a25	Linear regression	.0000000	.0000000	-.0492654	4.3122410
a26	Negative exponential	4.8418940	.0524721	.0000000	1.1787470
a27	Negative exponential	4.7428300	.0703548	.0000000	.8514434
a28	Linear regression	.0000000	.0000000	-.0013015	1.5896100
a29	Linear regression	.0000000	.0000000	-.0481162	4.4023450
a30	Negative exponential	3.9244050	.0340975	.0000000	1.0868030

- **P04CCARS.CV2** : Ce fichier contient les valeurs prédites par le second ajustement sur les indices in1. Il s'agit généralement d'ajustements polynomiaux du troisième degré à fenêtre mobile de x années (figures ci-dessous).
- **P04CCARS.IN2** : Ce fichier contient les indices issus du second ajustement (CV2) : rapport des valeurs observées sur les valeurs prédites (carrés noirs). La moyenne des indices est 1. On peut également créer un autre fichier avec une variance stabilisée pour chaque série.



On trouve dans le fichier de sortie hetars.out, le tableau suivant donnant les différentes statistiques des données détendancées (**chronologie STD**).

Analyse des cernes : utilisation des programmes de dendrochronologie

P04CCARS - Bloc-notes																	
Fichier	Edition	Format	Affichage	?													
22	a22	1926	1994	69	2.478	2.210	.191	1.315	1.526	1.880	-.8838	.89	.02	.05	.000		
23	a23	1912	1994	83	2.740	2.780	.224	1.550	.074	-.811	-1.8860	.90	.09	.30	.000		
24	a24	1938	1994	57	2.830	2.500	.143	1.047	.755	-.640	-.9776	.83	.21	.20	.000		
25	a25	1942	1994	53	2.982	2.960	.177	1.004	.409	.018	-.2293	.74	.09	.26	.000		
26	a26	1935	1994	60	2.612	2.305	.162	1.320	1.198	.266	-1.4830	.89	.22	-.09	.000		
27	a27	1931	1994	64	1.857	1.450	.169	1.230	1.458	.916	-1.7292	.92	.18	-.27	.000		
28	a28	1878	1994	117	1.513	1.060	.256	1.228	1.512	1.347	-.3226	.85	.14	.04	.000		
29	a29	1940	1994	55	3.055	2.920	.156	1.035	.219	-1.074	-.1054	.85	.26	-.17	.000		
30	a30	1943	1994	52	2.893	2.650	.136	1.047	1.232	1.163	-.8419	.75	.18	.06	.000		
30 Series means				68.1	2.395	2.070	.182	1.180	1.037	.526	-1.0615	.85	.12	.04	.000		
0 STATISTICS OF DETRENDED SERIES																	

Seq	Series	Interval	Years	Mean	Median	Mean sens	Std dev	Skewness	Kurtosis	Trend var %	Partial Ord 1	Partial Ord 2	Partial Ord 3	autocorr	L-Box Prob	Detrending	
1	a1	1938	1994	57	.997	1.003	.143	.103	-.232	.563	.0102	-.58	-.41	-.48	.009	NExpD/S 5v50%D	
2	a2	1926	1994	69	.997	.999	.140	.102	-.506	.583	.0265	-.34	-.56	-.56	.002	Regr-D/S 5v50%D	
3	a3	1913	1994	82	.997	.996	.100	.077	.258	.279	-.0567	-.37	-.49	-.43	.001	Regr-D/S 5v50%D	
4	a4	1928	1994	67	.998	1.000	.125	.085	-.312	.061	.0044	-.59	-.41	-.46	.000	NExpD/S 5v50%D	
5	a5	1934	1994	61	.997	1.015	.118	.083	-.449	-.194	-.0182	-.40	-.54	-.22	.000	NExpD/S 5v50%D	
6	a6	1936	1994	59	.998	1.006	.127	.090	-.187	-.126	.0794	-.55	-.69	-.29	.000	NExpD/S 5v50%D	
7	a7	1938	1994	57	.997	.996	.163	.112	-.254	-.205	.0706	-.63	-.51	-.45	.000	NExpD/S 5v50%D	
8	a8	1945	1994	50	.995	1.007	.173	.126	-.622	1.553	-.1233	-.52	-.41	-.52	.005	NExpD/S 5v50%D	
9	a9	1940	1994	55	.997	1.009	.128	.096	-.574	.262	-.0016	-.35	-.59	-.35	.021	NExpD/S 5v50%D	
10	a10	1901	1994	94	.996	1.010	.181	.135	-.067	2.763	-.0711	-.48	-.24	-.35	.000	Regr-D/S 5v50%D	
11	a11	1913	1994	82	.996	1.006	.152	.121	-1.539	10.022	-.0762	-.53	-.47	-.33	.007	Regr-D/S 5v50%D	
12	a12	1932	1994	63	.998	.983	.103	.083	-.124	2.695	.0935	-.52	-.52	-.46	.025	NExpD/S 5v50%D	
13	a13	1940	1994	55	.998	1.005	.121	.088	-.443	.799	.0802	-.55	-.38	-.52	.018	NExpD/S 5v50%D	
14	a14	1932	1994	63	.998	1.005	.120	.087	-.318	1.291	.0329	-.64	-.34	-.38	.003	NExpD/S 5v50%D	
15	a15	1907	1994	88	.996	1.001	.157	.119	-1.464	5.250	-.0244	-.46	-.50	-.44	.005	Regr-D/S 5v50%D	
16	a16	1942	1994	53	.991	1.004	.142	.122	-.679	3.546	.1479	-.08	-.65	-.28	.000	NExpD/S 5v50%D	
17	a17	1931	1994	64	.996	1.000	.150	.099	-.064	-.081	.0280	-.58	-.38	-.37	.000	NExpD/S 5v50%D	
18	a18	1909	1994	86	.988	.998	.188	.152	-1.523	5.855	-.1107	-.30	-.14	-.30	.437	Regr-D/S 5v50%D	
19	a19	1930	1994	65	.997	1.009	.134	.100	-.096	.640	.0210	-.54	-.34	-.48	.004	Regr-D/S 5v50%D	
20	a20	1895	1994	100	.997	1.007	.182	.147	.058	4.728	-.0756	-.50	-.43	-.16	.002	Regr-D/S 5v50%D	
21	a21	1933	1994	62	.997	.994	.169	.108	-.013	-.739	.0159	-.64	-.52	-.39	.000	NExpD/S 5v50%D	
22	a22	1926	1994	69	.996	.991	.147	.105	.089	-.406	.0261	-.45	-.51	-.42	.007	NExpD/S 5v50%D	
23	a23	1912	1994	83	.994	.991	.171	.137	-.547	3.285	-.0733	-.39	-.54	-.24	.000	Meand/S 5v50%D	
24	a24	1938	1994	57	.998	1.006	.119	.087	-.725	1.911	-.0381	-.50	-.60	-.39	.003	NExpD/S 5v50%D	
25	a25	1942	1994	53	.996	1.008	.136	.100	-.371	.268	.0424	-.51	-.43	-.49	.001	Regr-D/S 5v50%D	
26	a26	1935	1994	60	.997	.998	.131	.095	-.598	1.866	-.0332	-.57	-.35	-.38	.003	NExpD/S 5v50%D	
27	a27	1931	1994	64	.997	.995	.139	.097	-.500	2.353	.0650	-.59	-.36	-.26	.000	NExpD/S 5v50%D	
28	a28	1878	1994	117	.997	1.000	.204	.162	-.764	2.703	-.1293	-.31	-.50	-.26	.000	Regr-D/S 5v50%D	
29	a29	1940	1994	55	.998	.995	.123	.083	.367	.009	.1174	-.65	-.42	-.36	.000	Regr-D/S 5v50%D	
30	a30	1943	1994	52	.999	.998	.117	.079	.276	.443	-.0521	-.71	-.47	-.26	.000	NExpD/S 5v50%D	
30 Series means				68.1	.996	1.001	.143	.106	-.389	1.733	-.0007	-.49	-.46	-.38	.028		
0 MULTIVARIATE AUTOREGRESSIVE MODELING, DETRENDED SERIES																	

All series used in pooling																	

Premier ajustement à gauche et second ajustement à droite

- P04CCARS.RSD** : Ce fichier contient les résidus des processus AR appliqués sur les séries détendancées. Chaque série est ajustée par son propre niveau AR : ordre 1, 2, etc. Dans le fichier P04CCARS.out, le tableau de synthèse est de la forme ci-dessous. La séquence 1 (arbre 1) a été ajustée par un processus AR d'ordre 4, l'arbre 4 par AR=6, l'arbre 18 par AR=1, etc.

P04CCARS - Bloc-notes

Fichier	Edition	Format	Affichage	?											
27	a27	1935	1994	60	.999	1.006	.074	.068	-1.100	4.790	.0502	-.03	-.13	-.17	.183
28	a28	1881	1994	114	1.001	1.006	.135	.126	-.018	6.551	-.0789	.00	-.07	-.17	.248
29	a29	1944	1994	51	1.001	1.004	.052	.045	-.163	1.191	.0383	-.07	-.22	-.25	.045
30	a30	1947	1994	48	.999	1.001	.047	.040	-1.292	3.144	-.0357	-.08	-.20	-.16	.256

* Note: If there are any negative values in a series, the decimal point for mean sensitivity is printed as an asterisk. In such cases mean sensitivity is not strictly correct.

0 AUTOREGRESSIVE COEFFICIENTS FOR EACH SERIES 11:47 Thu 27 Feb 2008 Page 6

Seq	T= -1	T= -2	T= -3	T= -4	T= -5	T= -6	T= -7	T= -8	T= -9	T= -10	Variance % explained
1	-1.2315	-1.1672	-.9390	-.4411							67.25
2	-1.1436	-1.4502	-1.3869	-.9058	-.5641	-.3032					68.18
3	-1.2476	-1.6675	-1.7637	-1.6500	-1.3053	-.9349	-.5935	-.3601			68.64
4	-1.3829	-1.5797	-1.5713	-1.1902	-.7219	-.3937					71.67
5	-.9570	-1.1189	-.8071	-.6632	-.2896						58.30
6	-1.1420	-.9675	-.2867								67.98
7	-1.7292	-2.0512	-1.8861	-1.3191	-.5605						83.21
8	-1.1986	-1.1699	-.9785	-.4678							66.08
9	-1.3524	-2.0471	-2.0960	-2.1061	-1.5975	-1.1899	-.6002	-.2942			74.96
10	-.8232	-.6295	-.6185	-.3823							46.41
11	-1.1123	-1.0958	-.8218	-.5604	-.2349						58.69
12	-1.3878	-1.6401	-1.5028	-1.0554	-.6307	-.2305					69.80
13	-1.1913	-1.1187	-.9181	-.3847							65.80
14	-1.1447	-.9358	-.7616	-.3641							62.96
15	-1.1971	-1.3899	-1.2635	-.8984	-.5763	-.2588					63.27
16	-.3681	-.8503	-.3351	-.2070							52.21
17	-1.0775	-1.0123	-.8627	-.5932	-.4107						61.03
18	-.3057										11.19
19	-1.3496	-1.5609	-1.6850	-1.4001	-.9494	-.5695	-.2613				68.37
20	-.9729	-.8866	-.5780	-.4386							57.39
21	-1.2881	-1.1664	-.7400	-.2950							67.24
22	-1.3206	-1.6517	-1.6287	-1.3859	-.9766	-.6357	-.2333				68.42
23	-.9172	-1.0628	-.7358	-.5589	-.2478						54.69
24	-1.4307	-1.8124	-1.6275	-1.3024	-.7353	-.3346					73.53
25	-1.4725	-1.6989	-1.5020	-.8969	-.3380						74.14
26	-1.3067	-1.4863	-1.5874	-1.4442	-1.2725	-.8144	-.5128	-.2107			67.70
27	-.9905	-.7656	-.5742	-.3430							53.95
28	-.6015	-.6252	-.2537								37.98
29	-1.2760	-1.1813	-.9782	-.5787							72.68
30	-1.3232	-1.1725	-.9157	-.5507							75.93

Average variance explained by autoregression = 62.99%

0 OUTLIERS in NORMALIZED RESIDUALS (over 3 standard deviations from mean) 11:47 Thu 27 Feb 2008 Page 7

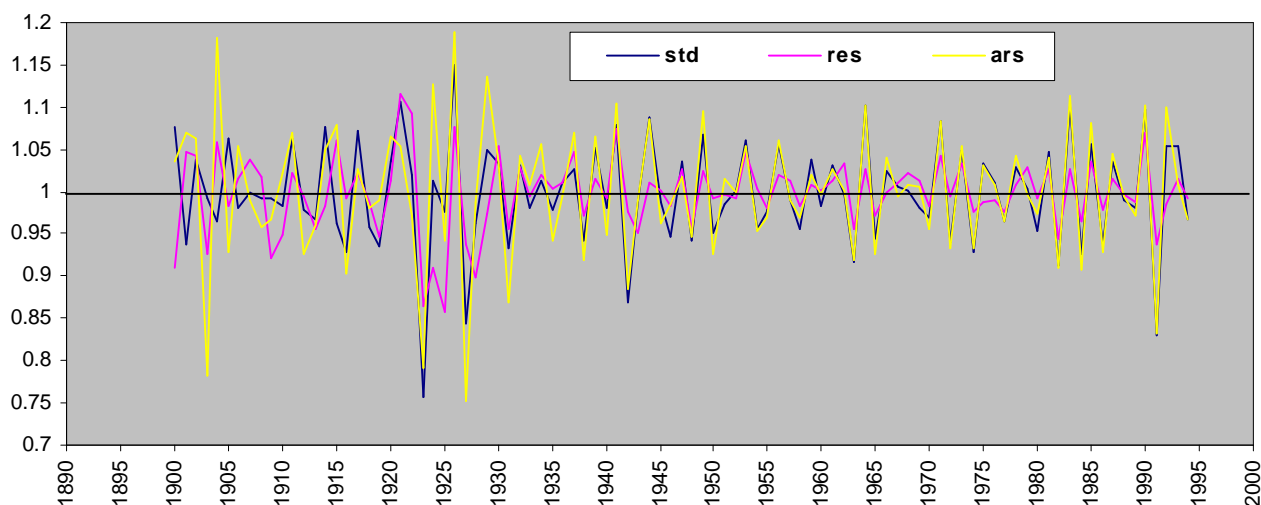
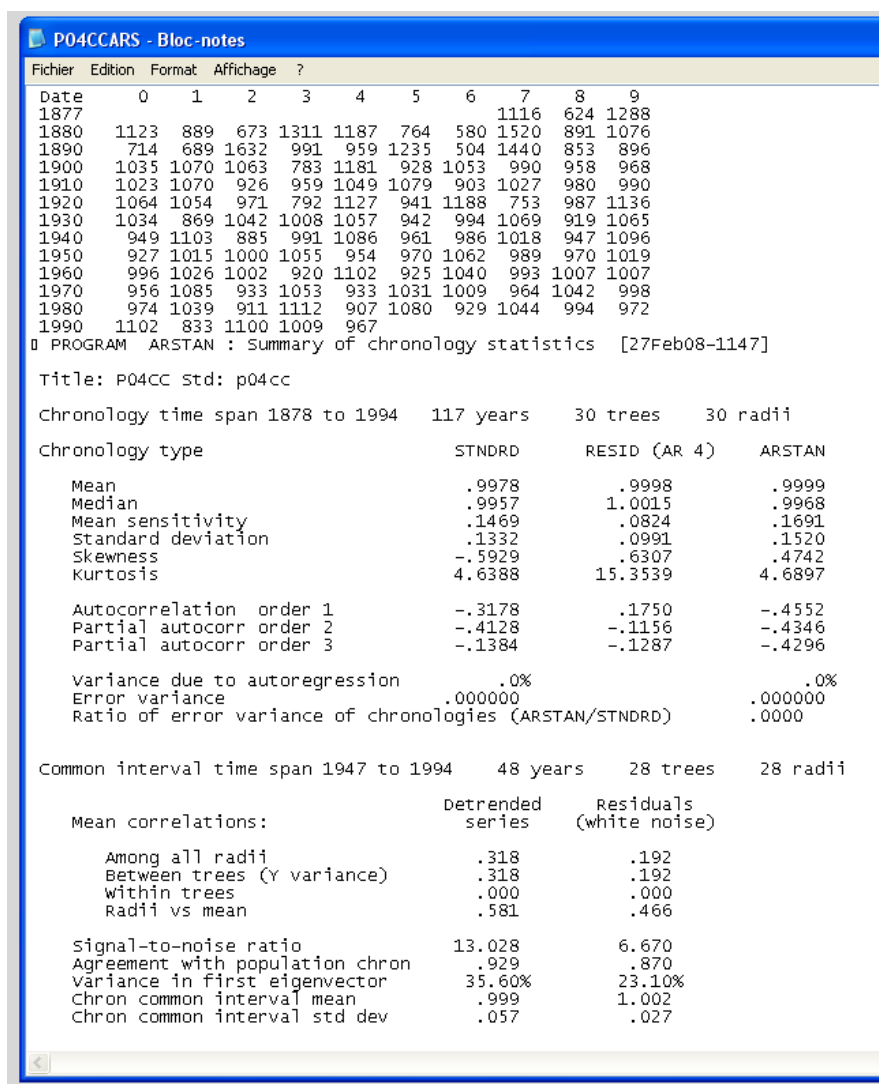
Seq	1	Years:	1943
		Values:	-3.10
Seq	10	Years:	1920 1925
		Values:	3.41 -3.76

- **PO4CCARS.CRN** : Ce fichier contient trois versions de la chronologie maîtresse avec différentes caractéristiques (**STD** version, **RES** version et **ARS** version). Il s'ouvre sous éditeur de texte mais les données sont sous le format case (voir partie 2.1).

```

P04CC std: p04cc [27Feb08-1147]
117=N 1878=I P04CCstd -5(13F6.0)~
111620 62358128758112338 60061108779131291 87835 47938132419108410 96071 82912
64057127724129741102166146560 59423107151111623 77831107661 93776103905 99194
96522106282 98068 99964 99195 99210 98398106349 97894 96810107683 96330 92807
107214 95825 93538103608110538101880 75763101268 97661114997 84409 96356104998
103235 93337103209 98077101238 97937101089102720 94197105092 98166107803 86927
98875108773 98720 94653103621 94142106698 95184 98543100144105968 95465 97589
105529 99045 95635103900 98410103081 99573 91579110295 94320102328100513100105
98147 96970108266 93981104889 92790103309101008 96546102928100326 95441104613
91299110284 92659105734 93792103542 98990 98194109639 83114105283105281 96606
114=N 1881=I P04CCRes -5(13F6.0)~
109786 76650100503115467102750 63149102174 93010108927 94769 54192 95159120345
129007157503 98636106411100732 89473 91030104786104353 92612105954 98316101461
103703101777 92135 94971102305 99407 95472 98372105984 99177102278 98871 94732
101380111480109198 86537 91068 85820107603 93822 89963 97369105414 95460102807
99350101960100329101074104671 97070101610 99184107512 97571 95136101137100209
98328102548 95584102506 99310 99680 99310104803100377 98134101861101374 98268
100931100095101340103280 95557102662 97101 99864101070102293101179 98328104274
99527103359 97530 98828 98991 97673100875102884 99272102588 94414102563 96543
103545 97924101550 99708 98718106985 93820 98586101514 99220
118=N 1877=I P04CCArS -5(13F6.0)~
111620 62358128758112338 88930 67339131117118655 76409 58039152035 89078107641
71359 68884163225 99127 95945123475 50397144001 85255 8959310352110701013106287
78280118105 92779105328 98974 95841 96797102288106968 92649 95944104914107892
90305102727 98002 98983106441105365 97056 79160112743 94089118831 75283 98676
113570103384 86934104198100791105732 94164 99408106910 91891106489 94945110327
88546 99056108640 96149 98594101827 94713109562 92680101467 99953105479 95449
96962106169 98887 96988101949 99596102566100194 91997110214 92513104009 99344
100729100676 95643108467 93288105324 93335103140100926 96416104229 99769 97388
103945 91076111223 90711108024 92873104426 99386 97201110238 83279109951100877
    
```

- a) **STD version** : il s'agit de la chronologie maîtresse calculée sans utilisation des processus autorégressifs. On a seulement un double ajustement des séries élémentaires puis une moyenne robuste à double pondération (pour un choix des options les plus classiques).
- b) **RES version** : le processus de calcul est le même que pour STD mais, dans ce cas, les séries moyennées sont les résidus des processus autorégressifs appliqués sur les séries préalablement détendancées. La date de la première date est généralement différente de celle de la version STD.
- c) **ARS version** : la chronologie a été obtenue après application de processus autorégressifs sur les séries de résidus.
- Pour pouvoir lire les données facilement en colonne, il faut utiliser le programme FMT.exe. Après avoir précisé le nom du programme (P04CCARS.CRN), choisir l'option 2 pour avoir les données sur deux colonnes : années et indices. La figure suivante présente les trois chronologies maîtresses. Le tableau synthétise les statistiques des séries détendancées.



4. DETERMINATION DES FONCTIONS DE REPONSE

PROGRAMME PPPBASE (GUIOT, J 1996)

Plusieurs programmes sont disponibles pour le calcul des fonctions de réponse. Ces dernières ont pour objectifs d'étudier le déterminisme climatique des variations inter-annuelles de croissance. Les données initiales sont les chronologies maîtresses calculées précédemment et des données climatiques, généralement mensuelles. Ces variables climatiques sont des données de températures, et de précipitations ou encore des paramètres plus complexes comme des bilans hydriques des indices bioclimatiques, etc.

Les programmes sont disponibles gratuitement sur le Web et permettent de calculer des fonctions de réponse du type « bootstrapped ». Récemment, Biondi et Waikul ont également mis sur le web un programme permettant de calculer les fonctions de réponse selon le même principe (Dendroclim2002).

- Guiot J (1991) *The bootstrapped response function. Tree-Ring Bull* 51: 39-41.
- Guiot J, Goeury C (1996) *PPPBase, a software for statistical analysis of paleoecological and paleoclimatological data. Dendrochronologia* 14: 295-300
- Biondi F, Waikul K. 2004. *Dendroclim2002: a c++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. Computers and Geosciences* 30 : 303-311.

TREE-RING BULLETIN, Vol. 51, 1991

THE BOOTSTRAPPED RESPONSE FUNCTION

J. GUIOT

Laboratoire de Botanique Historique & Palynologie, UA CNRS
1152, F-13397 Marseille cedex 13

A. ORGANISATION DES DONNÉES SOUS EXCEL

Il est indispensable de créer deux fichiers :

- Le premier fichier contient les données climatiques « **regressors filename** ». La première colonne contient les années (year) et les colonnes suivantes les data climatiques : P, Tmin, Tmax, BH, etc. La première ligne est réservée pour les identificateurs des colonnes. Le fichier est classiquement organisé de façon à former un jeu de 24 régresseurs mensuels : 12 valeurs pour les températures et 12 valeurs pour les données de précipitations. Pour chaque type de données, on considère généralement la période d'octobre (ou novembre) de l'année n-1 à septembre (ou octobre) de l'année n. Ceci permet de prendre en compte les effets de l'arrière saison automnale sur la mise en place du cerne au printemps suivant (prise en compte indirect des processus de mise en réserve carbonée et de leur importance sur la réactivation cambiale, etc.). **Attention, le nombre de régresseurs ne doit pas dépasser la moitié des années disponibles.** Par exemple, si la chronologie maîtresse ne comporte que 50 ans, il ne doit pas y avoir plus de 25 paramètres climatiques dans le fichier initial. Dans le fichier ci-dessous (**clim.xls**): TINO1 : température minimale moyenne (TI) de novembre (NO) de l'année précédente (c'est-à-dire 1951 pour l'année 1952 ; 1). Idem pour le mois de décembre (TIDE1). A partir de janvier, c'est la valeur de l'année qui est précisée.

	A	B	C	D	E	F	G
1	year	TINO1	TIDE1	TJAN	TIFEV	TIMAR	TIAVR
2	1952	6.18	1.65	0.79	-0.15	4.80	...
3	1953	1.66	0.76	-1.55	0.33	1.01	...
4	1954	3.18	3.10	-2.27	-1.51	4.10	...
5	1955	3.80	3.89	0.55	0.51	-0.46	...
6	1956	2.99	3.90	1.28	-8.51	2.06	...
7	1957	2.04	3.95	-0.21	4.54	5.41	...
8	1958	4.22	0.46	1.03	3.16	0.47	...
9	1959	3.43	2.75	-0.29	-0.91	4.23	...
10	1960	4.21	4.08	1.35	1.56	4.26	...
11	1961	6.25	1.40	1.52	4.40	3.38	...
12	1962	3.45	1.45	3.15	1.08	0.14	...
13	1963	3.25	-2.09	-5.10	-4.92	2.77	...
14	1964	6.39	-1.80	-1.49	3.40	2.33	...
15	1965	4.75	0.52	1.40	-0.78	3.07	...
16	1966	2.86	3.66	-1.56	5.67	2.86	...
17	1967	2.52	3.51	1.23	3.29	4.07	...
18	1968	3.05	0.79	1.05	1.06	3.41	...
19	...	...	...	...	...	...	...

- Le second fichier contient les indices de croissance organisés selon le même schéma (« **dependent variables filename** »). Par exemple, si on veut analyser les résultats avec les trois séries maîtresses (std, res et ars), on aura le fichier suivant (ind.xls)

	A	B	C	D
1	year	Std	Res	Ars
2	1952	1.009		
3	1953	1.043		1.083
4	1954	0.798		0.868
5	1955	1.142	0.946	1.005
6	1956	0.981	0.938	1.027
7	1957	0.976	1.006	1.072
8	1958	1.083	1.060	1.040
9	1959	0.868	0.975	0.820
10	1960	0.963	0.944	1.006
11	1961	1.077	0.950	1.067
12	1962	1.059	1.032	1.088
13	1963	0.924	0.995	0.947
14	1964	0.940	0.973	0.900
15	1965	1.065	0.993	1.048
16	1966	0.998	0.998	1.014
17	1967	0.991	1.004	1.039
18	1968	1.028	1.032	1.030
19	...	...	...	...

Les deux fichiers doivent contenir le même nombre de lignes (=années) et les identificateurs des colonnes doivent être en texte et ne pas dépasser 5 caractères. Les deux fichiers **clim.xls** et **ind.xls** doivent être **transformés** en **format DBASE IV ou III** sous excel pour pouvoir être lus par le logiciel PPPBASE. Il faut sélectionner les données et enregistrer sous format DBASE IV. Les nouveaux fichiers s'appellent **clim.dbf** et **ind.dbf**.

B. TRANSFORMATION DES DONNÉES SOUS 3PBASE

Le logiciel de Guiot et Goeury est disponible gratuitement sur le site de l'imep-cnrs : <http://www.imep-cnrs.com/pages/3pbase.htm>.

Les explications pour l'installation sont sur le site.

- 1 - **Télécharger 3Pb_inst.zip**. Le décompresser dans un répertoire temporaire. Exécuter setup.exe pour installer.
- 2 - **Exécuter une fois 3pbase** pour l'initialiser.
- 3 - **Télécharger 3Pbase.zip**. Le décompresser et remplacer 3pbase.exe existant dans c:\3pbase par celui-ci.

Les fichiers de base doivent être **au format dbf**. Dans certains cas, malgré un enregistrement préalable au bon format sous excel, le fichier apparaît incorrect une fois importé sous 3Pbase. Le problème le plus souvent rencontré est un format incorrect de la première colonne des fichiers, c'est-à-dire de la colonne « year » qui doit être absolument **en texte**.

Les fichiers à traiter doivent être dans le même dossier que le logiciel (C:\3Pbase). Après avoir ouvert le logiciel, la procédure est la suivante.

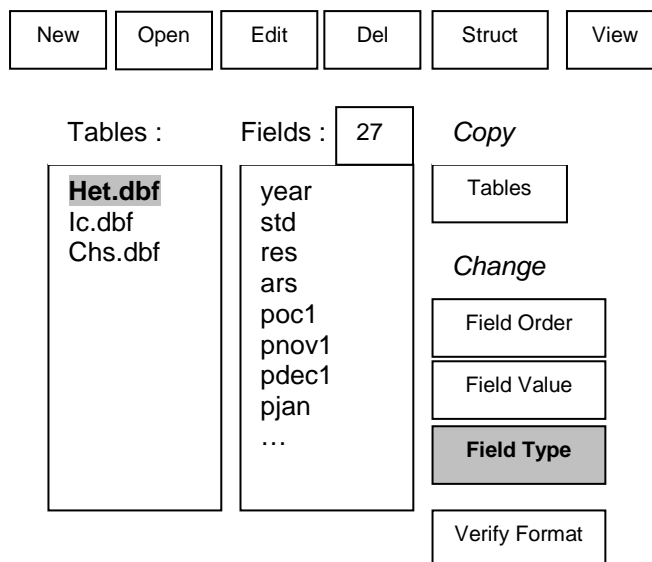
Dans la barre de menu :

File

Open Dbase III-IV

Dans la fenêtre qui apparaît, choisir le fichier à traiter (ex : Het.dbf) et [ouvrir]

Une nouvelle fenêtre apparaît avec plusieurs fenêtres. A gauche, on trouve une fenêtre « Tables » dans laquelle apparaissent tous les fichiers en format dbf. A côté de cette fenêtre, on trouve une fenêtre « Fields » présentant le contenu (nb de colonnes) de chaque fichier dbf.



Dans l'exemple présenté, le fichier **Het.dbf** contient 27 colonnes (indices de croissance et data climatiques). Au bas du menu, on trouve également un champ [Records] qui précise le nombre total de lignes (=nb d'années). Si on sélectionne le bouton **[View]**, on vérifie le contenu du fichier. Il existe également un bouton

[Graph] qui permet de tracer des courbes rapidement.

Pour vérifier le type de données, il faut sélectionner le bouton **[Field Type]**. Il faut vérifier que le **type** du champ year est bien **STRING** avec une **size 4** et que les autres champs sont bien au format **DOUBLE** avec une **size 8**. Si cela n'est pas le cas, il faut changer les types dans les menus correspondants puis taper sur [OK] et sur [Save updated table]. Après cela l'analyse peut commencer.

C. CALCUL DES FONCTIONS DE REPONSE AVEC PPPHALOS (PROGRAMS FOR PALEODATA, PREVISION OF THE HIATUS & ANALYSIS OF THE LINKAGES BETWEEN OBSERVATIONS & SERIES)

□ **Principe des fonctions de réponse « bootstrapped »**

Les relations entre la croissance et le climat peuvent être analysées à partir des simples corrélations entre les séries chronologiques et les paramètres climatiques considérés individuellement. Si cette analyse permet de mettre en évidence les variables liées significativement à la croissance, elle n'aboutit pas à l'élaboration de modèles climatiques qui, en intégrant l'ensemble des facteurs jouant un rôle significatif sur la croissance des peuplements, reflètent son comportement moyen dans la zone étudiée. Pour cela, il est nécessaire d'élaborer des fonctions de réponse des arbres au climat. La fonction de réponse est un modèle statistique linéaire susceptible de prédire les paramètres mensuels du climat intervenant dans les variations d'épaisseur du cerne annuel. La définition de Fritts (1971) est la suivante : « la fonction de réponse est définie comme l'équation de calibration statistique exprimant les effets relatifs séparés de plusieurs facteurs climatiques sur l'épaisseur des cernes ».

Ici, le calcul fait appel à la procédure « bootstrap » (bootstrapped response-function analysis) (Efron 1979 ; Fritts et Xiangding 1986 ; Guiot 1991 ; Tessier 1986 ; Gandolfo et Tessier 1994 ; Tessier et al. 1994 ; Messaoudène et Tessier, 1997).

Les fonctions de réponse « bootstrapped » permettent de tester simultanément les coefficients de régression et la stabilité de la fonction de réponse. L'idée est de remplacer le manque d'information sur les propriétés statistiques des données (nécessité de distribution normale en statistique paramétrique) par un grand nombre d'estimations, chacune basée sur un sous-échantillon de données (Tessier 1989 ; Guiot 1991). La comparaison de ces estimations donne alors une idée de leur variabilité. Les fonctions de réponse sont calculées avec le programme **Calrob** (Bootstrap Regression / Calibration) de PPPHALOS. Le calcul fait également appel à une régression orthogonalisée entre la variable dépendante et les régresseurs (variables climatiques) résultantes d'une analyse en composante principale des paramètres climatiques.

La procédure générale fait appel à un tirage aléatoire avec remise des n données de façon à créer x sous-échantillons de données. Il se déroule de la façon suivante :

- Les données de croissance (variable dépendante) et les paramètres climatiques (variables explicatives) de chaque année sont tirés au sort n fois ; n étant le nombre total d'années disponibles. Le tirage se fait avec remise ce qui signifie qu'une même année peut être tirée au sort plus d'une fois. Les années tirées au sort sont les années de calibration sur lesquelles la fonction de réponse est calculée ;
- La vérification se fait sur toutes les années non prises en compte (n au total). La calibration et la vérification se font sur un même nombre d'années (n) de façon à éviter les biais. Les indices de croissance pour ces années sont obtenus à partir des coefficients issus de la fonction de réponse. La confrontation des indices estimés aux indices réels définit le coefficient de corrélation sur la période de vérification ;
- Afin d'assurer la validité des corrélations, la procédure suivante est répétée k fois (au moins 100) sur les n années. On obtient alors k jeux de coefficients de régression pour chaque variable ; k coefficients de corrélation sur les années de calibration et k sur les années indépendantes de vérification. La moyenne et l'écart-type des coefficients de

corrélation pour chaque variable climatique sont calculés pour les n années de calibration et les n années de vérification (En général 24 coefficients car on a 12 données de température et 12 données de précipitation par an) ;

- La signification statistique de la liaison entre chacun des paramètres climatiques et la croissance est testée en faisant le rapport de la corrélation moyenne de chaque variable avec la croissance sur l'écart-type correspondant. La valeur du rapport mesure l'intensité de la relation et son signe le sens. Plus le rapport est grand et plus le paramètre climatique joue un rôle important dans le déterminisme des variations inter-annuelles d'accroissement des arbres. Un signe positif correspond à une relation directe : plus la valeur de la variable explicative est grande, plus le cerne est grand (et inversement). Un signe négatif témoigne d'une relation inverse : plus la valeur de la variable climatique est grande, plus le cerne est fin (et inversement). De la même façon, la signification globale de la fonction de réponse est établie sur la base du rapport du coefficient de corrélation moyen (R) entre la série reconstruite du climat et la série des valeurs réelles à son écart-type (S), sur la période de calibration et sur la période de vérification. La valeur du rapport permet d'apprécier la qualité et l'efficacité prédictive du modèle. Que ce soit pour les régresseurs considérés individuellement ou pour la signification globale de la fonction de réponse, les différents rapports calculés (R : coefficient moyen de régression sur écart-type) donnent une valeur approchée du coefficient t de student (ddl > 30) (Gadbin-Henry 1994). Les seuils de signification statistique sont présentés dans le tableau ci-dessous. Les fonctions de réponse sont présentées sous forme codée à partir des valeurs des rapports de signification statistiques.

Valeur de R/S	Seuil de signification	Code
$1.645 \leq R/S < 1.96$	10% ($p < 0.10$)	1
$1.96 \leq R/S < 2.576$	5% ($p < 0.05$)	2
$2.576 \leq R/S < 3.291$	1% ($p < 0.01$)	3
$R/S \geq 3.291$	1‰ ($p < 0.001$)	4

- **Utilisation du programme Calrob de PPPhalos** (Bootstrap Regression / Calibration ; calcul des fonctions de réponse)

Dans la barre de menu :

- **PPPhalos**
 - Il apparaît une fenêtre Graphic 1 qui demande de sélectionner un module dans le menu PPPhalos. Sélectionner alors dans la barre générale
 - **[PPPhalos Menu]**
 - **[General statistics]**
 - **Calrob [Bootstrap Regression / Calibration]**

Une nouvelle fenêtre apparaît avec 8 lignes

Calrob : Bootstrap orthogonal regression	
Long listing (1) short (0) medium (2) :	2
Regressors file name :	clim.dbf
Dependent variables filename :	ic.dbf
Exact numbers of regressors :	24
Number of simulations :	200
Blocksize for bootstrap (1 :N/10)	5
Log_transform of regressors (1/0)	0

Pour changer les paramètres, il suffit de cliquer sur chaque ligne. Par défaut, le listing de sortie est moyen. Le fichier « regressors » contient les données climatiques (généralement 12 T et 12 P donc 24 régresseurs + la première colonne year). Le fichier « dependent » contient les indices de croissance des chronologies maîtresses (colonne year + 1 à 3 colonnes d'indices). **Il doit absolument y avoir le même nombre d'années (=lignes) dans les deux fichiers.** On peut également modifier le nombre de simulations. Généralement 100 à 200 simulations sont suffisantes, mais avec les ordinateurs actuels, les temps de calcul sont très courts et on peut sans problème augmenter le nombre de simulations (sans changer fondamentalement les résultats).

Une fois le paramétrage changé, il faut retourner dans la barre de menu général en haut et sélectionner :

- **[Control File]**
 - **[Save and Exit]**

L'exécution du programme ne prend que quelques secondes. Deux fichiers sont créés qui ont pour nom par défaut : **xxx.txt** et **xxx.dat**.

Le fichier xxx est un fichier txt qui s'ouvre grâce au bloc-notes. Il contient le listing des résultats. C'est le fichier de base à consulter pour l'analyse. Le second fichier xxx.dat contient les coefficients de régression des régresseurs. Il est nécessaire pour reconstruire les courbes de croissance (programme filibr).

Analyse des résultats (fichier xxx.txt)

1) **La première partie** du listing récapitule les fichiers d'entrée et leurs caractéristiques.

2) **La deuxième partie** présente les résultats des x simulations pour chacune des chronologies contenues dans le fichier ic.dbf. Pour chaque simulation, la corrélation sur les années de calibration et celle sur les années de vérification est donnée.

SIMULATION : CORRELATIONS CALIBRATED/VERIFIED						
SIMUL/VAR	1	2	3	1	2	3
1	0.755	0.761	0.86	0.619	0.66	0.59
2	0.916	0.909	0.886	0.023	0.039	0.61
3	0.909	0.902	0.911	0.104	0.093	0.4
4	0.887	0.888	0.975	0.402	0.411	0.568
5	0.849	0.859	0.913	0.351	0.349	0.327
...

Dans l'exemple présenté ici, le fichier ic.dbf contient trois chronologies maîtresses symbolisées par 1, 2 et 3 (chronologies sur le cerne complet 1, le bois initial 2 et le bois final 3). Les trois premières colonnes correspondent aux corrélations obtenues sur les années de calibration. Ainsi, pour la simulation 1 et la chronologie 1, la corrélation entre le modèle climatique et les cernes est de 0.755 pour les seules années de calibration. Le même modèle appliqué sur les années de vérification (non prises en compte) aboutit à une corrélation de 0.619. Pour la simulation 2, les corrélations sont respectivement de 0.916 et 0.023, etc. Le niveau des corrélations dépend bien sûr des années tirées au sort dans les sous-échantillons de chaque simulation. Il est donc important de réaliser un nombre de simulations suffisant (au moins 100) pour obtenir une réponse moyenne statistiquement valide et écologiquement pertinente.

3) **La troisième partie** présente, pour chaque variable dépendante (=chaque série chronologique = 3 dans le cas considéré) :

- La corrélation moyenne et l'écart-type moyen sur la période de calibration et sur la période de vérification ;
- Les coefficients moyens de régression bootstrap (R) pour chaque régresseur, c'est-à-dire pour chaque variable climatique ;
- Les écart-types moyens des coefficients de régression bootstrap (S) ;
- Les rapports R/S pour chaque variable. Selon la valeur de ce rapport, les variables sont significatives aux seuils de 1 p. mille à 10% (voir tableau).

DEPENDENT VARIABLE: 1 CC					
Multiple correlation=	.871	standard deviation=	.0541		
Verification correlation=	.257	standard deviation=	.2494		

Mean bootstrap regression coefficients					
-0.229	0.254	0.089	0.023	0.017	...
Stand. dev. of bootstrap regression coefficients					
0.094	0.117	0.091	0.065	0.069	...
Ratio regr. coeff / stand. dev.					
-2.442	2.176	0.983	0.363	0.241	...
IS	IS1	TINO1	TIDE1	TIJAN	...

Dans l'exemple ci-dessus, le coefficient de corrélation moyen sur les 200 simulations et sur les années de calibration est 0.871 (0.0541). Sur les années de vérification, la corrélation est 0.257 (0.2494). La première variable climatique est IS qui correspond à un indice de stress annuel. Pour cette variable, le R/S est de -2.442 ce qui signifie que son effet est négatif et significatif au seuil de 5% (1.96 à 2.576). Pour la variable température minimale moyenne de novembre de l'année n-1 (TINO1), le R/S est de 0.983 ce qui signifie que la variable n'a pas d'effet significatif sur la croissance. La même analyse doit être faite pour toutes les variables.

4) **La quatrième partie** présente, pour chaque variable dépendante, les coefficients de régression après « déstandardisation » de chaque variable climatique. Ce sont ces coefficients qui sont utilisés pour établir les modèles climatiques (modèles linéaires additifs).

DEPENDENT VARIABLE	1	CC	Mean/Std.dev.=	1.33	3.70
Regression coefficients after destandardization					
	-0.034	0.036	0.233	0.049	0.026

Ainsi, pour la variable IS significative au seuil de 5%, le coefficient est donc de -0.034.

- ❑ **Utilisation du programme Filibr de PPPhalos** (Bootstrap Regression / Application; indices prédits après calculs des fonctions de réponse)

Une fois les fonctions de réponse calculées, il est possible d'obtenir des courbes de croissance reconstruites à partir des coefficients bootstrap. Pour cela, il faut faire tourner le programme Filibr.

Dans la barre de menu :

- **PPPhalos**
 - Il apparaît une fenêtre Graphic 1 qui demande de sélectionner un module dans le menu PPPhalos. Sélectionner alors dans la barre générale
 - [PPPhalos Menu]
 - [General statistics]
 - Filibr [Bootstrap Regression / Application]

Une nouvelle fenêtre apparaît avec 4 lignes

Filibr : Bootstrap orthogonal regression : application to new regressors	
Long listing (1) short (0) medium (2) :	2
Regressors file name :	clim.dbf
coefficients filename :	xxx.dat

Le fichier **xxx.dat** est issu du programme Calrob. Ce programme crée deux fichiers : un fichier **xxx.txt** (listing) et un fichier **xxx.dbf** qui contient les indices de croissance reconstruits à partir des fonctions de réponse.

- ❑ **Présentation des tableaux de résultats**

Les résultats des fonctions de réponse se présentent classiquement sous forme de tableaux comme dans l'exemple présenté ci-dessous (extrait de *Lebourgeois et al. 2005*). Pour chacun des 24 paramètres climatiques (12 indices de sécheresse et 12 températures) le code de signification des coefficients bootstrap est

précisé. Plus la valeur absolue du code est élevée et plus le régresseur est important pour le peuplement ou le compartiment du cerne correspondant (TR, EW, LW = cerne complet, bois initial et bois final). Une absence de code signifie une absence de corrélation. Dans cet exemple, on a pour, chaque compartiment du cerne, deux lignes : la première correspond aux fonctions de réponse obtenues avec la combinaison (indices et Tmin) et la seconde (indices et Tmax). Dans cet exemple, le r2 entre les valeurs observées et les valeurs prédites par le modèle est également donné.

		Indexes of drought												Temperature												r ²					
		year n						year n-1																							
		M	J	J	A	S	O	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	Ju	Ju	A	S	O						
HET 02	TR													1	2																17.0%
1949-94															1																18.5%
	EW														1	2															26.3%
															1																27.5%
	LW															3														45.3%	
																	3														30.8%
HET 03	TR	-3																													42.0%
1950-94		-3																													43.8%
	EW	-3																													42.4%
		-2																													44.4%
	LW	-1																													47.2%
		-2																													11.1%
HET 04	TR																														ns
1968-94																															ns
	EW																														ns
																															ns
	LW	2																													39.7%
		1																													48.6%
HET 09	TR																														21.6%
1956-94																															28.3%
	EW	-1																													38.7%
		-1																													39.3%
	LW																														19.4%
																															38.6%

- ❑ **Significativité des fonctions de réponse**

Dans la démarche classique, la première analyse commence généralement par prendre en compte un jeu de 24 régresseurs climatiques. Après avoir fait tourner la procédure Calrob, certains régresseurs apparaissent significatifs et d'autres non. En fait, sur un jeu de 24 régresseurs, les facteurs significatifs sont généralement beaucoup moins nombreux que les non significatifs. Les vérifications se font cependant en prenant en compte tous les régresseurs. On aboutit donc généralement à des corrélations sur la période de vérification beaucoup plus faibles que sur la période de calibration (voir tableau dans le paragraphe deuxième partie). Ainsi, après les x simulations, on obtient généralement des fonctions de réponse globalement non significatives (en se basant seulement sur les périodes de vérification). Dans l'exemple considéré, on obtient sur la période de vérification

un rapport R/S de $0.255/0.2494 = 1.03$ largement inférieur au seuil minimal de 10% (valeur > 1.64) (voir tableau dans le paragraphe deuxième partie). D'une façon équivalente, ce sont tous les coefficients de régression des 24 variables qui sont utilisés dans le programme Filibr pour reconstruire les indices. Cette chronologie maîtresse intègre donc non seulement les régresseurs significatifs mais également les non significatifs. La procédure normale consiste donc à refaire tourner les programmes en ne considérant que les variables ou les groupes de variables significatives.

**PROGRAMME DENDROCLIM2002
(Biondi et Waiikul, 2002)**

En 2002, ces auteurs ont publié un article présentant un nouveau logiciel pour calculer les corrélations et les fonctions de réponse bootstrapped. Il s'agit d'un programme très simple à utiliser permettant non seulement de calculer les corrélations entre le climat et la croissance mais également de tester la stabilité des fonctions de réponse.



Computers & Geosciences 30 (2004) 303–311

**COMPUTERS
GEOSCIENCES**

www.elsevier.com/locate/cageo

DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies[☆]

Franco Biondi^{a,*}, Kishor Waikul^b

^a Department of Geography, University of Nevada, Mail Stop 154, Reno, NV 89557-0048, USA

^b Department of Computer Science, University of Nevada, Reno, NV 89557, USA

Received 11 March 2003; received in revised form 4 November 2003; accepted 4 November 2003

Abstract

Tree-ring chronologies are often calibrated against instrumental climate records using correlation and response functions. DENDROCLIM2002 uses bootstrapped confidence intervals to estimate the significance of both correlation and response function coefficients. Input and output file selection, as well as analytical options, are chosen from a user-friendly GUI. Final results are saved in ASCII format, and are plotted on screen using color-coded symbols. DENDROCLIM2002 is an extension of existing task-specific software, which is mostly MS-DOS based, and of available user-supplied code for statistical packages, such as SAS. In addition, DENDROCLIM2002 incorporates the ability to test for temporal changes of dendroclimatic relationships by means of evolutionary and moving intervals. This simple approach allows for a complete, dynamical representation of statistical relationships between climate and tree growth. An example using published dendroclimatic data is used to illustrate the analytical and graphical capabilities of the software.

© 2004 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Dendrochronology; Dendroclimatology; Correlation; Principal Component Regression; Bootstrap

1. Introduction

Numerical calibration of proxy climate records with instrumental observations is an essential requirement of modern paleoscience (Alverson, 2002). Because of their annual to seasonal resolution, tree-ring chronologies are usually regressed against monthly climate variables, especially precipitation and temperature (e.g., Fritts, 1976). The most common statistical models used by dendrochronologists are called 'correlation functions' and 'response functions' (Blasing et al., 1984; Fritts et al.,

1971). The term 'function' indicates a sequence of coefficients computed between the tree-ring chronology and the monthly climatic variables, which are ordered in time from the previous-year growing season to the current-year one. In 'correlation' functions the coefficients are univariate estimates of Pearson's product moment correlation (e.g., Morrison, 1983), while in 'response' functions the coefficients are multivariate estimates from a principal component regression model (Briffa and Cook, 1990; Morzukh and Ruark, 1991).

Interpretation of correlation and response functions is favored by an accurate assessment of statistical significance, so that appropriate ecophysiological hypotheses (e.g. Biondi, 1993; Biondi et al., 1997) and paleoclimatic reconstructions (e.g. Biondi, 2000; Biondi et al., 1999) can be generated. In response functions, normal significance levels of coefficients are misleading because error estimates are underestimated (Cropper, 1985; Morzukh and Ruark, 1991), hence some

[☆] Executable program for Windows 98, ME, NT, 2000, XP available from server at <http://woods.geography.unr.edu/dendrosite/software/dendroclim.html>.

*Corresponding author. Tel.: +1-775-784-6921; fax: +1-775-784-1058.

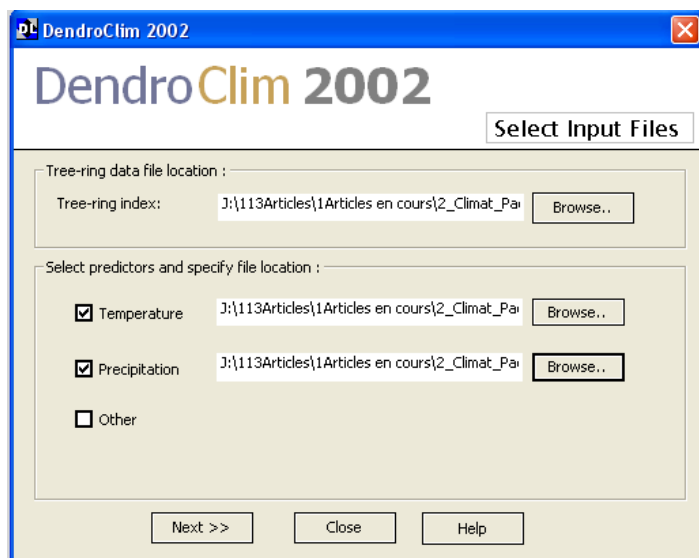
E-mail address: fbiondi@unr.edu (F. Biondi).

URL: <http://unr.edu/homepage/fbiondi>.

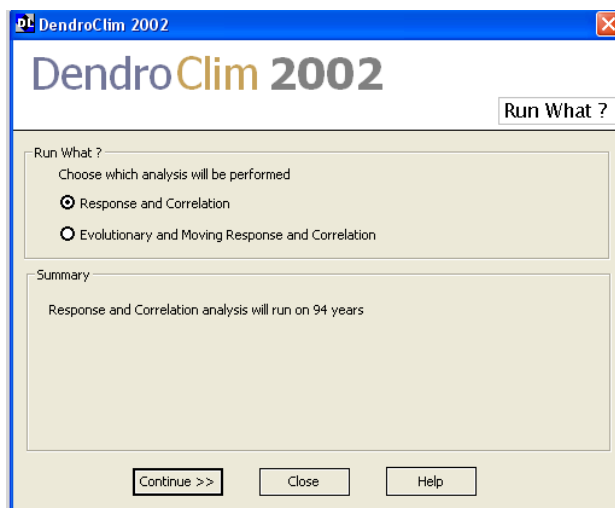
L'organisation des données est très simple. Les données sont en format **nom.txt**. Le premier fichier contient les indices de croissance : colonne 1 = les années ; colonne 2 = les indices. (Aucun identificateur de colonne). Le second fichier contient les données climatiques de températures ou de précipitations. Colonne 1 = années ; colonne 2 à 13 : les données mensuelles de T ou de P. Les données peuvent être organisées de janvier à décembre de l'année n ou en combinant des données de l'année précédente et de l'année en cours.

Year	Index	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1910	1.06	8.39	9.55	11.88	13.91	17.46	23.44	25.2	26.21	21.23	18.33	11.3	10.59
1911	0.933	6.56	9.27	11.87	13.66	19.24	23.29	29.15	29.69	24.64	18.23	14.22	11.42
1912	1.067	9.95	11.99	13.86	13.84	19.72	22.96	26.35	24.52	19.37	17.02	9.42	9.52
1913	1.0069	10.42	9.58	12.84	13.8	18.96	23.84	24.96	26.33	22.61	19.3	14.26	8.56
1914	1.0543	5.04	11.06	11.96	16.37	17.98	21.95	25.72	25.97	22.35	17	11.86	10.42
1915	0.8911	7.24	8.48	11.18	13.66	20.55	24.69	26.36	26.12	21.58	15.79	10.63	11.4
1916	0.9525	9.83	9.85	11.61	15.21	20.03	22.51	26.59	26.98	21.52	17.22	12.86	9.93
1917	1.0556	6.17	7.88	9.76	12.72	20.7	24.59	27.25	26.26	24.37	15.89	11.19	6.97
1918	1.0385	8.6	9.57	11.32	13.73	19.54	22.21	27.05	26.66	24.1	15.91	13.09	10.81
1919	0.8867	7.89	9.01	11.67	13.66	19.2	24.09	24.7	27.77	24.02	15.08	9.96	9.96
1920	1.007	9.84	11.53	13.2	15.41	22.3	23.54	26.9	25.87	23.05	18.01	12.53	8.82
1921	1.026	9.81	8.86	11.77	13.81	19.99	23.94	28.8	27.24	25.1	20.86	11.55	8.57
1922	1.0078	7.75	9.61	12.79	13.7	21.31	24.28	26.03	28	21.12	17.22	10.23	8.29
1923	0.9674	6.6	10.71	12.17	15.1	18.96	21.17	29.75	29.25	23.26	20.1	12.73	8.07
1924	0.9401	8.04	6.9	11.92	15.26	21.17	23.92	28.54	24.7	23.35	17.89	13.76	10.11
1925	1.1218	9.54	9.77	8.91	14.69	19.1	25.03	26.95	26.88	21.71	18.6	11.04	8.26
1926	1.0678	7.59	12.73	12.74	15.65	17.61	22.22	27.14	27.57	25.54	19.8	14.81	7.16
1927	0.7768	8.01	8.91	12.2	15.37	20.27	24.09	27.75	27.15	23.12	17.91	13.19	9.56
1928	1.0896	9.28	11.25	13.11	15.56	18.09	24.29	30.52	29.22	24.43	18.31	13.13	8.22
1929	0.9703	5.42	5.51	12.32	14.37	19.87	25.43	28.79	27.71	26.14	18.6	12.62	10.4
1930	1.0933	10.94	9.28	13.48	15.37	18.83	25.87	27.46	27.37	24.61	18.58	14.38	9.54
1931	0.8437	7.92	7.67	12.79	14.75	20.78	26.43	27.91	26.93	20.29	18.07	13.83	7.15
1932	1.14	9.55	6	11.62	13.8	18.89	22.75	25.56	29.48	26.2	17.99	13.78	12.46
1933	0.9224	6.95	9.05	13.62	15.91	19.85	22.4	28.45	29.13	25.17	23.37	11.28	5.99
1934	0.9613	7.62	8.79	12.5	15.94	21.19	24.67	29.19	26.83	24.19	17.93	11.63	12.02
1935	1.0439	5.93	10.21	12.05	15.25	18.18	25.35	29.35	26.56	24.61	17.85	13.75	8.8
1936	1.1658	11.51	10.81	13.62	15.17	19.63	23.95	27.78	27.92	24.43	14.66	12.92	9.86
1937	0.7843	11	12.3	12.08	15.71	20.94	25.66	29.27	28.34	23.99	19.08	12.64	7.61
1938	0.8932	7.6	8.89	13.93	13.84	18.68	25.29	28.15	27.49	23.46	18.74	15.33	8.56
1939	1.0389	9.86	10.39	10.38	16.32	17.91	24.15	27.29	27.49	23.15	18.12	14.45	8.5
1940	1.147	5.25	10.48	13.12	15.61	20.34	23.86	26.86	26.96	23.93	17.76	12.96	4.62
1941	0.9394	6.05	9.84	13.29	14.31	17.54	24.25	28.86	26.56	22.89	17.22	12.17	7.45
1942	0.9138	4.61	6.04	14.69	16.72	19.96	25.92	28.48	28.46	26.07	20.83	11.4	9.57
1943	1.0327	9.6	11.35	14.81	18	21.71	25.4	30.14	30.72	26.32	20.51	12.05	9.96
1944	1.0044	10.47	7.93	11.68	18.43	22.06	25.28	29.31	31.38	24.75	16.71	12.4	7.95
1945	1.0126	4.5	12.81	14.85	19.3	23.47	27.35	31.38	28.61	24.75	19.21	11.91	9.58
1946	0.9852	7.79	11.26	12.71	17.76	20.18	24.25	28.93	28.36	25.01	18.37	12.23	6.86
1947	0.8397	5.98	8.93	13.67	16.76	21.93	26.66	30.15	29.77	25.27	19.59	13.94	7.59
1948	1.2626	10.12	10.29	14.84	16.42	21.05	24.24	26.37	27.91	23.36	18.85	13.11	10.54
1949	0.8923	9.15	8.4	10.93	17.67	19.4	24.52	29.31	26.47	27.34	20.49	11.39	10.21
1950	0.8884	7.96	11.36	13.04	14.3	21.04	26.94	31.21	28.99	23.55	18.57	12.77	6.72
1951	1.1662	9.12	10.06	11.84	15.77	18.96	25.11	29.01	27.83	25.12	17.33	14.37	10.19
1952	0.8857	6.97	8.69	14.61	17.62	21.64	28.42	32.06	29.58	22.86	18.49	11.71	8.81
1953	0.9825	5.37	7.77	14.15	17.09	23.16	23.64	29.07	29.33	24.84	19.02	13.62	11.89
1954	1.109	6.99	8.77	13.72	15.48	20.48	26.23	27.8	27.1	24.98	19.27	14.23	11.3
1955	0.9505	11.45	10.26	12.16	17.84	21.37	25.01	29.32	28.47	24.36	18	13.04	11.29
1956	0.9677	9.84	3.92	12.46	14.87	21.81	23.73	28.2	28.4	25.26	17.88	10.67	9.12
1957	1.0232	8.15	12.36	15.41	16.19	18.95	24.99	29.54	28.31	24.32	19.73	13	9.87

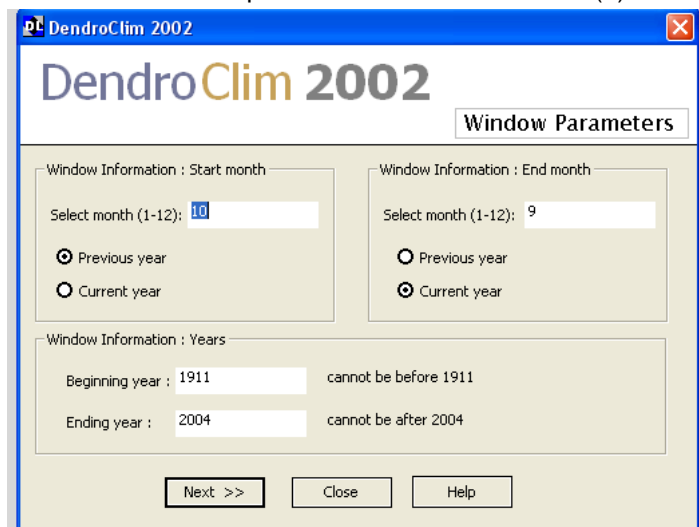
La première étape permet de choisir les trois fichiers.



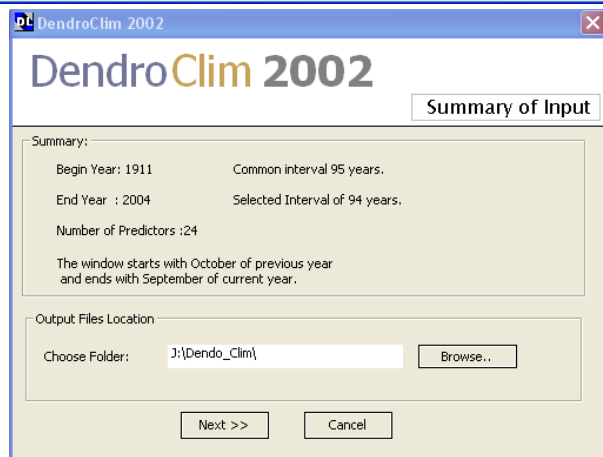
La quatrième étape consiste à choisir le type d'analyse : analyse sur l'ensemble de la période (response and correlation) ou analyse de la stabilité temporelle. Ici analyse simple.

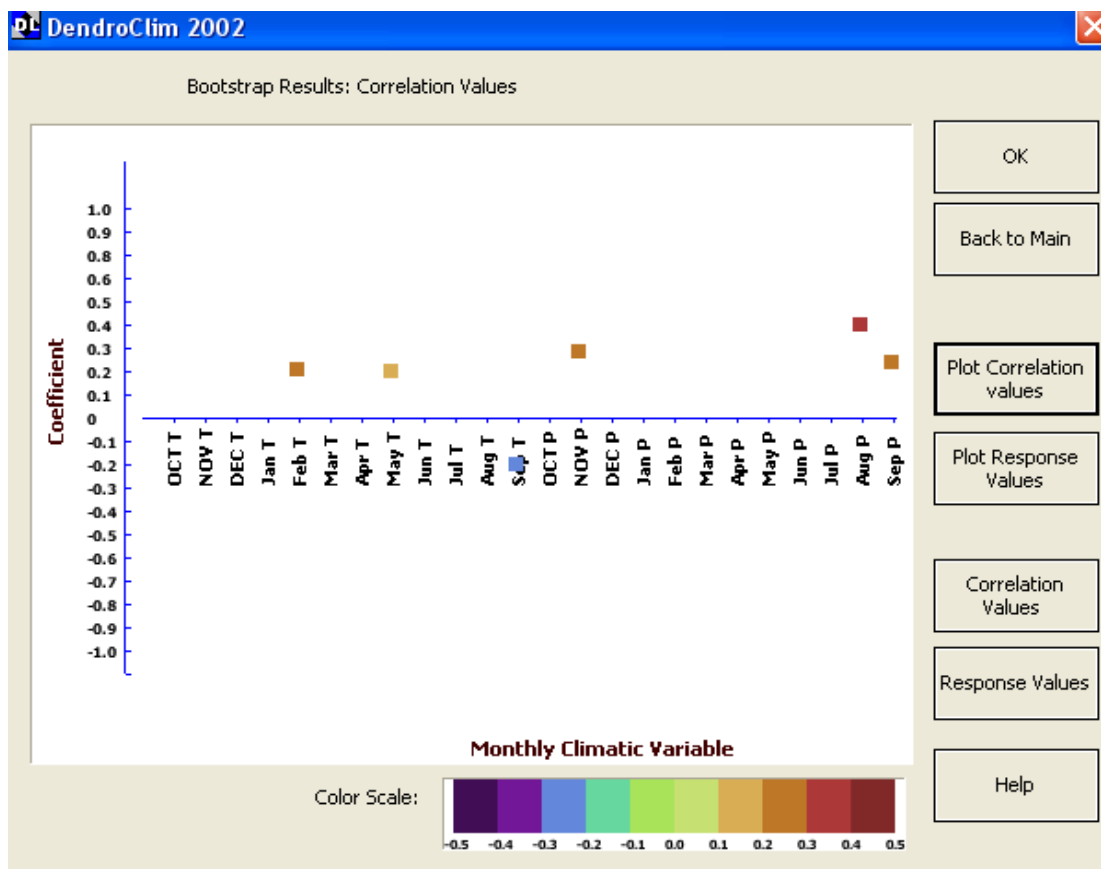


La seconde étape permet de choisir la fenêtre de calcul. Ici les calculs se font sur la période 1911-2004. Le premier mois considéré est le mois d'octobre de l'année précédente (10) et le dernier le mois de septembre de l'année courante (9).



Les calculs des corrélations et des fonctions de réponse sont fondées sur des procédures bootstrapped (voir partie 1 Programme PPPBase). On peut obtenir les résultats sous forme de figures en couleur. On obtient également un fichier .txt qui contient les valeurs des coefficients de corrélation. On peut ainsi réaliser tout type de figure dans avec un autre programme (excel par exemple). Les couleurs indiquent le niveau des corrélations. Seules les corrélations significatives au seuil de 5% sont présentées.



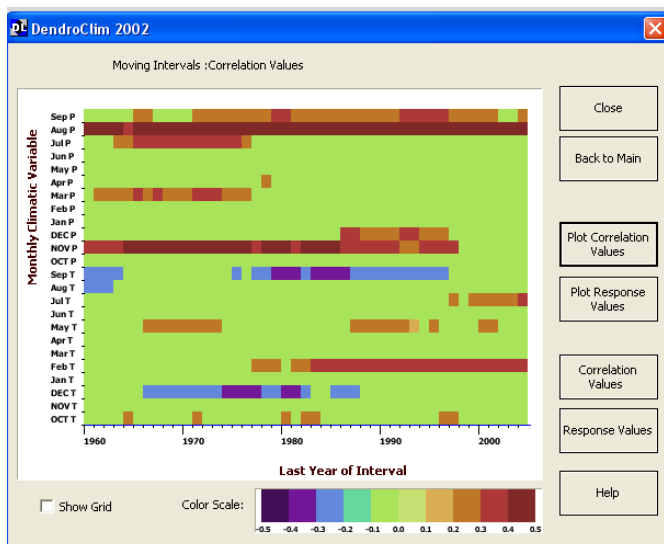
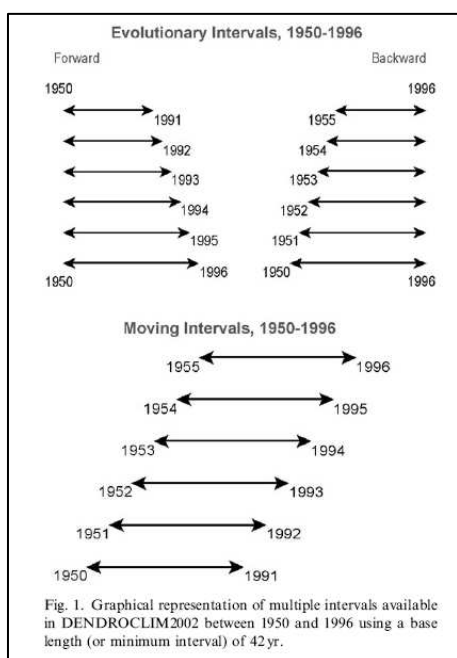


```

s_corr.sig - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
=====
DendroClim : Bootstrap Correlation SIGNIFICANT VALUES ::
=====
Input Files :
Tree-Index:J:\113Articles\1Articles en cours\2_Climat_Paca\1-dossier_en_cours_sept2009\data_cerne_strat
Temperature:J:\113Articles\1Articles en cours\2_Climat_Paca\1-dossier_en_cours_sept2009\data_cerne_stra
Precipitation:J:\113Articles\1Articles en cours\2_Climat_Paca\1-dossier_en_cours_sept2009\data_cerne_st
=====
user selected window information:
Begin year:1911
End year:2004
The window starts with october of previous year
and ends with september of current year.
-----
significance Test : 95% Percentile Range
-----
OCT T 0
NOV T 0
DEC T 0
Jan T 0
Feb T 0.206377
Mar T 0
Apr T 0
May T 0.198284
Jun T 0
Jul T 0
Aug T 0
SEP T -0.209811
OCT P 0
NOV P 0.281918
DEC P 0
Jan P 0
Feb P 0
Mar P 0
Apr P 0
May P 0
Jun P 0
Jul P 0
Aug P 0.394196
Sep P 0.233744
    
```

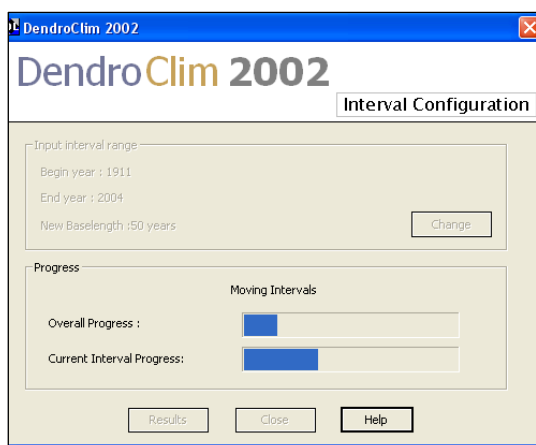
Le logiciel permet de calculer également des fonctions de réponse sur différents intervalles c'est-à-dire d'étudier la stabilité temporelle des relations cerne-climat. 3 options sont possibles : On fixe la première année (la plus ancienne) et une année est ajoutée à chaque pas (Forward) ; on fixe la dernière année (année la plus récente) et on ajoute une année à chaque pas (Backward) ; on fixe la longueur de l'intervalle et c'est l'ensemble de la période qui est décalée à chaque pas (Moving intervals).

La figure ci-dessous présente les résultats des « moving correlations ». On peut ainsi observer l'évolution des corrélations au cours du temps. Dans l'exemple ci-dessous, on voit que les corrélations pour les pluies de septembre et d'août sont stables alors que, pour la température du mois de février, les corrélations apparaissent à partir de la prise en compte des années 1980.



On peut également récupérer tous les coefficients de corrélation dans un fichier .txt.

Pendant la procédure, la fenêtre suivante apparaît.



m_corr.sig - Bloc-notes

Fichier Edition Format Affichage ?

=====
 Bootstrap Correlation SIGNIFICANT values for :Moving Intervals
 =====

Input Files :

Tree-Index:J:\113Articles\1Articles en cours\2_Climat_Paca\1-Dossier_en_cours_sept2009\Data_cerne_stratif_Alt_BH\Data_17s
 Temperature:J:\113Articles\1Articles en cours\2_Climat_Paca\1-Dossier_en_cours_sept2009\Data_cerne_stratif_Alt_BH\Data_17
 Precipitation:J:\113Articles\1Articles en cours\2_Climat_Paca\1-Dossier_en_cours_sept2009\Data_cerne_stratif_Alt_BH\Data_17

Common interval in all files:

Begin year:1911
 End year:2004
 The window starts with october of previous year
 and ends with september of current year.
 Baselength:50

Significance Test : 95% Percentile Range

	OCT T	NOV T	DEC T	Jan T	Feb T	Mar T	Apr T	May T	Jun T	Jul T	Aug T	Sep T	OCT P	NOV P	
1960	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.237	-0.244	0.000	0.328	C
1961	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.243	-0.251	0.000	0.329	C
1962	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.222	-0.227	0.000	0.376	C
1963	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.231	0.000	0.381	C
1964	0.249	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.419	C
1965	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.452	C
1966	0.000	0.000	-0.270	0.000	0.000	0.000	0.000	0.249	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.470	C
1967	0.000	0.000	-0.263	0.000	0.000	0.000	0.000	0.253	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.462	C
1968	0.000	0.000	-0.268	0.000	0.000	0.000	0.000	0.256	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.463	C
1969	0.000	0.000	-0.273	0.000	0.000	0.000	0.000	0.237	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.445	C
1970	0.000	0.000	-0.284	0.000	0.000	0.000	0.000	0.243	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.477	C
1971	0.244	0.000	-0.265	0.000	0.000	0.000	0.000	0.232	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.469	C
1972	0.000	0.000	-0.266	0.000	0.000	0.000	0.000	0.221	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.465	C
1973	0.000	0.000	-0.291	0.000	0.000	0.000	0.000	0.226	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.472	C
1974	0.000	0.000	-0.307	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.449	C
1975	0.000	0.000	-0.314	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.242	0.000	0.428	C
1976	0.000	0.000	-0.322	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.408	C
1977	0.000	0.000	-0.306	0.000	0.251	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.280	0.000	0.389	C
1978	0.000	0.000	-0.286	0.000	0.248	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.278	0.000	0.413	C
1979	0.000	0.000	-0.271	0.000	0.257	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.301	0.000	0.439	C
1980	0.242	0.000	-0.309	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.339	0.000	0.420	C
1981	0.000	0.000	-0.304	0.000	0.289	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.306	0.000	0.389	C
1982	0.249	0.000	-0.264	0.000	0.292	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.290	0.000	0.408	C
1983	0.256	0.000	0.000	0.000	0.325	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.342	0.000	0.434	C
1984	0.000	0.000	0.000	0.000	0.315	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.341	0.000	0.427	C
1985	0.000	0.000	-0.235	0.000	0.330	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.343	0.000	0.427	C
1986	0.000	0.000	-0.278	0.000	0.355	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.315	0.000	0.393	C
1987	0.000	0.000	-0.266	0.000	0.391	0.000	0.000	0.264	0.000	0.000	0.000	-0.286	0.000	0.344	C
1988	0.000	0.000	0.000	0.000	0.374	0.000	0.000	0.262	0.000	0.000	0.000	-0.284	0.000	0.355	C
1989	0.000	0.000	0.000	0.000	0.384	0.000	0.000	0.243	0.000	0.000	0.000	-0.293	0.000	0.384	C
1990	0.000	0.000	0.000	0.000	0.351	0.000	0.000	0.205	0.000	0.000	0.000	-0.272	0.000	0.336	C
1991	0.000	0.000	0.000	0.000	0.327	0.000	0.000	0.234	0.000	0.000	0.000	-0.261	0.000	0.347	C
1992	0.000	0.000	0.000	0.000	0.332	0.000	0.000	0.201	0.000	0.000	0.000	-0.247	0.000	0.296	C
1993	0.000	0.000	0.000	0.000	0.342	0.000	0.000	0.197	0.000	0.000	0.000	-0.237	0.000	0.294	C
1994	0.000	0.000	0.000	0.000	0.353	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.246	0.000	0.301	C
1995	0.000	0.000	0.000	0.000	0.348	0.000	0.000	0.201	0.000	0.000	0.000	-0.273	0.000	0.303	C
1996	0.231	0.000	0.000	0.000	0.358	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.269	0.000	0.302	C
1997	0.229	0.000	0.000	0.000	0.346	0.000	0.000	0.000	0.000	0.234	0.000	0.000	0.000	0.306	C
1998	0.000	0.000	0.000	0.000	0.324	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	C
1999	0.000	0.000	0.000	0.000	0.362	0.000	0.000	0.000	0.000	0.244	0.000	0.000	0.000	0.000	C
2000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.326	0.000	0.000	0.223	0.000	0.234	0.000	0.000	0.000	0.000	C
2001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.339	0.000	0.000	0.220	0.000	0.241	0.000	0.000	0.000	0.000	C
2002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.360	0.000	0.000	0.000	0.000	0.279	0.000	0.000	0.000	0.000	C
2003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.278	0.000	0.000	0.000	0.000	C
2004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.376	0.000	0.000	0.000	0.000	0.319	0.000	0.000	0.000	0.000	C

Références bibliographiques de base
(d'après <http://web.utk.edu/~grissino/references.htm>)

Title: Tree-Ring Dating and Archaeology

Author: Michael G.L. Baillie

Year: 1982

Publisher: Chicago, IL: The University of Chicago Press. 274 pp.

Comments: A classic work on the development of the millennial-length oak tree-ring chronology from Ireland and Northern Ireland. Details much of the dissertation work by Dr. Baillie. Easy to read, moderately technical in some portions. Unfortunately, this is out of print, but you should be able to find it in any of several online bookstores.

Title: Methods of Dendrochronology - Applications in the Environmental Sciences

Author: edited by Edward R. Cook and Leonardas A. Kairiukstis

Year: 1990

Publisher: Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers and International Institute for Applied Systems Analysis. 394 pp.

Comments: Contains 45 chapters written by the most famous of dendrochronologists, covering all subjects of dendrochronology, including data gathering, statistical analysis, and environmental relations. Moderately to very technical. Currently available from the publisher (hint: use the IIASA link).

Title: Tree Rings and Climate

Author: Harold C. Fritts

Year: 1976

Publisher: New York, NY: Academic Press. 567 pp.

Comments: Perhaps the most cited reference in all of dendrochronology. Everything you need to know about the climate/tree growth relationship is here, including response functions, reconstructions of climate, and basic tree physiology concerning the formation of annual rings. And, it is being brought back into print by Blackburn Press! Moderately technical.

Title: Climate from Tree Rings

Author: edited by Malcolm K. Hughes, P.M. Kelly, Jon R. Pilcher, and Valmore C. LaMarche, Jr.

Year: 1980

Publisher: New York, NY: Cambridge University Press. 223 pp.

Comments: Contains some of the classic references in dendrochronology by over 50 authors. This volume is most valuable in its analyses of geographic locations, where dendrochronology has been practiced and where it is feasible. Unfortunately, this book is out of print, but should be available at most university libraries. Moderately technical.

Title: Multilingual Glossary of Dendrochronology

Author: Michele Kaennel and Fritz H. Schweingruber

Year: 1995

Publisher: Berne, Switzerland: Paul Haupt Publishers. 467 pp.

Comments: A wealth of information, this book contains several hundred definitions of terms used in dendrochronology, and provides German, French, Spanish, Italian, Portuguese, and Russian translations! Contains many references, figures, and a list of species. Easy to read, for all age classes.

Title: Tree Rings: Basics and Applications of Dendrochronology

Author: Fritz H. Schweingruber

Year: 1987

Publisher: Dordrecht, The Netherlands: D. Reidel Publishing Company. 276 pp.

Comments: Beautifully illustrated, this book is well written and easily understandable by those in all levels of education. Literally covers all topics related to dendrochronology. Easy to read, for all age classes.

Title: Trees and Wood in Dendrochronology

Author: Fritz H. Schweingruber

Year: 1993

Publisher: Berlin, Germany: Springer-Verlag. 402 pp.

Comments: This book provides enormous information, using numerous photographs, on the "...morphological, anatomical, and tree-ring analytical characteristics of trees frequently used in dendrochronology." Easy to read, only moderately difficult in some portions. Available still from the publisher.

Title: An Introduction to Tree Ring Dating

Authors: Marvin A. Stokes and Terah L. Smiley

Year: 1968 and 1996

Publisher: Chicago, IL: The University of Chicago Press. 73 pp. Re-published by The University of Arizona Press.

Comments: Another of the most cited references, this book provides well-illustrated information about the very basics of dendrochronology, for example, mounting cores and creating skeleton plots. Easy to read, for all age classes.

Title: Measuring growth and development of stems

Authors: Frank W. Telewski and Ann M. Lynch

Year: 1991

Publisher: In Lassoie, J.P., and Hinckley, T.M., eds., Techniques and Approaches in Forest Tree Ecophysiology. CRC Press, Boca Raton: 503-555.

Comments: A wonderful, well-illustrated, general article that will be appealing to a wide variety of people, from high schoolers to university professors. Discusses overall stem growth of trees, measurements of radial growth, stem analysis, cambial marking, instrumentation, and microdensitometry, to name a few subjects. Moderately technical.

BECKER M. - Bilan de santé actuel et rétrospectif du sapin (*Abies alba* Mill) dans les Vosges. Etude écologique et dendrochronologique. - *Annales des Sciences Forestières*, vol. 44, n° 4, 1987, pp. 379-402.

BECKER M. - The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of northeastern France. - *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 19, n° 1989, pp. 1110-1117.

BECKER M., BERT D., BOUCHON J., PICARD J.F., ULRICH E. - Growth trends in various broadleaved and coniferous trees in Northeastern France from the mid 19th century. - *In Functioning and dynamics of natural and perturbed ecosystems.*, vol. n° 1995a, pp. 35-48.

BECKER M., BERT D., BOUCHON J., DUPOUEY J.L., PICARD J.F., ULRICH E. - Long term changes in Forest Productivity : the Dendroecological Approach. - *in Forest decline and air pollution effects in the French mountains*, vol. n° 1995b, pp. 1-12.

BONTEMPS J.D. - Evolution de la productivité des peuplements réguliers et monospécifiques de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et de chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) dans la moitié Nord de la France au cours du XXIème siècle. - *Thèse ENGREF*, vol. n° 2006, pp. 357 pages.

BONTEMPS J.D., HERVÉ J.C., DHÔTE J.F. - Long-Term Changes in Forest Productivity: A Consistent Assessment in Even-Aged Stands. - *Forest Science*, vol. 55, n° 6, 2009, pp. 549-564.

BONTEMPS J.D., VALLET P., HERVÉ J.C., RITTIÉ D., DUPOUEY J.L., DHÔTE J.F. - Des hêtraies qui poussent de plus en plus vite : vers une forte diminution de leur âge d'exploitabilité. - *Revue Forestière Française*, vol. 52, n° 2, 2005, pp. 123-142.

BÜNTGEN U., FRANK D., WILSON R., CARRER M., URBINATI C. - Testing for tree-ring divergence in the European Alps. - *Global Change Biology*, vol. 14, n° 10, 2008, pp. 2443-2453.

- COOK E.R. - The decomposition of tree ring series for environmental studies. - *Tree-ring Bulletin*, vol. 47, n° 1987, pp. 37-59.
- COOK E.R. - A conceptual linear aggregate model for tree rings. - in *Methods of dendrochronology : Applications in the environmental sciences* Kluwer Academic Publishers COOK ER KAIRIUKSTIS LA (eds), vol. n° 1990, pp. 98-104.
- COOK E.R., KAIRIUKSTIS L.A.E. - Methods of dendrochronology : Applications in the environmental sciences. - *Kluwer Academic Publishers*, vol. 394 p, n° 1990, pp.
- D'ARRIGO R., WILSON R., LIEPERT B., CHERUBINI P. - On the 'Divergence Problem' in Northern Forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes. - *Global and Planetary Change*, vol. 60, n° 3-4, 2008, pp. 289-305.
- DOUGLASS A.E. - Tree rings and chronology. - *University of Arizona Bulletin*, vol. 8, n° 4, 1937, pp. 1-36.
- FRITTS H.C. - Tree-ring and climate. - *New York, Academic Press*, vol. n° 1976, pp. 576.
- LEBOURGEOIS F. - RENECOFOR - Etude dendrochronologique des 102 peuplements du réseau. - vol. n° 1997, pp. 307.
- LEBOURGEOIS F. - Analyse du bilan hydrique et de la croissance des arbres dans le RENECOFOR. - *Rapport scientifique final, Union Européenne, DG VI, projet n° 9760FR0030, INRA - CEE - Unité d'Ecophysiologie Forestière*, vol. n° 1999, pp. 72 pages.
- LEBOURGEOIS F. - Approche dendroécologique de la sensibilité du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) au climat en France et en Europe. - *Revue Forestière Française*, vol. 57, n° 1, 2005, pp. 33-50.
- LEBOURGEOIS F. - Sensibilité au climat des chênes sessile et pédonculé dans le réseau RENECOFOR. Comparaison avec les hêtraies. - *Revue Forestière Française*, vol. 53, n° 1, 2006a, pp. 29-44.
- LEBOURGEOIS F. - Réponse au climat du sapin (*Abies alba* Mill) et de l'épicéa commun (*Picea abies* Karst.) dans le réseau RENECOFOR. - *Revue Forestière Française*, vol. 58, n° 5, 2006b, pp. 419-432.
- LEBOURGEOIS F. - Climatic signal in annual growth variation of Silver Fir (*Abies alba* Mill.) and Spruce (*Picea abies* Karst) from the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). - *Annals of Forest Science*, vol. 64, n° 2007, pp. 333-343.
- LEBOURGEOIS F., COUSSEAU G., DUCOS Y. - Etude d'une chênaie sessiliflore exceptionnelle: la futaie des clos (Sarthe). - *Revue Forestière Française*, vol. 55, n° 3, 2003, pp. 333-346.
- LEBOURGEOIS F., COUSSEAU G., DUCOS Y. - Climate-tree-growth relationships of *Quercus petraea* Mill. stand in the Forest of Berce ("Futaie des Clos", Sarthe, France). - *Annals of Forest Science*, vol. 61, n° 4, 2004, pp. 361-372.
- LEBOURGEOIS F., RATHGEBER C., ULRICH E. - Sensitivity of French temperature coniferous forests to climate variability and extreme events (*Abies alba*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris*). - *Journal of Vegetation Science*, vol. n° 2009, pp. 1-13.
- LEBOURGEOIS F., BRÉDA N., ULRICH E., GRANIER A. - Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). - *Trees*, vol. 19, n° 4, 2005, pp. 385-401.
- LEBOURGEOIS F., BECKER M., CHEVALIER R., DUPOUEY J.L., GILBERT J.M. - Height and radial growth trends of Corsican pine in western France. - *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 30, n° 5, 2000, pp. 712-724.
- MUNAUT A.V. - Recherches dendrochronologiques sur *Pinus sylvestris*. 1. Etude de 45 pins sylvestres récents originaires de Belgique. - *Agricultura*, vol. 14, n° 2, 1966, pp. 193-232.
- MUNAUT A.V. - La dendrochronologie. Une synthèse de ses méthodes et applications. - *Lejeunia*, vol. 91, n° 1978, pp. 1-47.
- NEFAOUI M. - Dendroécologie, productivité et dynamique de la croissance radiale du pin maritime naturel au maroc. - *Thèse Marseille*, vol. 2 tomes, n° 1996, pp. 147 pages et 157 pages.
- SCHULMAN E. - The range of ring sensitivity. - *Tree-ring Bulletin*, vol. 12, n° 1, 1945, pp. 5-8.
- SCHULMAN E. - Dendroclimatic Changes in Semiarid America. - *University of Arizona Press, Tucson, AZ*, vol. n° 1956, pp. 142.
- TESSIER L. - Analyse dendroclimatologique comparée de six populations de *Pinus sylvestris* (L.) dans la Drôme. - *Ecologia Mediterranea*, vol. 8, n° 3, 1982, pp. 185-202.
- TESSIER L. - Approche dendroclimatologique de l'écologie de *Pinus sylvestris* L et *Quercus pubescens* Willd dans le Sud-Est de la France. - *Acta Oecologica*, vol. 7(21), n° 4, 1986, pp. 339-355.
- TESSIER L. - Spatio-temporal analysis of climate-tree ring relationships. - *New Phytol*, vol. 111, n° 1989, pp. 517-529.
- Fritts, H. C., E. A. Vaganov, I. V. Sviderskaya and A. V. Shashkin. 1991. Climatic variation and tree-ring structure in conifers: Empirical and mechanistic models of tree-ring width, number of cells, cell size, cell-wall thickness and wood density. *Climate Research* 1 (2): 97-116

124. Fritts, H. C. and J. S. Dean. 1993. Dendrochronological modeling of the effects of climatic change on tree-ring width chronologies from Chaco Canyon and environs. *Tree Ring Bull.* 52:31-58.

126. Fritts, H. C. and A. V. Shashkin. 1994. Modeling tree-ring structure as related to temperature, precipitation, and day length. In: Lewis, T. E. ed. "Tree Rings as Indicators of Ecosystem Health". CRC Press. Boca Raton. Chapter 2. pp. 17-57.