HAL open science

Dendroécologie du Pin Sylvestre de Mazovie, Pologne

Sébastien Harnist

To cite this version:

Sébastien Harnist. Dendroécologie du Pin Sylvestre de Mazovie, Pologne. Sciences de l'environnement. 2014. hal-02106535

HAL Id: hal-02106535

https://hal.univ-lorraine.fr/hal-02106535v1

Submitted on 23 Apr 2019

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

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

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

AVERTISSEMENT

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

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

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

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

LIENS

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

Année Universitaire 2013/2014

Mémoire de stage

Soutenu publiquement à Nancy le 3 septembre 2014 pour l'obtention du

MASTER 2 FAGE de l'Université de Lorraine

Mention Biologie et Ecologie pour la Forêt, l'Agronomie et l'Environnement

Spécialité Fonctionnement et Gestion des Ecosystèmes - FGE

Dendroécologie du Pin Sylvestre de Mazovie, Pologne :

Influence de l'antécédent cultural sur la macrostructure du bois et la réponse au climat

Par

Sébastien HARNIST

Stage effectué du 1er février au 30 juin 2014

Tuteur universitaire : Pr. Daniel EPRON
Maître de stage : Dr. Inż. Katarzyna MARCISZEWSKA
Head of Department of Forest Botany, Faculty of Forestry
Warsaw University of Life Sciences – WULS/SGGW
Nowoursynowska 159, building 34,
02-776 Warsaw – Poland
phone: (+48) 2259 38021, fax: (+48) 22 59 38022
e-mail: kbl@sggw.pl

SZKOŁA GŁÓWNA GOSPODARSTWA WIEJSKIEGO W WARSZAWIE

SOMMAIRE

TABLE des ILLUSTRATIONS 3

I. INTRODUCTION 4

II. MATERIELS & METHODES 6

1. Site d'étude et plan d'échantillonnage 6

2. Mesure des paramètres de macrostructure du bois 8

3. Interdatation des 40 séries individuelles de croissance 9

4. Standardisation des séries de croissance 11

5. Analyse de la réponse stationnelle 11

6. Analyse de la réponse au climat 12

6.1. Détermination des années caractéristiques

6.2 Fonctions de corrélation linéaire et déterminisme des périodes-clés

III. RESULTATS 13

1. Les chronologies maîtresses pour le pin sylvestre de Mazovie

1.1 La chronologie maîtresse en millimètres de croissance radiale

1.2. Le patron d'évolution de la croissance en fonction de l'âge cambial

1.3. La chronologie maîtresse en indices de croissance

2. Evaluation des paramètres de macrostructure 15

2.1. L'aspect quantitatif : l'accroissement en matière ligneuse

2.2 Le bois juvénile

2.3. La proportion de bois final

3. Analyse climatique 17

3.1. La réponse « normale », détermination des périodes clés

3.2. Les *pointers years*, des marqueurs d'années exceptionnelles

IV. DISCUSSION & CONCLUSION 22

1. Physiologie et auto-écologie du pin sylvestre de Mazovie 22

1.1. Patron de croissance du pin sylvestre

1.2. Exigences climatiques et réaction au climat du pin

1.3. Le comportement spécifique du bois initial et du bois final

2. L'influence du passé agricole *versus* forestier 25

2.1. La sensibilité au climat est modifiée

2.2. Xylogénèse et qualité technologique du bois

3. Conclusion 26

BIBLIOGRAPHIE 27

ANNEXE 1 : Contexte scientifique de l'étude 30

ANNEXE 2 : Paramétrages des logiciels 32

ANNEXE 3 : Principe de la double standardisation 34

TABLE des ILLUSTRATIONS

Liste des figures

Figure 1 : Zone d'étude : les plaines centrales de Mazovie en Pologne.
Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la zone étudiée, Chojnów, Pologne.
Figure 3 : Rondelle aux contours de cernes très irréguliers, avec zone de cernes étroits.
Figure 4 : Comparaison des séries élémentaires issues des deux rayons d'un même arbre.
Figure 5 : Illustration des 3 fréquences de signal sur une chronologie de largeur de cerne.
Figure 6: Chronologie maîtresse de croissance radiale, en mm.
Figure 7 : Courbes "âge régional" figurant les patrons d´évolution de la largeur et de la surface des cernes.
Figure 8 : Chronologie maîtresse pour le pin sylvestre de Mazovie en indices de croissance.
Figure 9: Croissance instantanée par groupe, en indice de croissance.
Figure 10: Boxplot des différences intergroupe des croissances instantanées.
Figure 11: Croissance instantanée relative pour les modalités Agricole (A) et Forêt (F).
Figure 12: Evolution des indices de croissance cumulée en fonction de l'âge cambial.
Figure 13: Période de production du bois juvénile pour chacun des groupes AP,AM, FP et FM.
Figure 14: Evolution de la proportion de bois final en fonction de l'âge cambial.
Figure 15: Coefficients de corrélation cerne-climat de type *Bootstrapped*, entre les largeurs de cerne complet, de bois initial, de bois final ou de proportion de bois final et les régresseurs climatiques mensuels.
Figure 16: Evolution des indices de croissance et des températures moyennes de fin d'hiver.
Figure 17: Climat moyen des *pointer years.*
Figure 18 : Profil d'intensité lumineuse à l'intérieur d'un cerne et méthode de détermination de la limite BI/BF.
Figure 19 : 1ère étape de la double standardisation d'une chronologie de pin sylvestre.
Figure 20 : 2ème étape de la double standardisation.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison intergroupes du nombre de régresseurs intervenant de manière significative dans la relation cerne-climat
Tableau 2 : Ecart relatif moyen pour les années calendaires présentant une forte variation de croissance.
Tableau 3 : Différences intergroupes en terme de nombre de *pointer years* pour 10 ans, et d'écart relatif moyen de ces PY.

I. INTRODUCTION

Le pin sylvestre (*Pinus sylvestris L.*) est l'essence principale en Pologne, tant en surface que par son poids économique. Occupant 80 % de la surface forestière de Mazovie, cette prédominance autorise des firmes comme IKEA à s'y approvisionner abondamment en matière première de qualité, avec des pins aux accroissements fins et réguliers, peu noueux. La forêt polonaise est ainsi spécifique à plus d'un titre : résineuse à 70 %, publique à plus de 80 %, les peuplements y sont traités quasi-exclusivement en futaies régulières monospécifiques, avec plus de 99 % d'espèces autochtones (C.I.L.P, 2012). La forêt bénéficie d'un climat majoritairement continental, avec toutefois des influences océaniques à l'ouest et au bord de la Baltique, des influences montagnardes dans les Carpates (au sud) et hémiboréales au nord-est. Les peuplements de pins sylvestres sont majoritairement régularisés *petit bois / bois moyen* : parce qu'installés à très haute densité (jusqu'à 20 000 plants/ha), ils bénéficient ensuite d'éclaircies prudentes et régulières.

Le contexte forestier polonais est aussi le fruit de l'Histoire. Passant d'un taux de boisement de 40 % en 1920 à 21 % en 1945 (Olszewska & Smal, 2008), la Pologne vit encore aujourd'hui un intense épisode de reboisement. Le « Programme national pour l'augmentation de la couverture forestière » vise un objectif de 33 % de taux de boisement d'ici à 2050 (Dąbrowski, 2002) de manière à assurer la forte demande intérieure en bois d'œuvre. Si bien qu'à l'instar de nombreux pays d'Europe, l'abandon et le boisement des sols agricoles représente le principal changement d'usage des terres dans les dernières décennies (Smal & Olszewska, 2008).

Les industries utilisatrices du bois cherchent à acquérir des produits bruts aux caractéristiques optimales pour une utilisation donnée. La notion de « qualité » d'un bois est très dépendante de ladite utilisation. L'arrivée récente sur le marché de bois d'œuvre provenant de pins issus de boisements agricoles questionne les industriels. Ces pins sont-ils en capacité de fournir un bois aux ***qualités technologiques*** au moins comparables à celui provenant de forêts plus anciennes ? Les sylviculteurs s'interrogent quant à eux sur la capacité de ces boisements à fournir un ***volume de bois*** au moins équivalent. Il apparaît nécessaire d'étudier l'impact du précédant agricole sur la structure du bois de pin sylvestre, car les études sont peu nombreuses et contradictoires : *e.g.* Jelonek et al. (2005) montrent que la densité basale de pins sylvestres poussant sur sols post-agricole est plus élevée que celle de pins provenant de sols typiquement forestiers; tandis que Tomczak & Jelonek (2013) arrivent aux conclusions inverses.

Par contre le lien plus direct entre structure du bois et qualité technologique est bien documenté. Larson et al. (2001) décrit le bois juvénile comme étant caractérisé par une densité plus faible, des trachéides plus courtes et un angle des microfibrilles de cellulose plus important que ceux du bois mature. Toutes ces caractéristiques ont des effets indésirables sur la qualité du bois : baisse des rendements en pâte à papier chimique ou augmentation du retrait axial pour les sciages. Concernant la proportion de bois final, ces auteurs nous confirment que le « *summerwood percentage is the most widely used wood quality characteristic. Because it is highly correlated with wood specific gravity and provides a visual index of strength and structural properties* ».

L'étude du lien entre la structure du bois et les conditions de croissance qui ont abouti à sa mise en place relève du domaine de la dendroécologie. Cette discipline en plein essor se propose notamment d'utiliser la largeur de cerne comme trait facilement mesurable (Fritts, 1976). En zone tempérée, c'est l'arrêt de croissance hivernal dû aux conditions climatiques trop défavorables qui crée une rupture dans la croissance de l'arbre et matérialise ainsi un cerne

annuel. L'assise cambiale, par l'ajout successif de couches centripètes de trachéides, est à l'origine de la formation du bois. La division des cellules initiales du cambium, sous fort contrôle de l'auxine, dure de 75 à 150 jours chez le pin sylvestre (Wodzicki 2001). Puis les trachéides vont croître et subir un processus de maturation au cours de la saison de végétation. Le cerne répond ainsi à des facteurs de croissance interne (notamment le contrôle génétique) et externe à l'arbre (variation interannuelle du climat, photopériode, etc.). Selon le modèle conceptuel proposé par Cook (1987), la largeur de cerne est considéré comme la résultante d'une combinaison linéaire de plusieurs signaux : l'âge, le climat, les conditions stationnelles, les perturbations régionales et un signal aléatoire.

Les techniques de dendroécologie peuvent ainsi éclairer à la fois le rôle de l'antécédent cultural sur la xylogénèse du bois, mais aussi mettre en lumière l'impact du climat. Et dans le contexte actuel de dérive climatique, il est absolument nécessaire de préciser nos connaissances sur l'autoécologie des essences de manière à quantifier la réponse des espèces aux variations du climat. Variations qui, en plus d'un effet direct (levées ou au contraire renforcement de contraintes hydriques ou thermiques) peuvent modifier la hiérarchie des facteurs contrôlant la croissance et faire varier la compétition interspécifique (Mérian, 2012a). Qu'en est-il pour le pin sylvestre ? Le lien croissance-climat a été étudié dans la zone Baltique (Cedro, 2006), hémiboréale (Elferts, 2007) ou montagnarde (Leal et al. 2007, Feliksik 2000) mais peu dans la zone des plaines continentales (Zielski et al. 2010). Une étude locale de la réponse des arbres au climat est pourtant nécessaire pour en améliorer notre compréhension : Neuwirth et al. a en effet montré dans sa méta-analyse de 2007 que pour une même espèce, le changement de lieu ou d'altitude pouvait inverser l'impact d'années climatiques extrêmes. Par ailleurs, Zunde et al. (2008) souligne l'intérêt de distinguer dans les analyses le comportement du bois initial de celui du bois final, ce qui a été peu fait jusqu'à présent.

Ainsi, au vu des éléments développés ci-dessus, nous avons cherché à identifier le patron de croissance radiale du pin sylvestre, à préciser l'importance du bois juvénile et celui du bois final dans le bois produit. L'utilisation de techniques de dendrochronologie nous a permis en même temps de caractériser la réaction du pin face à la variabilité du climat, tant en années normales que pendant les années aux conditions climatiques extrêmes. Ces connaissances acquises combleront en partie nos lacunes concernant **la physiologie du pin sylvestre dans le contexte climatique et édaphique de la Mazovie.**

Pour mener à bien ce **premier axe de recherche**, il est nécessaire de :

- **1.** Construire la chronologie maîtresse pour le pin sylvestre de Mazovie,

ce qui nous permettra de répondre aux questions de recherche suivantes :

- **2.** Quelles sont les périodes-clés déterminantes pour la largeur de cerne ?
- **3.** Quelles sont les années caractéristiques (*i.e.* extrêmes) pour le pin sylvestre ?
- **4.** Les compartiments de bois initial et de bois final ont-ils un comportement différent en terme de réponse au climat ?

Cette première étape ayant précisé les exigences écologiques du pin sylvestre et certains aspects de sa physiologie, nous pouvons aborder une problématique plus fine : **l'influence de l'antécédent cultural** à la fois sur la réponse au climat et sur la xylogénèse. En effet, l'hypothèse de travail principale considère que les conditions pédologiques sont plus défavorables pour les peuplements issus du boisement de sols agricoles, que pour des

reboisements forestiers. La semelle de labour, la rémanence des produits chimiques et l'absence de mycorhize constitueraient un milieu stressant propre à minimiser la croissance en volume ; mais aurait aussi pour conséquence de modifier la structure du bois, et subséquemment ses propriétés technologiques. Ces conditions édaphiques défavorables devraient également conférer une sensibilité climatique plus grande aux peuplements installés sur sols agricoles.

Une étude comparée visait à tester cette hypothèse. Elle adressait les questions suivantes :

- **5.** L'antécédent cultural (et la trophie du sol) ont-ils un effet sur la quantité et la qualité du bois produite, en terme de croissance radiale, proportion de bois final et quantité de bois juvénile ?

- **6.** L'antécédent cultural (et la trophie du sol) induisent-ils une réaction différente des arbres face aux variations interannuelles du climat ?

Cette évaluation de **l'impact de l'antécédent cultural** constitue le **deuxième axe de recherche**. L'objectif opérationnel étant d'orienter la récolte des arbres vers du bois aux qualités spécifiques et précisées, dans un contexte où, de toute façon, l'on va devoir continuer à boiser des terres agricoles.

Ce projet a été mené au laboratoire du Département de Botanique de la Faculté Forestière de l'Université des Sciences de la Vie de Varsovie - SGGW, en Pologne. Car ce département traite traditionnellement les problématiques impliquant l'activité cambiale et donc ses productions, telles que le bois juvénile et le bois final. Se reporter à **l'Annexe 1** pour une vue d'ensemble de la recherche forestière en Pologne, une description plus détaillée de la structure d'accueil ou bien encore l'imbrication de mon travail au sein du projet financé par une subvention du Centre National de la Recherche Scientifique.

II. MATERIELS & METHODES

1. Site d'étude et plan d'échantillonnage

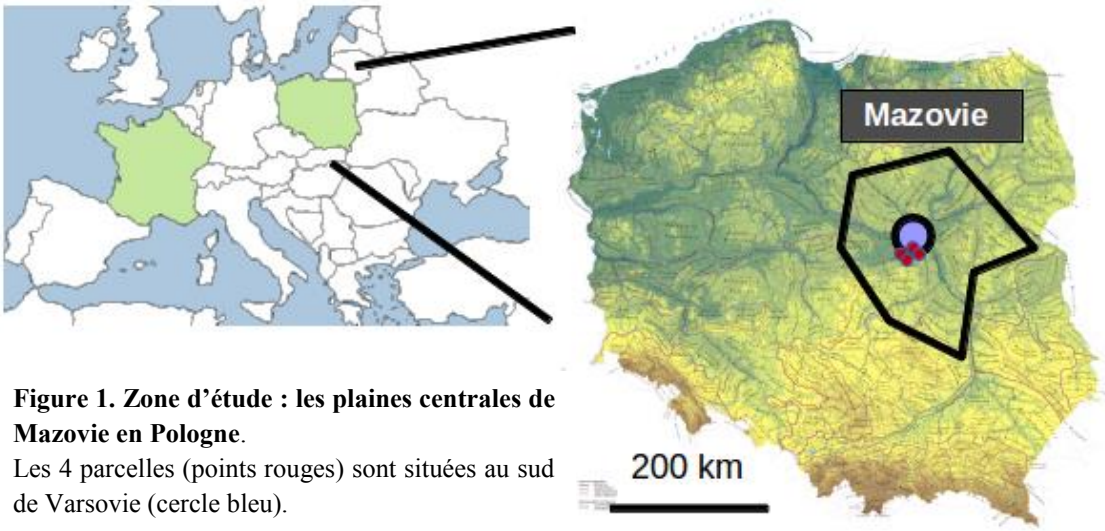


Figure 1. Zone d'étude : les plaines centrales de Mazovie en Pologne.
Les 4 parcelles (points rouges) sont situées au sud de Varsovie (cercle bleu).

Notre site d'étude comprend 4 peuplements adultes de pins sylvestres (*Pinus sylvestris* L.) du même district forestier de Chojnów, à 25 km au sud de Varsovie, en Mazovie, Pologne (N52°2'21", E21°5'19", altitude 120 m) (**fig. 1**). Toutes les parcelles ont été gérées de manière continue par le gestionnaire public *Państwowe Gospodarstwo Leśne*. La sylviculture appliquée est caractéristique de l'ensemble des plaines de Pologne centrale, avec un reboisement à très haute densité (20000 plants/ha) pour améliorer la rectitude et la branchaison défectueuse du pin, suivi d'éclaircies régulières « par le bas », tous les 5 à 7 ans, supprimant les arbres dominés. Si bien qu'à un âge de 75 ans en moyenne, ces peuplements présentent une strate unique d'arbres dominants et co-dominants.

Nous étudions l'effet de 2 facteurs à 2 modalités:

- Un facteur « occupation antérieure du sol » : terre agricole **(A)** *versus* statut forestier permanent depuis plus de 100 ans **(F)**. C'est le facteur d'intérêt.
- Pour élargir la représentativité de l'étude, et mettre en évidence d'éventuelles interactions, un second facteur « type phytosociologique de peuplement », *proxy* du niveau trophique, a été pris en compte : *Pineraie Pure* (*Pauvre*) **(P)** *versus Pineraie Mixte* (plus *Mésotrophe*) **(M)**.

Les 4 parcelles correspondent aux 4 groupes issus du croisement de ces deux facteurs : **AP**, **AM**, **FP** et **FM**. Les sols y sont classés respectivement *Haplic Arenosols* (AP), *Brunic Arenosols* (AM et FP) et *Haplic Podzols* (FM) selon la WRB (2006).

Le climat de la zone d'étude est continental, avec de fortes amplitudes thermiques annuelles et de faibles précipitations hivernales. Ainsi, bien que le volume annuel de précipitations soit limité (509 ± 76 mm), 65% tombe pendant la saison de végétation (**fig. 2**). Les données de somme de précipitations mensuelles et de température moyenne mensuelle proviennent de données gridées pour la période 1910-2002, avec un point à Chojnów (17 km de la parcelle la plus éloignée) et d'une station météo proche de la zone d'étude : Warszawa-Okęcie pour la période 2003-2010 (27 km).

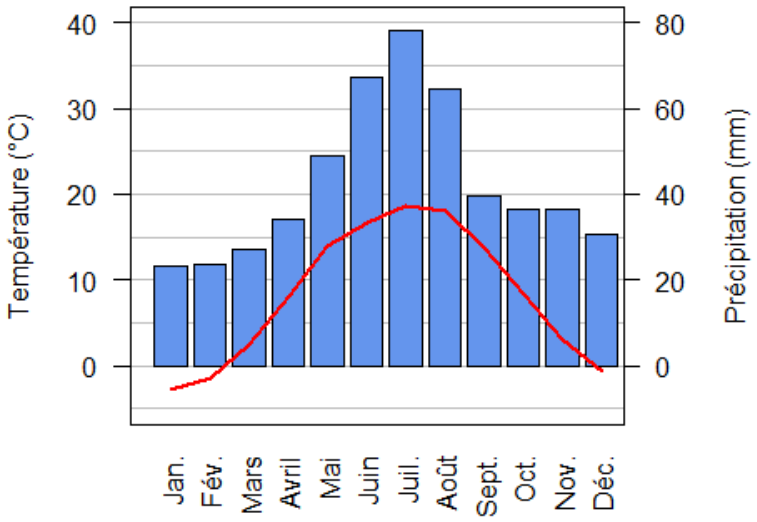


Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la zone étudiée, Chojnów, Pologne. Les moyennes mensuelles des précipitations (en mm; histogramme) et des températures (en ^{0}C; ligne continue) ont été calculées pour la période 1910-2010.

Dans chacun des 4 peuplements, 10 arbres représentatifs de l'arbre moyen ont été choisis, en excluant donc les diamètres les plus faibles ou les plus forts. Ces peuplements régularisés permettent de n'échantillonner que des arbres (co-)dominants, et ainsi de s'affranchir des variations de croissance dues à la position sociale des tiges, qui est réputée avoir un effet fort sur la croissance radiale (Mérian & Lebourgeois, 2011). Mérian (2012a) nous confirme que 10 arbres par groupe pour les essences héliophiles (*e.g.* le pin sylvestre) sont suffisants pour construire une chronologie moyenne de croissance représentative.

Ces 40 arbres présentent une hauteur moyenne de 21,6 ± 1,1 m ; un diamètre à hauteur d'homme (DBH) de 25,8 ± 4,9 cm pour un âge moyen de 75 ± 12 ans. Seul le groupe FM diffère, parce que plus vieux (94 ± 5 ans) et donc présentant un DBH également plus fort 32,7 ± 4,4 cm. Les 3 autres groupes ayant des caractéristiques très similaires : 68 ± 2,6 ans pour 23,5 ± 2,2 cm.

Cette différence d'âge entre les groupes doit être prise en compte. Pour éviter tout biais, les analyses ne concerneront que la période commune la plus longue, soit la période de 1946 à 2010 si nous étudions les phénomènes concernant l'année calendaire ; ou les 65 premières années pour l'étude de l'âge cambial. L'ensemble des analyses et traitements graphiques ont été menés avec R (*Development Core Team*, 2014), sous un risque alpha de 5 %.

2. La mesure des paramètres de macrostructure du bois

Sur chacun de ces 40 arbres, une rondelle de bois de quelques cm d'épaisseur fût prélevée à hauteur d'homme durant l'été 2011. Le dernier cerne complet correspond donc à la saison de végétation 2010. Cette technique d'échantillonnage, bien que destructive, permet une très bonne estimation de la variabilité intra-arbre, ainsi qu'une détection plus facile des faux-cernes et cernes nuls.

Ces 40 rondelles furent surfacées au papier de verre puis scannées à une résolution de 800 dpi, en couleur ; le scanner de marque Epson étant accouplé au logiciel WinDENDRO. A des fins d'analyse en laboratoire de la *structure interne* du bois, un rayon de 2 cm de large fut prélevé sur le diamètre minimisant à la fois le bois de réaction et l'excentricité. Ce diamètre aux accroissements *moyens* pour la rondelle permet de refléter plus fidèlement les effets des conditions pédo-climatiques. La mesure des paramètres de *macro-structure* s'est donc effectuée le long des deux rayons de ce diamètre particulier. Mérian (2013) a montré que deux rayons par pin sylvestre étaient suffisants pour assurer une bonne représentativité de la chronologie maîtresse.

J'ai donc positionné le long de ce diamètre 12 000 limites de cernes et de bois initial / bois final (BI/BF) à l'aide de WinDENDRO (version Density 2012a, Régent Instruments, Canada). La valeur des largeurs d'accroissement est donnée au 1/100ème de mm le plus proche. WinDENDRO permet, grâce aux contrastes de couleurs, une détection semi-automatique, mais qui nécessite d'être corrigée. Par ailleurs, une observation préliminaire de la rondelle est utile pour détecter des cernes étroits qui seraient présents hors du rayon pris en compte par WinDENDRO (le « *path* ») (**fig. 3**).

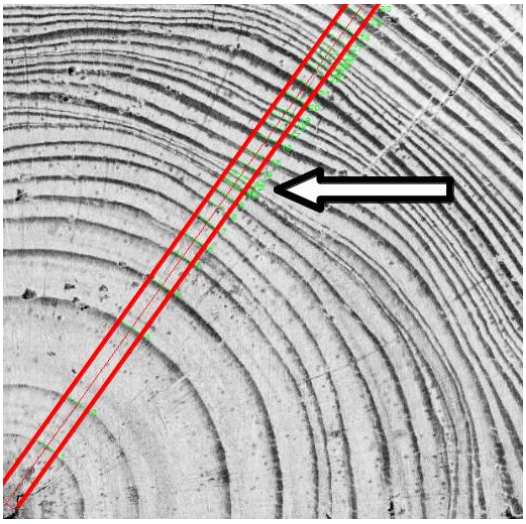


Figure 3 : Exemple de rondelle aux contours de cernes très irréguliers. La bande rouge correspond à la zone de travail de WinDENDRO (le *path*). La flèche indique une zone de cernes étroits difficilement distinguable à l'endroit du *path*.

La détermination de la limite entre la zone de bois initial et celle de bois final présente de réelles difficultés, car les caractéristiques du bois évoluent ici de façon progressive, plutôt que de façon discrète (Koubaa et al. 2002). Le bois initial a des trachéides aux parois minces et à large lumen ; de faible densité il apparaît clair. Tandis que le bois final, de plus forte densité, présente des trachéides aux épaisses parois lignifiées et apparaît plus sombre. Cette

différence de teinte a permis à WinDENDRO de positionner la limite BI/BF à l'intérieur de chaque cerne annuel selon la méthode de seuil relatif (**Annexe 2**). Après la détection complète des 40 rondelles, j'ai procédé à la réévaluation de la limite BI/BF des 15 premières rondelles, de manière à assurer une constance d'évaluation de cette limite subjective, notamment en macroscopie. Le paramètre BI/BF va permettre de calculer les valeurs absolues et les proportions de bois initial et de bois final dans chaque cerne, et pour chaque arbre.

WinDENDRO construit une série élémentaire de croissance pour chaque rayon, en portant la largeur de cerne annuelle le long des années successives. Le logiciel permet de comparer aisément les deux séries élémentaires d'un même arbre (**fig. 4**). Cette méthode visuelle permet de s'assurer de leur parfait synchronisme, *i.e.* un nombre de cernes identique et une même année de formation attribuée à chacun des cernes.

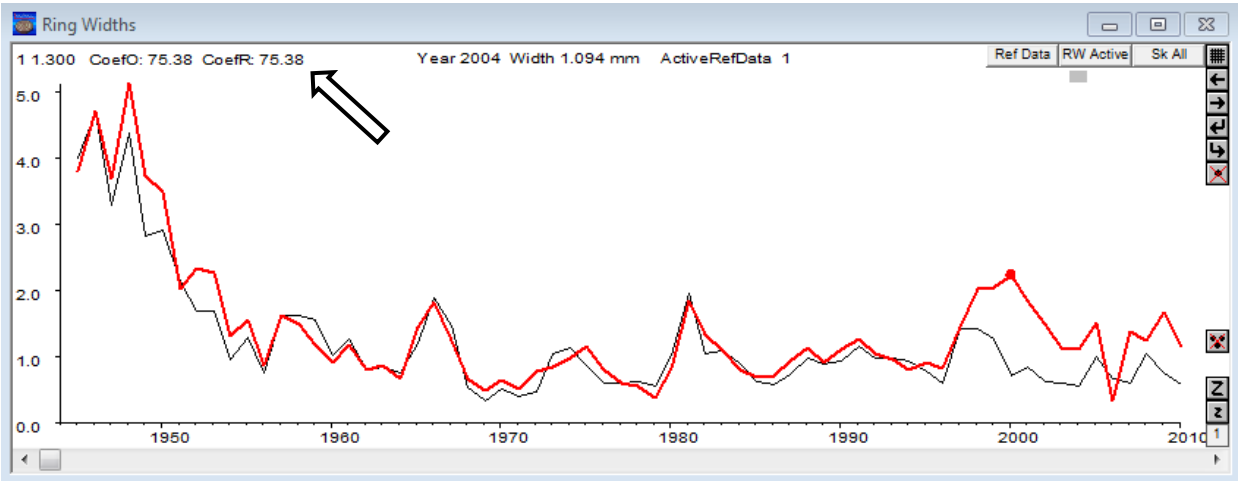


Figure 4 : Comparaison des séries élémentaires issues des deux rayons d'un même arbre, à l'aide de WinDendro. La largeur de cerne (mm) est portée en fonction des années calendaires. Remarquez le coefficient de variation parralèle (GLK, flèche): 75,38 % de similarité entre les deux courbes.

Le travail sur rondelles complètes et non sur carottes permet de facilement corriger un décalage, puisqu'il est aisé de suivre un cerne le long de sa périphérie. Si la concordance est bonne, les 2 séries élémentaires par rondelle sont sommées quadratiquement (Saint André, 1998) pour obtenir les 40 séries de croissance individuelles brute, en mm en fonction des années. A ce stade de l'analyse, il est impératif de vérifier qu'à chaque cerne des séries de croissance est attribuée son année exacte d'élaboration. Cette étape essentielle est appelée **interdatation** (ou *crossdating*).

Ainsi, après la mesure des différents paramètres de structure et l'interdatation des séries individuelles entre elles, le traitement complet du dossier dendro-écologique visera à vérifier la qualité de cette interdatation, à procéder à la standardisation (*i.e.* indexation et *detrending*) et finalement à analyser les séries obtenues.

3. L'interdatation des 40 séries individuelles de croissance

Sachant que le pin sylvestre produit généralement un cerne par année et connaissant la dernière saison de végétation avant l'abattage, il est possible d'associer une année calendaire à chaque cerne depuis l'écorce jusqu'à la moelle. Ici, le cerne complet le plus récent date de 2010, et les cernes les plus anciens varient avec l'âge des arbres, soit de 1910 à 1946. L'interdatation

est une technique constamment utilisée en dendrochronologie, car le schéma « un cerne par année » est mis à mal dans 3 cas de figures :

- les erreurs de saisie : omission d'un cerne ou au contraire imputation d'un doublon ;
- la présence de faux-cerne (ou double-cerne, *i.e.* un cerne présentant un double anneau de bois final la même année), comme cela se produit parfois pour les pins sylvestres croissant en plaine (Schoch et al., 2004) ;
- la présence de cernes nuls, ou bien incomplets et absents à l'endroit de la mesure (**fig.3**). Il est impératif de les déceler sous peine de désynchroniser toute la série des cernes antérieurs.

L'interdatation, ou synchronisation des séries de croissance, repose sur l'existence d'années caractéristiques, aux conditions de croissance particulièrement favorable ou défavorable pour une essence donnée. Cette variation interannuelle des conditions climatiques va marquer dans le bois une variation de la largeur du cerne. Quand ces variations sont extrêmes, on postule que l'ensemble des arbres soumis au climat régional vont être affectés de la même manière, en produisant des cernes plus larges ou plus fins que la moyenne. **Cette variation synchrone de la réponse des arbres aux variations du climat fournit des repères chronologiques communs (**les années caractéristiques, ou ***pointer years*** - PY de la littérature**) qui permettent d'interdater les différentes séries de croissance.** Des cernes nuls ont donc toutes les chances d'être présents lors de *pointer years* à la croissance particulièrement faible.

L'interdatation proprement dite consiste donc à vérifier visuellement la correspondance de chaque série avec la série maîtresse obtenue en moyennant l'ensemble des 40 séries individuelles. Cette série maîtresse est temporaire. WinDENDRO offre pour cette étape la possibilité de faire défiler horizontalement et dans les deux sens chacun des profils, d'ajouter des cernes nuls ou d'en supprimer. Si un décalage est observé, la rondelle en cause est réexaminée et les diverses hypothèses de correction testées, avec, *in fine*, correction des données initiales (*i.e.* le nombre et la position des cernes). WinDENDRO affiche aussi le **coefficient de variation parallèle (GLK %** = *Gleichlaüfigkeit*) proposé par Eckstein et Bauch (1969)(fléché sur la **fig. 4**). Le GLK % est un coefficient de corrélation basé sur *le sens* de l'accroissement annuel entre deux cernes successifs (positif, négatif ou nul). Le GLK % est intéressant à observer entre la série à inter-dater et la série de référence, car il permet une pré-évaluation numérique, objective, de la similarité de deux courbes, en terme de patron d'évolution.

La série maîtresse moyenne n'était que temporaire, car une fois les modifications faites dans les séries individuelles, elle doit être recalculée. **Quand tous les profils ont été inter-datés, la qualité de cette inter-datation est évaluée grâce à COFECHA** (Holmes, 1986). Ce logiciel est un outil d'aide à la décision à la démarche purement statistique (paramétrages en **Annexe 2**). Chaque point suspect soulevé par COFECHA fut vérifié avec la fenêtre graphique de WinDENDRO et parfois à l'aide des photos prises au microscope électronique (x400) ; notamment pour les cernes sis près de la moelle. De la même manière que précédemment, la procédure est réitérative, et un second test COFECHA fut mené pour valider les quelques modifications. Aucune amélioration n'étant plus réalisable, la procédure de vérification s'arrête là et les mesures sont réputées correctes.

L'on a pu dès lors calculer une **chronologie maîtresse définitive** *(question de recherche* n^0***1)*** à partir des 40 séries de croissances individuelles ; en plus d'une série de croissance pour chacun des 4 groupes, qui moyennent chacune 10 arbres. Comme il n'y pas lieu de suspecter ici des valeurs aberrantes, la moyenne employée fut une simple moyenne arithmétique.

4. Standardisation des séries individuelles de croissance

Les séries de croissance contiennent l'expression de l'influence de plusieurs éléments, chacun portant une part de la variance des largeurs de cerne. Ces éléments, selon le but de l'étude, constitue un *signal* que l'on cherchera à amplifier, ou au contraire un *bruit* que l'on cherchera à éliminer. **La standardisation**, au travers des procédures combinées d'indexation et d'élimination de la tendance (*detrending* de la littérature) est là pour y parvenir.

En accord avec Becker et al. (1987), **l'indexation** *i.e.* la transformation en indice de croissance, consiste à diviser les données mesurées par les données des courbes ajustées (valeurs prédites) ; afin d'obtenir une série d'indices sans unités, de moyenne 1 et de variance plus ou moins constante. **Le *detrending*** consiste à extraire la composante tendancielle d'une série temporelle, par ajustement d'une courbe et indexation en fonction de cette courbe. Une fonction d'ajustement (exponentielle négative, polynôme ou *spline*) permet de retirer sélectivement et successivement les tendances de haute, moyenne et basse fréquence (**fig. 5**).

Nous cherchons ici à répondre à deux types de questions:

(1) Existe-t-il une différence entre les groupes d'arbres en matière de croissance radiale, de proportion de bois final ou de bois juvénile *(question de recherche n^{0}5) ?* La variabilité inter-annuelle due aux facteurs climatiques n'est pas ici un facteur d'intérêt.

(2) Pour l'analyse de la réponse des arbres/groupes au climat *(questions de recherche n^{0}2, 3, 4 et 6)*, on cherche au contraire à mettre en évidence l'effet des variations inter-annuelles du climat sur la croissance, autrement dit le signal haute-fréquence (**fig. 5**).

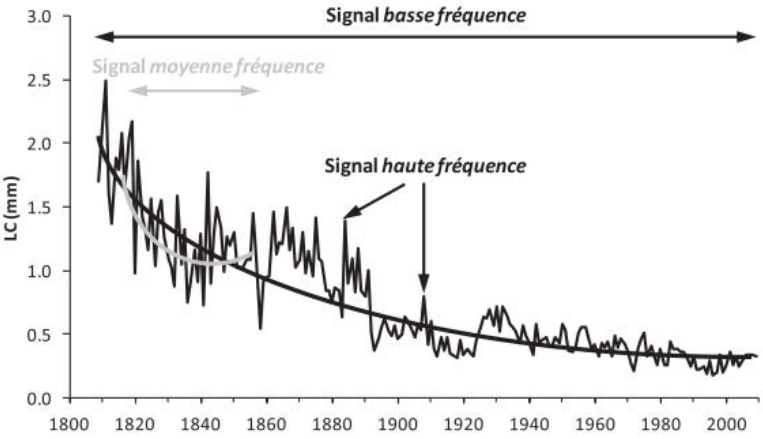


Figure 5 : Illustration des 3 fréquences de signal sur une chronologie de largeur de cerne (LC). Tiré de Mérian (2012a)

Les méthodes pour y répondre sont distinctes mais la première étape fut similaire : il s'agissait de retirer la variabilité dû (i) au vieillissement de l'arbre et (ii) à l'accroissement géométrique du tronc. Car (i) la largeur de cerne diminue quand l'âge physiologique du cambium augmente, et (ii) à surface égale de cerne, la largeur du cerne diminue quand le diamètre de l'arbre augmente.

5. Analyse de la réponse stationnelle

Pour répondre à la question de recherche n^{0}5, interrogeant le lien station-croissance, la 1ère étape consiste à standardiser par une courbe d'âge régional (Badeau et al., 1996). La construction de la courbe revient à calculer la largeur moyenne du cerne pour chaque âge cambial (âge courant de l'arbre quand le cerne est élaboré) ; et ce en prenant en compte l'ensemble des 40 arbres du dispositif, de manière à obtenir une courbe qui reflète l'évolution régionale de la croissance radiale en fonction de l'âge.

Puis chaque largeur de cerne (LC) mesurée est transformée en indice de croissance (IC) selon la relation :

IC (ij) = LC mesurée (ij) / LC prédite par la courbe âge régional ajustée (i)

pour chaque âge cambial (i), et chaque arbre (j). Cette standardisation a l'avantage d'éliminer « sélectivement » le bruit basse-fréquence lié spécifiquement à l'âge et de conserver les autres signaux liés à la date. L'ajustement s'est fait grâce à une exponentielle négative pour les largeurs de cerne, une polynomiale d'ordre 6 pour les surfaces de cerne, et une polynomiale d'ordre 5 pour la proportion de bois final.

Les phénomènes physiologiques liés à l'âge cambial ont été étudiés sur 3 périodes de la vie des peuplements: la phase d'installation de 0 à 5 ans, puis 2 périodes successives de 30 ans correspondant aux phases « jeune » (5-35 ans) et « adulte » (35-65 ans). Pour des raisons de place et de clarté, nous ne présenterons que les résultats afférents à l'étude des phénomènes physiologiques liés à l'âge cambial ; omettant ceux liés aux années calendaires (climat, attaques d'insectes, etc.).

Obtention et analyse statistique des données de macrostructure

- **Surface de cerne.** L'appréciation du paramètre croissance s'est basé sur l'étude des indices de croissance en surface de cerne plutôt qu'en largeur de cerne. L'utilisation de la surface de cerne permet plus directement d'aboutir à des conclusions touchant au volume, ce qui intéresse les sylviculteurs et les industriels. Le rythme de croissance fut évalué à partir des courbes d'indices de croissance cumulée.

- **Bois juvénile.** En l'absence de méthode standardisée pour déterminer l'âge de transition du bois juvénile au bois mature, Alteyrac et al. (2006) utilise la surface de cerne comme critère discriminant. Le bois juvénile a été ici considéré comme étant le bois proche de la moelle qui présente une largeur de cerne significativement supérieure à celle du bois mature. Cette largeur étant relative, la moyenne de croissance du bois mature pour l'ensemble du dispositif fut donc approchée par itération successives. La valeur haute de l'intervalle de confiance de cette moyenne constitua le seuil de référence pour juger macroscopiquement de l'état « bois juvénile » ou « bois mature » d'un cerne. L'appréciation du paramètre bois juvénile en macroscopie n'a eu qu'un objectif de pré-expérimentation à l'attention du laboratoire en analyse microscopique.

- **La part du bois final dans le cerne.** Ce paramètre, interprété comme le pourcentage de bois final dans le cerne (BF %) a fait l'objet d'une analyse en terme d'âge cambial sur les données brutes en pourcent.

Les comparaisons entre groupes le long des âges cambiaux ont été réalisées par des modèles linéaires mixte généralisé (GLMM). Un facteur aléatoire a été ajouté pour tenir compte de l'auto-corrélation existante entre les largeurs de cernes d'un même arbre. Le modèle incluant les facteurs fixes « années » et l'interaction entre « précédent cultural A/F» et « type de peuplement P/M » expliqua le mieux les données. La procédure de sélection selon le Critère d'Information d'Akaike a permis de le retenir comme le modèle le plus parcimonieux. Ce modèle s'est révélé meilleur que 5 autres modèles testés, y compris le modèle nul. L'étude des effets simples de chacun des facteurs a été menée avec des ANOVA sur chacune des périodes (« installation », « jeune », « adulte » et cycle de 65 ans). Les vérifications des conditions d'application ont impliqués les tests Shapiro-Wilks et Fisher, tandis que les tests post-hoc ont fait appel au Tuckey HSD. L'anova de Kruskall-Wallis fut préférée dans le cas de la croissance cumulée où la tendance n'est pas linéaire.

6. Analyse de la réponse au climat

Cette analyse présente deux volets : **(i)** la réaction moyenne des arbres/groupes au climat avec une mise en évidence au travers de **fonctions de corrélation** entre les séries de croissance

et les séries climatiques ; et **(ii)** la réaction aux événements extrêmes, par **le calcul des années caractéristiques**. Ces analyses distinguent les compartiments de bois initial (BI), bois final (BF) et cerne complet.

Dans les deux cas on cherche à mettre en évidence la variation inter-annuelle de largeur de cerne due au climat. On supprime donc les signaux basse et moyenne fréquence au travers de 2 standardisations successives, grâce au pack DENDRO de Mérian (2012b). L'**Annexe 3** en décrit le principe en détail. Une moyenne arithmétique permet alors d'obtenir une longue série moyennée d'indices de croissance dégagée des signaux non climatiques, que l'on appellera la ***Chronologie Maîtresse en indices de croissance***. Elle sera utilisée pour évaluer la relation cerne-climat.

6.1. Détermination des années caractéristiques

Schweingruber et al. (1990) a montré la pertinence d'utiliser les années caractéristiques (PY ou *pointer years*) pour déterminer les années climatiquement extrêmes pour une essence donnée : les PY sont souvent liées à de fortes sécheresses estivales ou d'intenses froids hivernaux. Le pack POINTER de Mérian (2012b) a permis de déterminer les PY (i) de manière globale pour la zone d'étude, et pour chacun des groupes, (ii) de manière différenciée pour les compartiments BI/BF et le cerne complet.

Une année est réputée PY quand au moins 75 % des arbres de l'échantillon présentent un écart relatif de croissance d'au moins 10 % par rapport à l'année précédente (Becker, 1989). L'année sera dite PY positive en cas d'écart relatif positif, signe d'une croissance forte ; et négative dans le cas contraire. Une année sera d'autant plus caractéristique que l'écart relatif moyen (ERM) est élevé et que le pourcentage d'arbres présentant le même comportement est important.

6.2 Fonctions de corrélation linéaire et déterminisme des périodes-clés

L'analyse de la *réponse moyenne au climat* s'est faite au moyen de fonction de corrélation de type *bootstrapped* pour chacun des groupes, et par compartiment, entre la *Chronologie Maîtresse en indices de croissance* et les données climatiques. L'objectif a été de déterminer les périodes-clés durant lesquelles les précipitations et les températures jouent un rôle important sur le déterminisme de la largeur du cerne et le BF %. Le principe repose sur le calcul successif, *i.e.* régresseur climatique par régresseur climatique, des coefficients de corrélation entre largeur de cerne (ou BF%) et climat.

L'analyse des corrélations s'effectua depuis juillet de l'année précédente jusqu'à septembre de l'année en cours. Cette période permet de prendre en compte les arrières-effets climatiques de l'été/automne précédent sur la mise en place du cerne au printemps suivant. Les paramétrages du pack DENDRO utilisé ici sont présentés en **Annexe 2**.

III. RESULTATS

1. Les chronologies maîtresses pour le pin sylvestre de Mazovie

1.1 La chronologie maîtresse en millimètres de croissance radiale

WinDENDRO permet l'affichage simultané des 40 séries brutes de croissance individuelles, en mm. (**fig. 6**). En se déplaçant vers la gauche du graphique, on y observe un nombre de séries de plus en plus restreint à mesure que celles-ci s'allongent. De telle sorte que

pour construire la chronologie maîtresse nous ne disposons que de 2 arbres en 1910 (âgés de 101 ans), alors que les 40 séries sont disponibles dès 1946 (arbre le plus jeune = 65 ans). La ligne brisée du graphique **6** correspond à la série brute moyenne (en mm) des 40 arbres du dispositif. Les variations extrêmes d'amplitude avant les années 50 sont des artefacts dus aux phénomène « âge cambial » et à l'ajout successif de nouveaux arbres au fur et à mesure des années calendaires. Ces nouveaux arbres ont une croissance initiale plus forte qui déforme la courbe moyenne. La moitié droite à l'inverse, montre une bonne correspondance inter-courbes au niveau des « pics »et des « bosses » (*pointer years*), signe que l'interdatation a été bien menée. L'accroissement radial annuel moyen, calculé avec les 2996 cernes de cette chronologie maîtresse du pin sylvestre de Mazovie est de 1,35 mm.

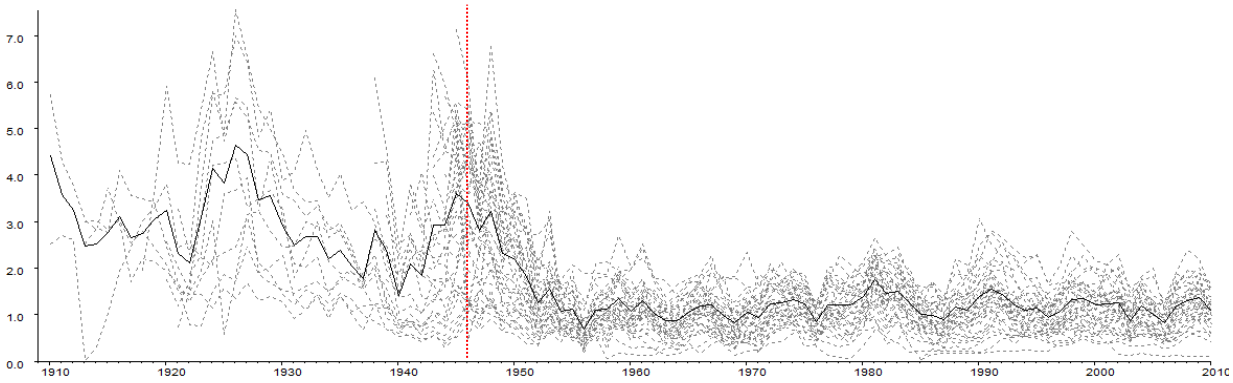


Figure 6: Chronologie maîtresse pour le pin sylvestre de Mazovie, en mm de croissance radiale (ligne) ; et les 40 séries individuelles (pointillés), de 1910 à 2010.

1.2. Le patron d'évolution de la croissance en fonction de l'âge cambial

Ce patron d'évolution est différent, voire opposé, selon que l'on parle de croissance annuelle radiale (mm) ou surfacique (cm^2)(**fig. 7**). La croissance radiale est caractérisée par une phase de croissance juvénile très forte et régulièrement dégressive pendant les 20 premières années. La croissance moyenne y est de 2,06 mm/an. Puis on observe entre 21 et 65 ans un plateau de croissance quasiment constante à 1,14 mm/an ; avec une variation de moins de 0,003 mm/an (régression linéaire, *p-value* = 0,02). Si bien que l'ajustement par une exponentielle négative est très bon (R^2 = 94%) pour rendre compte de ce phénomène biologique de réduction de la largeur du cerne en fonction de l'âge de l'arbre.

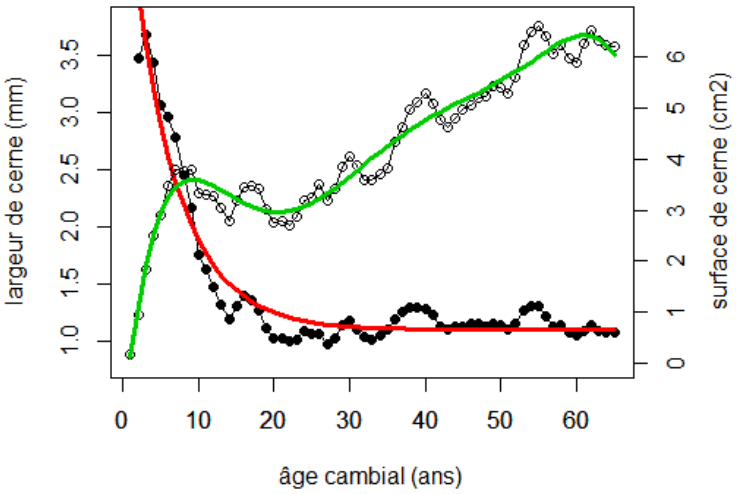


Figure 7 : Courbes "âge régional" figurant le patron d´évolution de la largeur (mm, en rouge) **et de la surface des cernes** (cm^2, en vert) en fonction de l'âge cambial des arbres. Les points figurent les valeurs moyennes pour les 40 arbres et les courbes des fonctions d'ajustement.

A l'inverse, la croissance en surface de cerne montre une augmentation quasiment continue avec l'âge, sans montrer d'effet de plateau, et ce au moins sur les 65 ans de la période. Le taux de croissance initial est très fort les 10 premières années et, après un léger repli, reprend de manière moins prononcée jusqu'à la fin de la période. L'ajustement avec une polynomiale

d'ordre 6 permet de bien exprimer ce patron d'évolution (R^2 = 96 %). La croissance moyenne annuelle en surface est de 4,48 cm^2 de bois.

1.3. La chronologie maîtresse en indices de croissance

Après une double standardisation la chronologie maîtresse en indices de croissance (**fig. 8**) est dérivée de celle en mm (**fig. 6**). Le signal climatique s'y exprimant pleinement, il est aisé d'y reporter les années caractéristiques positives (en vert) et négatives (en rouge). Les *maxima* et *minima* de croissance correspondent respectivement aux années 1981 avec 1,68 mm et 1956 avec 0,61mm.

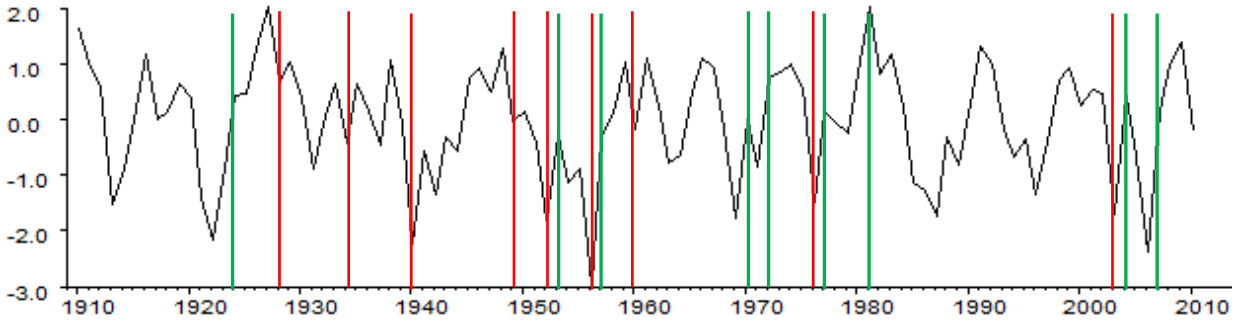


Figure 8 : Chronologie maîtresse pour le pin sylvestre de Mazovie, sur la période 1910-2010**, en indices de croissance** obtenus après double standardisation. Les traits verticaux figurent les *pointer years* positives (vert) et négatives (rouge).

2. Evaluation des paramètres de macro-structure

2.1. L'aspect quantitatif : l'accroissement en matière ligneuse

La croissance annuelle en surface de cerne en fonction de l'âge cambial est présenté **fig. 9**. Sur la période de 65 ans, il existe une différence significative entre les groupes (**fig. 10**). Le groupe FM présente notamment un accroissement moyen de 5,45 cm^2/an ; significativement supérieur de 57 % à l'accroissement du groupe AP (3,48 cm^2/an).

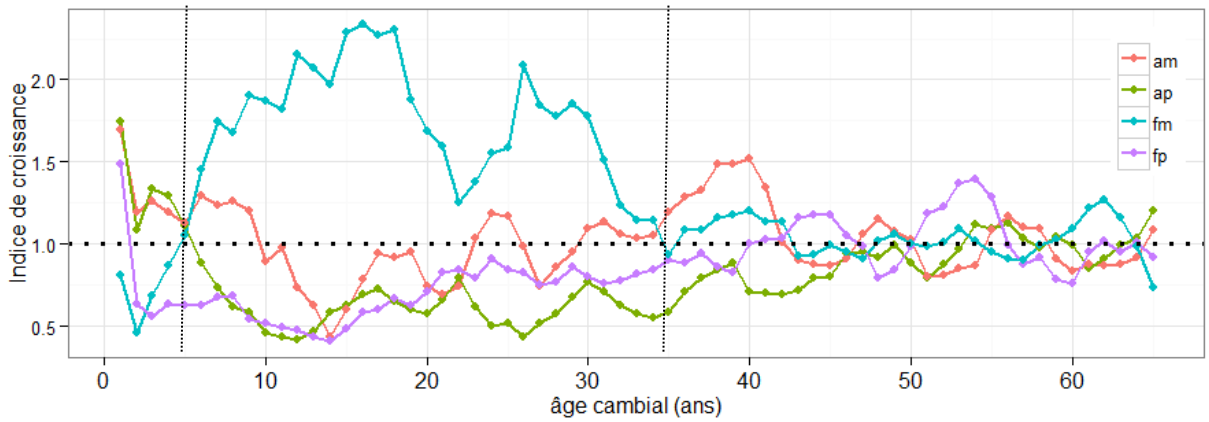


Figure 9: Croissance instantanée par groupe, exprimée en indice de croissance en fonction de l'âge cambial. La ligne pointillée noire horizontale correspond aux valeurs théoriques de la fonction d'ajustement (polynomiale d'ordre 6). Les barres verticales délimitent les 3 stades du peuplement : installation (0-5 ans), jeune (6-35 ans), adulte (36-65 ans).

La prise en compte des différentes phases de vie du peuplement est très instructive. Elle permet de mettre en évidence une variation de la dynamique de croissance instantanée. Pendant

la phase d'installation (0-5 ans), la modalité A (sols agricoles) a une croissance significativement supérieure à F (sols forestiers) (**fig. 11**). Quand le peuplement est jeune, entre 6 et 35 ans, c'est alors la modalité forêt qui a une croissance bien supérieure à la modalité agricole (F=5,63, *p-value* = 0,023). Enfin, passé 35 ans, plus aucune différence significative n'apparaît, que ce soit entre les groupes, ou entre les modalités A/F et même P/M. Cette phase adulte montre une confluence dans la croissance instantanée des différents groupes.

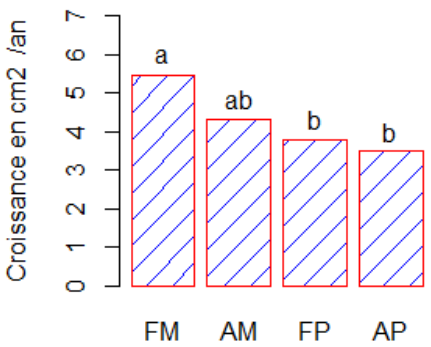


Figure 10: Différentiel intergroupe des croissances instantanées
(F= 4,75; p-value < 0,01)

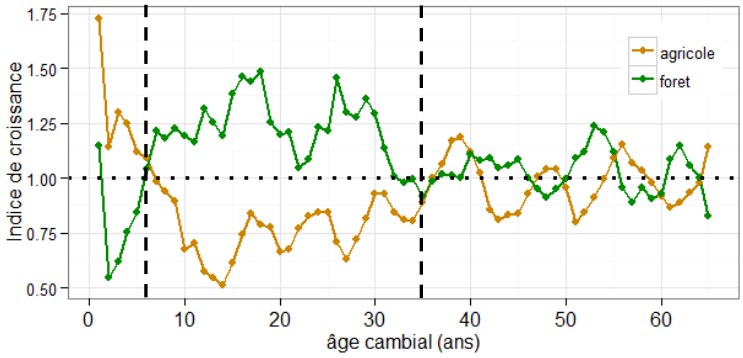


Figure 11: Croissance instantanée relative pour les modalités Agricole (A) et Forêt (F).

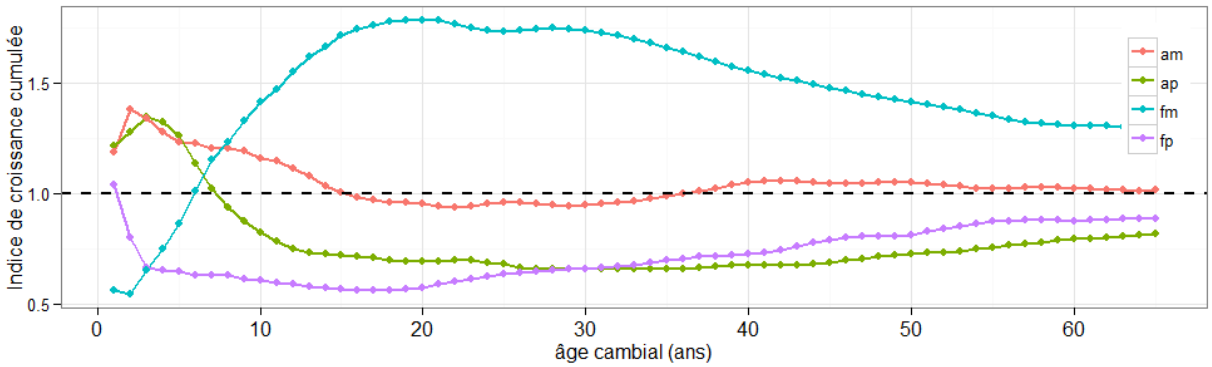


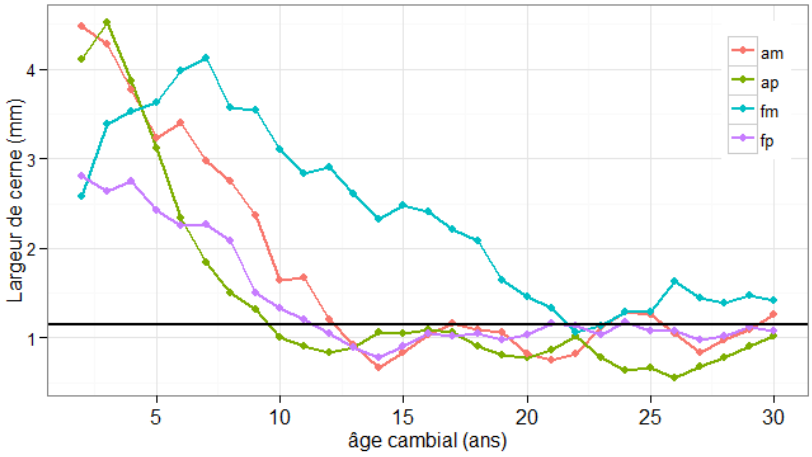
Figure 12: Evolution des indices de croissance cumulée en fonction de l'âge cambial. La croissance cumulée réfère à celle en surface de cerne. La ligne horizontale correspond à la moyenne des 4 courbes.

La **fig. 12** permet quant à elle de bien visualiser la différence de rythme de croissance entre les groupes. Les groupes de sols pauvres (AP et FP) – hormis la phase initiale de croissance forte - montrent une surface de tronc (*i.e.* surface cumulée des cernes) plus faible que AM et surtout FM. Cette différence a tendance à s'atténuer avec le temps. Ainsi, l´écart est maximum à 19 ans, avec un arbre moyen FM à la surface de tronc trois fois plus élevée qu'un arbre du groupe FP (99 cm^2 contre 31 cm^2). Et l'écart relatif est minimum à 65 ans, avec des sections de troncs variant de 226 cm^2 (AP) à 354 cm^2 (FM).

2.2 Le bois juvénile

La première période de la **fig. 7** avec une croissance radiale forte peut être interprétée comme la période de production du bois juvénile. La **fig. 13** nous montre une durée et une amplitude du phénomène qui varie entre les groupes. La droite horizontale y figure le seuil de référence entre bois juvénile et bois mature (1,15mm). Ainsi, les groupes AP, AM, FP et FM commencent à produire du bois mature à partir d'un âge de 10±2,1 ans, 13±1,7 ans, 12±1,4 ans et 22±2,9 ans. Ce qui correspond pour chacun de ces groupes à un noyau de 5,4±1,1 cm, 7,1±1,0 cm, 4,9±0,9 cm et 11,7±3,1 cm de bois juvénile, aux qualités technologiques plus faibles que le reste du tronc.

Figure 13: Evolution de la largeur de cerne (mm) en fonction de l'âge cambial des arbres, **pour chacun des groupes AP,AM,FP et FM**. Zoom de la fig.7 de 0 à 30 ans sur la **période de production du bois juvénile**. La ligne noire figure la valeur haute de l'intervalle de confiance pour la moyenne de la largeur de cerne du bois mature.



2.3. La proportion de bois final

La proportion de bois final dans le pin sylvestre croît fortement avec l'âge de l'arbre, avant de se stabiliser en phase adulte autour de 42 ± 9 % de la largeur du cerne (**fig. 14**). Sur les 65 ans, le groupe FM (34,7%) en produisant significativement moins que les trois autres (38,8%). Mais la réponse au vieillissement n'est pas homogène entre les groupes. Alors que les peuplements en phase d'installation ont globalement un BF % faible (14%), les peuplements jeunes de sols agricoles produisent une proportion de BF plus importante que ceux de sols forestiers (de l'ordre de 11 %, F=7,45, *p-value* = 0,009, **fig. 14**). Dans les peuplements adultes, seule la trophie a un impact significatif, les sols pauvres (P) produisant un BF % plus important que les sols mésotrophes (M)(**fig. 14**).

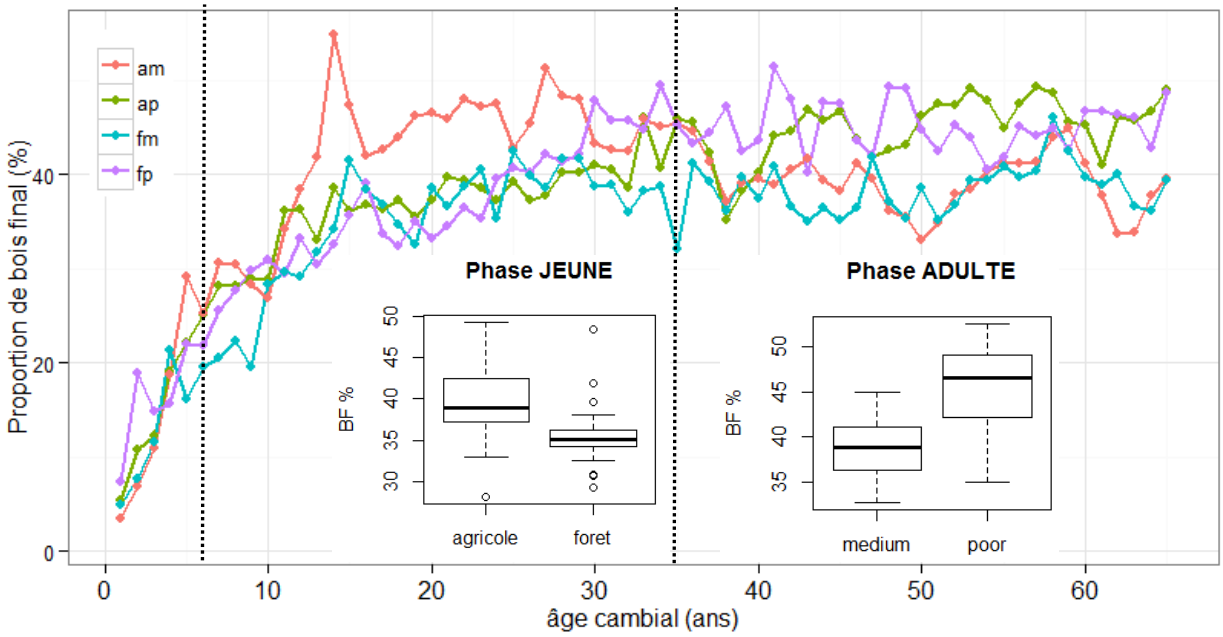


Figure 14: Evolution de la proportion de bois final (en %) en fonction de l'âge cambial, pour chacun des groupes. Et *boxplots* de la proportion de bois final (%) ; comparaison des modalités d'antécédent cultural (agricole/forêt) pour la phase *jeune* (à gauche) ; et niveau de trophie (pauvre/mésotrophe) en phase *adulte* (à droite).

3. Analyse climatique – Réaction des arbres au climat

L'analyse de la réaction des pins sylvestres au climat, tout comme celle des groupes, revêt deux aspects complémentaires : la réaction moyenne face à des conditions climatiques « normales », et la réaction aux années exceptionnelles.

3.1. La réponse « normale », détermination des périodes clés

➢ **Le cerne complet**

La largeur du cerne dépend en partie des facteurs climatiques de l'année et des effets d'arrières-saisons. Les fonctions de corrélation calculées sur le cerne complet et l'ensemble des arbres du dispositif (**fig. 15a**) montrent une prépondérance du facteur température (5 régresseurs climatiques sont significatifs) par rapport au facteur précipitation (3 régresseurs significatifs sur la période juillet année n-1 à septembre année n). Il apparaît que les conditions climatiques d'avril à août indiffèrent le pin sylvestre ; tandis que pour assurer une largeur de cerne importante, les conditions optimales correspondent à un mois de septembre pas trop humide et surtout des températures hivernales douces (décembre à mars, **fig. 16**). Des effets d'arrières-saisons se font sentir : un mois d'août n-1 humide et pas trop chaud, ainsi qu'un mois de novembre humide sont propices à la mise en place d'un cerne large l'année suivante.

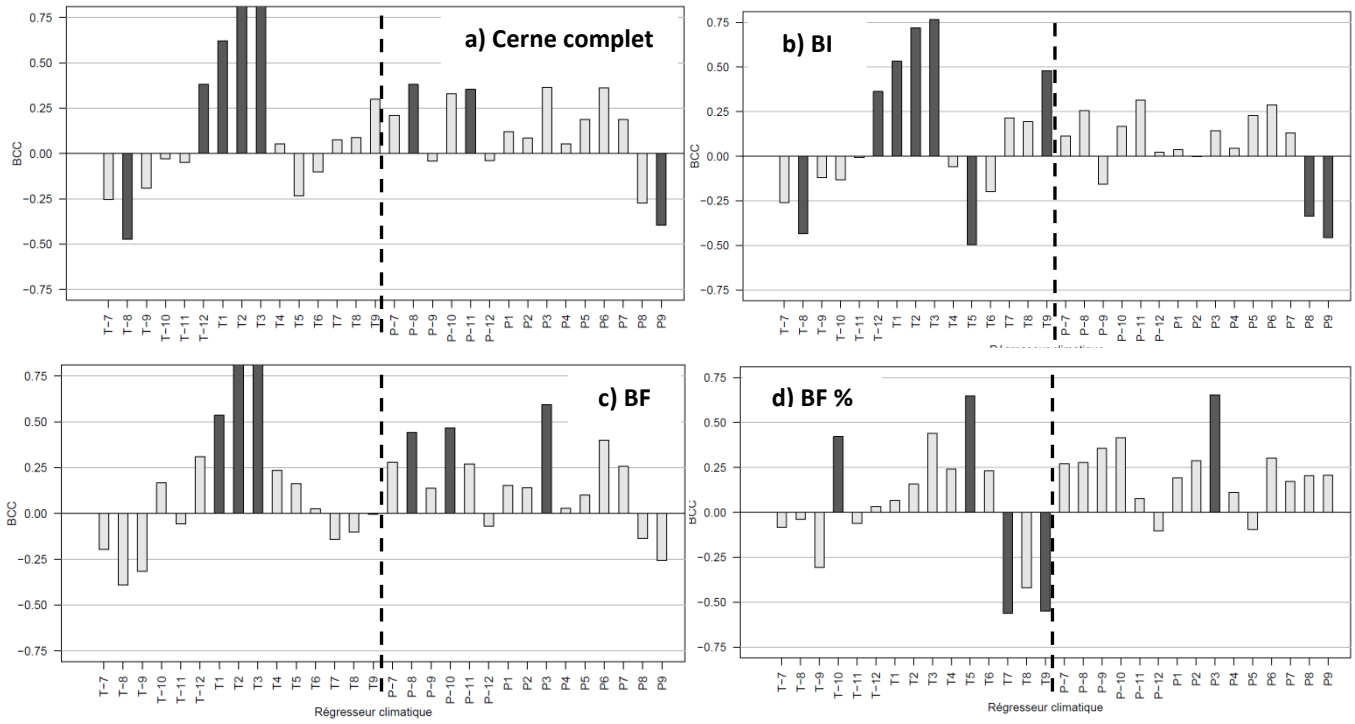


Figure 15: Coefficients de corrélation cerne-climat de type *Bootstrapped* (BCC), entre les largeurs de cerne complet (a), de bois initial (b), de bois final (c) ou de proportion de bois final BF % (d) et les régresseurs climatiques mensuels, de température moyenne (T) et de somme de précipitations (P). Les chiffres correspondent au numéro du mois de l'année et un « -» aux mois de l'année précédente (T-7 = juillet n-1). Les bâtons foncés indiquent un coefficient de corrélation significatif au seuil de 95%.

Groupe	T	P	Total
AP	5	4	9
AM	6	2	8
FP	3	0	3
FM	3	2	5

Tableau 1 : Comparaison inter-groupes du nombre de régresseurs intervenant de manière significative dans la relation cerne-climat (T : température moyenne mensuelle, P : somme des précipitations mensuelles). Résultats des fonctions de corrélation menés sur la période [juillet n-1 ; sept. n], pour le cerne complet.

Des fonctions de corrélation menées séparément sur chacun des groupes nous montrent une sensibilité aux facteurs climatiques beaucoup plus forte pour les groupes agricoles (AP et AM) que pour les groupes forestiers (FP et FM), avec respectivement 9, 8, 3 et 5 régresseurs significatifs (**tableau 1**).

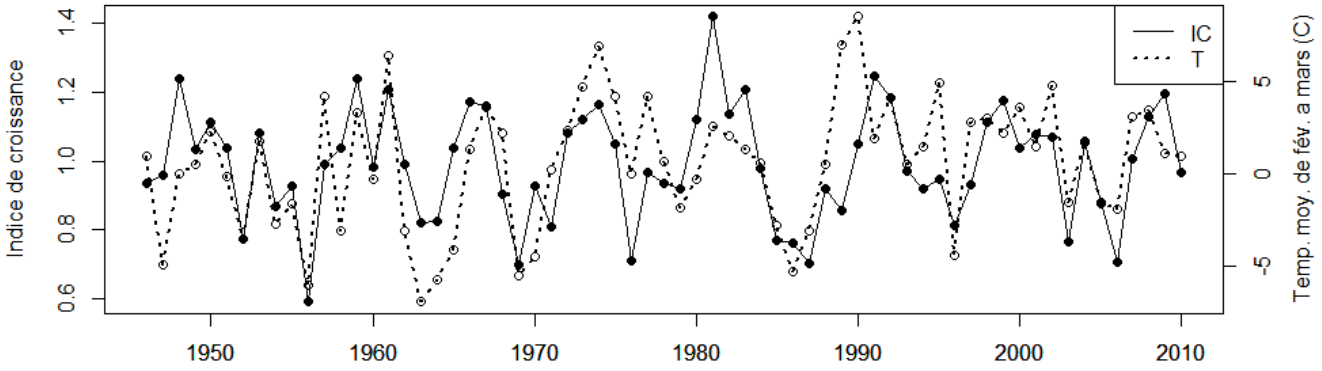


Figure 16: Evolution des indices de croissance (ligne) **et des températures moyennes de fin d'hiver** (février et mars, pointillés), pour l'ensemble des arbres. $R^2 = 0,35$; GLK = 75%.

➢ Les compartiments de bois initial et de bois final

Les deux compartiments BI et BF révèlent des comportements différents face aux facteurs climatiques. Alors que la température hivernale conserve un rôle crucial dans l'élaboration du cerne de l'année, tous les autres régresseurs sont spécifiques de chaque compartiment. Tous les régresseurs qui ont une influence sur la largeur de BF sont des régresseurs de précipitations qui en augmentent la largeur (BCC > 0, **fig. 15c**). Pour le BI, les régresseurs qui ont une influence sont des régresseurs de température qui diminuent sa largeur : T-8 et T5 (**fig. 15b**). Les corrélations trouvées en P8, P9 et T9 peuvent être considérées comme fortuites, la production de bois initial étant (quasiment) nul à cette période. Ainsi, le comportement du cerne complet semble résulter de l'addition des comportements indépendants et spécifiques du BI et du BF.

➢ La proportion de bois final (BF%)

Elle s'analyse plus facilement au regard des résultats obtenus pour le BI **et** le BF. Deux facteurs sont à l'origine d'un BF % élevé :

- une largeur de BF élevée : c'est le sens du P-10 et P3 élevé (**fig. 15c** et **d**). Les précipitations n'interviennent sur le BF % que par le biais de son influence sur la largeur de BF.
- une largeur de BI faible : T5 faible sur la **fig. 15b** et T5 élevé sur la **fig. 15d**. Les températures n'interviennent que par le biais de son influence sur la largeur de BI. Inversement, un BF % faible est lié à un BI large (c'est le sens de l'impact des T7 et T9). Enfin, notons qu'un T-10 fort est favorable au BF %.

Ainsi, une sécheresse estivale (1976, BF étroit) et une année favorable à la croissance (1991, BI large) conduiront tous deux à un BF % faible, par le jeu d'une variation différentielle des largeurs respectives du BI et du BF, indépendamment de la largeur du cerne.

3.2. Les *pointers years*, des marqueurs d'années exceptionnelles

Le **tableau 2** présente les années qui constituent une *pointer years* (PY) pour au moins 75 % des arbres du dispositif. C'est le cas de 27 années sur les 65 ans de la période, si l'on tient compte de tous les compartiments du cerne (BI, BF et cerne complet).

3.2.1. Quelles pointer years concernent le cerne complet ?

Pour le cerne complet, 14 années sont des PY sur la période de 65 ans, soit 2,15 PY/10 ans, constitué majoritairement de PY(+) (57% des années caractéristiques). Chacun des groupes, à ce seuil de sélection des PY de 75%, affiche un nombre moyen de PY bien supérieur : 3,12 PY/10ans (**tableau 3**). Variant de 3,69 pour le groupe AM à 2,77 PY/10 ans pour le groupe FM. De plus, ce groupe AM réagit différemment, en montrant une prépondérance des années extrêmes négatives (58% des PY sont négatives).

La variation de croissance due à l'impact des PY s'élève en moyenne à 40,4% d'écart relatif de croissance entre l'année n et l'année n-1, avec des années positives à l'impact plus fort que les années négatives (+50% contre -28%). L'ensemble des groupes suit ce patron, avec toutefois un groupe AM dont les PY ont un impact moyen élevé (ERM supérieur de 64%, marginalement significatif entre AM et FP). L'ERM négatif maximum est observé en 1956 pour le cerne complet avec 36 % de croissance en moins par rapport à l'année précédente. L'ERM positif maximum correspond sans surprise à l'année 1957 (+108 %).

Tableau 3 : Différences inter-groupes en terme de nombre de *pointer years* (PY) **pour 10 ans et d'écart relatif moyen de ces PY.**

		AP	AM	FP	FM
Nb PY / 10 ans	PY(+)	1,54	1,54	1,85	1,54
	PY(-)	2,15	1,38	1,23	1,23
ERM %	PY (+/-)	37,7	56,5	32,8	33,2

Tableau 2 : Ecart relatif moyen (ERM, en %) **pour les années calendaires présentant une forte variation de croissance** positive (PY(+): *pointer year* positive) ou négative (PY(-): *pointer year* négative) entre n et n-1, pour chaque compartiment. CC: cerne complet; BI: bois initial; BF: bois final; sd: écart-type. Les années correspondent à une forte variation relative (|ERM|>10%), trouvé pour au moins 75% des arbres du dispositif (en gras: >90%), pour la période commune la plus longue (1946-2010).

Année	CC	BI	BF
1949	**-26**	**-31**	
1952	-30	-30	-24
1953	36		77
1956	-36	**-45**	
1957	**108**	**177**	87
1960	-21		
1961			57
1966			41
1969			-28
1970	41		81
1972	52	43	75
1975		-20	
1976	-29		**-46**
1977	42		**75**
1980		**79**	
1981	31		61
1985		-32	
1988			56
1990			53
1991		50	
1993		**-30**	
1998			42
1999		38	
2000		**-32**	33
2003	-26		-41
2004	41	48	54
2007	47		**132**
Nombre PY	14	13	18
Nb PY/10 ans	2,15	2	2,77
% PY(+)	57	46	78
ERM(+) *(sd)*	50 *(24)*	72 *(53)*	66 *(25)*
% PY(-)	43	54	22
ERM(-) *(sd)*	-28 *(5)*	-31 *(7)*	-35 *(10)*

3.2.2. Le comportement spécifique du BI et du BF

Dans le bois initial Le nombre de PY est sensiblement égal à celui du cerne complet (2,00 contre 2,15/10 ans, **tableau 2**). Par contre la proportion de PY négative (54%) est ici plus importante que celle de PY positive. L'ERM négatif maximum est dû, comme pour le cerne complet, à l'année 1956 (-45%). L'ERM positif maximum correspond là aussi à l'année 1957 (+177%). Ainsi, l'ERM du bois initial (qu'il soit global, pour les PY(+) ou les PY(-)) est toujours plus prononcé que celui survenant pour le cerne complet, avec 50% de variation moyenne entre deux largeur de BI successives.

Le bois final développe en moyenne plus de PY que le BI ou le cerne complet (2,77 contre 2,00 et 2,15). Et ce particulièrement en terme d'années de croissance positive (78% des PY). Quand la largeur de bois final varie en raison d'une année particulière, l'amplitude est là aussi importante, avec un ERM moyen de 59%. L'ERM des PY(+) étant là aussi supérieur à celui des PY(-). C'est l'année 1976 qui a le plus affecté la croissance du bois final: -46 %. Tandis que l'année la plus favorable est 2007, avec 132% de croissance en sus par rapport à 2006 (**tab. 2**).

D'autre part, une PY pour le BI ne l'est pas forcément pour le BF : seule 4 années sur 27 sont des PY à la fois pour BI **et** BF (1952(-), 1957(+), 1972(+) et 2004(+)). L'année 2000 étant elle-même PY+ pour le BF mais PY- pour le BI ! De plus, l'année 1956 est une PY- à l'écart relatif moyen (ERM) le plus fort pour le BI (-45%) tandis qu'elle n'est même pas PY pour le BF. De la même manière, l'année 1976 est une PY- avec l'ERM le plus fort pour le BF (-46%) et n'est même pas PY pour le BI. Il apparaît nettement qu'il est nécessaire d'étudier distinctement la réponse aux *pointer years* du BI et du BF et pas seulement celle du cerne complet, tant les PY sont spécifiques d'un compartiment.

3.2.3. Les conditions climatiques exceptionnelles des *pointer years*

Les *pointer years* sont caractérisés par des précipitations et des températures qui diffèrent sensiblement des années *normales* (non caractéristiques). **Le régime des précipitations** des PY est singulier pendant la période d'automne de l'année précédente (d'août à novembre, **fig. 17a**). Une année très favorable pour la croissance (PY+) étant caractérisé par un mois d'octobre plutôt pluvieux, tandis qu'une année défavorable (PY-) correspond à des mois d'août, septembre et novembre plutôt secs ; sans que les réciproques ne soient vraies. **Le facteur température** a une influence bien plus nette sur le déterminisme des PY. Une année est favorable quand les températures de février-mars sont douces, et défavorables dans le cas contraire (**fig. 17b**). Ces observations sont cohérentes avec les résultats des fonctions de corrélation menés sur l'ensemble des années (cf. **fig. 15a**).

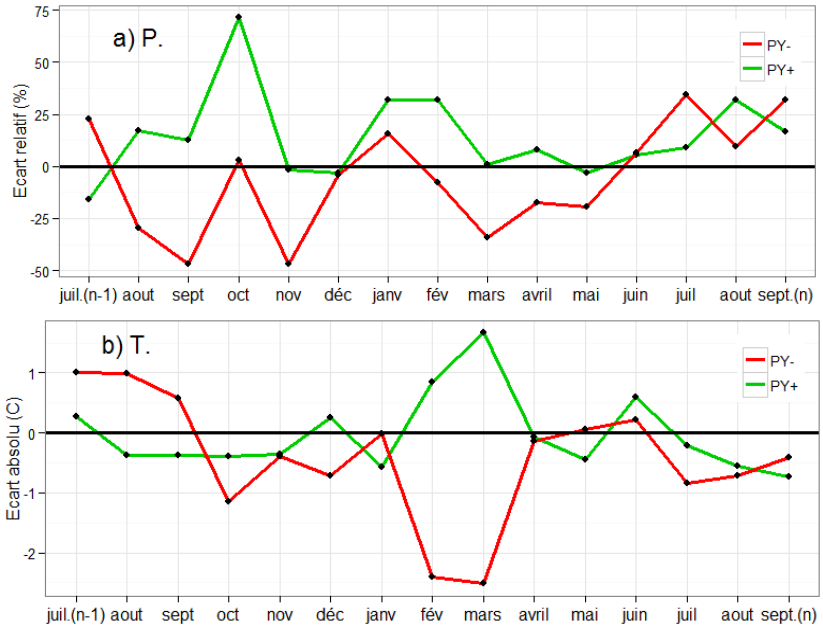


Figure 17: Climat moyen des *pointer years* sur la période 1946-2010 ; exprimé en écart relatif moyen (ERM%) pour les précipitations (a) et en écart absolu (^{0}C) pour les températures (b) ; entre les conditions climatiques des 8 PY+ (vert) et 6 PY- (rouge) par rapport aux conditions climatiques des 51 autres années non caractéristiques de la période (en noir, Y=0).

IV. DISCUSSION & CONCLUSION

Le pin sylvestre est l'essence largement dominante de la Mazovie. Depuis la fin de la seconde guerre mondiale, des millions d'hectares ont été reboisés en pin. La Pologne prévoit d'implanter encore plus d'un million d'hectares (*i.e.* la surface du massif landais) d'ici 2050, sur des terres dévolus jusque-là à l'agriculture. L'arrivée sur la marché des premières grumes issues de ces sols agricoles interrogent à la fois les industriels, les sylviculteurs et les scientifiques. C'est dans ce cadre-là que nous avons cherché à quantifier l'impact que l'antécédent agricole d'un sol pouvait avoir sur la macrostructure du bois. Et dans le contexte actuel de dérive climatique, c'est l'adaptation actuelle et à venir du pin sylvestre aux sols agricoles qui a aussi été évaluée. Cela a nécessité au préalable de préciser l'auto-écologie de ce pin en analysant sa réaction au climat et en dégageant quelques patrons de référence, en terme de croissance, bois juvénile et bois final.

1. Physiologie et auto-écologie du pin sylvestre de Mazovie

1.1. Patron de croissance radiale du pin sylvestre

L'étude a révélé que le pin sylvestre de Mazovie croît en moyenne de 1,35 mm/an sur le rayon. Cette valeur est très comparable à la valeur de 1,38 mm/an avancée par Cedro (2006) pour les pins de la Baltique polonaise. **Le patron de croissance radiale est bien décrit par une exponentielle négative** (R^2=94%). Le patron de croissance surfacique est cohérent avec celui calculé par Bert (2006) pour le pin maritime. Après une croissance initiale très forte les dix premières années, la croissance reste soutenue et continue jusqu'à au moins 65 ans, où elle dépasse 6 cm^2/an. Avec une croissance moyenne annuelle de 4,26 cm^2 de bois sur 65 ans, il serait intéressant de préciser ce patron jusqu'à l'âge d'exploitabilité final (vers 120-150 ans).

Deux autres valeurs de référence ont été dégagées de ce travail :

Au fur et à mesure du vieillissement, la proportion de bois final dans le cerne évolue selon un patron proche du logarithme. Le bois final représente 42 % de la largeur du cerne, entre 35 et 65 ans ; et 38 % sur la durée de vie de l'arbre. Cette valeur est comparable aux 36 % avancés par Tomczak & Jelonek (2013) pour des pins sylvestres de 90 ans. **La proportion de bois final est** par ailleurs **indépendante de la largeur du cerne.**

D'après l'étude du patron de croissance radiale, les rondelles étudiées possèdent un noyau de bois juvénile *a minima* de 3,4 cm et jusqu'à 16,0 cm de diamètre ; pour un âge de transition entre bois juvénile et bois mature s'étalant de 6 à 22 ans selon les arbres. Au vu de la littérature qui rapporte un âge de transition de 16 à 27 ans pour le pin sylvestre (Karlsson et al. 2013), ces valeurs semblent toutefois sous-estimées. Probablement une zone de bois de transition doit-elle être prise en compte et ajoutée à ces valeurs, quoique indiscernable avec la seule étude du rythme de croissance. Cette pré-étude donne tout de même une idée de la taille des échantillons à préparer pour une analyse plus fine en microscopie.

1.2. Exigences climatiques et réaction au climat du pin

La chronologie maîtresse en indices de croissance radiale permet une lecture aisée des années caractéristiques. Les dégringolades subites et les remontées abruptes traduisent des *pointer years* à l'effet respectivement dépressif (PY(-)) ou stimulant (PY(+)) sur la croissance des arbres.

Toutes les PY(-) de notre étude ont été rapportées par Neuwirth et al. (2007) dans sa méta-analyse comme étant des PY(-) pour le pin sylvestre dans toute l'Europe centrale (de 1930 à 1971). Toutes (1934, 1949, 1952, 1956), hormis 1940 qu'ils ne détectent pas. Mais Zielski et al. (2010) signalent son incidence pour la Pologne. Zunde et al. (2008) en dit même: "*a pronounced signature year in which the majority of pines in Latvia showed the most dramatic reduction in radial growth during the whole of the 20th century*". Ainsi, le **bon calage de la chronologie maîtresse sur les PY(-)** signalées dans différentes études confirme la qualité de notre interdatation.

Par contre, il n'y a pas de similitude entre les PY(+) de Neuwirth et al. (2007) et ceux de Mazovie. Ce résultat peut s'expliquer, entre autres, par **le principe du facteur limitant** ; qui stipule qu'un processus biologique comme la croissance ne peut pas s'opérer plus rapidement que ne l'autorise le facteur le plus limitant. Le climat des PY(-) est contraignant pour l'ensemble des arbres et induit une baisse homogène de la croissance. À l'inverse, pendant les années positives, l'absence de contraintes va s'exprimer différemment pour chaque arbre ; l'amplitude de sa réponse dépendant de son génotype et de la modulation des conditions micro-stationnelles. Le fait que les PY(-) soient souvent suivie de PY(+) sans que l'inverse ne soient vrai tend aussi à confirmer cette hypothèse. En effet une PY(-) suivie d'une PY(+) traduit bien l'effet d'un facteur qui devient limitant seulement de manière ponctuelle.

Il est difficile de comparer la fréquence des PY révélée dans chaque étude car les périodes prises en compte et les méthodes de calcul sont différentes. Il serait pourtant intéressant de vérifier que le nombre de PY augmente avec le durcissement des contraintes climatiques. En effet, Cedro (2006) en contexte océanique, la présente étude en climat continental et Elferts (2007) en Lituanie hémiboréale annoncent des fréquences de 1,23; 2,15 et 3,35 PY/10 ans, respectivement. La prévalence des PY(-) étant elle-même de 43%, 43% et 54%. Cette augmentation de l'importance relative des PY(-) pourrait alors traduire **une augmentation des arrières-effets engendrés par les *pointer years* négative.**

L'écart relatif moyen (ERM) entre l'accroissement de deux cernes consécutifs mesure l'amplitude de la réaction des arbres au climat. L'ERM des PY(+) est en moyenne de 50% tandis que cet écart est de -28% en cas de PY(-). Cette différence n'est peut-être qu'un artefact mathématique. En effet, ce qui importe dans le fonctionnement physiologique du cerne (et donc du cambium), ce n'est peut-être pas la variation relative (en %) mais plutôt le facteur d'accroissement ou de réduction de la largeur. Ainsi une variation de largeur de +50 % et de -28 % revient à multiplier par 1,5 dans un cas et à diviser par 1,39 dans l'autre. On voit dès lors que la différence n'excède pas 10 %, et l'on peut considérer que **les *pointer years*, qu'elles soient positives ou négatives, ont un même impact global sur la croissance du pin**.

L'influence des précipitations (P) et des températures (T) sur le déterminisme des PY a été décrit ici. Une PY(+) est caractérisée par un mois d'octobre pluvieux (70% de pluie en plus) et des anomalies de températures pour février et mars d'environ un degré en plus que la normale. Une PY(-) est caractérisée par un automne sec et des mois de février et mars plus froids que la normale de plus de 2 degrés. **Les PY sont ainsi principalement dues aux températures de février/mars et aux arrières-effets hydriques de l'automne précédent.** Il semble que précipitations et températures ne jouent aucun rôle fort durant la saison de végétation.

Pour augmenter la robustesse des interprétations concernant l'impact des années extrêmes, il serait bon de coupler deux méthodes complémentaires: l'approche **variation relative** de la croissance entre deux années (PY tels que présentés ici, méthode Becker (1989)); et l'approche en **valeur absolue** de périodes à forte et faible croissance radiale (*e.g. skeleton plot,* indice de Cropper (1979)).

Si l'étude des PY permet de révéler la sensibilité du pin sylvestre aux événements climatiques extrêmes, l'étude de la réponse “normale” permet d'éclairer l’écologie du pin, en déterminant **les périodes clés dans l'élaboration du cerne annuel**.

Des températures hivernales douces (de décembre à mars) constituent le principal facteur d'un cerne large. Ces hautes températures, en dégelant le sol, pourraient permettre au pin de continuer sa photosynthèse durant l'hiver, et de mobiliser ces réserves carbonées au printemps. Ces températures douces pourraient aussi avancer la saison de végétation de l'ordre de 10 jours par degré supplémentaire (Differt, 2001). Une saison plus longue fournissant un cerne plus large. A cela s'ajoute l'influence favorable de conditions météo fraîche et humide à l'automne/fin d'été précédent, qui permettent le rechargement de la réserve utile en eau du sol.

Zielski, dans sa synthèse bibliographique (2010) confirme l'influence systématique des températures de la période hivernale (et notamment février/mars) sur le pin sylvestre polonais. Elferts (2007) et Zunde et al. (2008) aboutissent aux mêmes conclusions pour la Lettonie et la Lituanie. Mais nous avons mis en évidence que le pin de Mazovie était insensible aux pluies durant la saison de végétation et aux températures estivales élevées, ce qui le distingue à la fois des pins de la Baltique (Cedro, 2006) et de ceux des Carpates (Feliksik 2000, Wilczynski & Skrzyszewski 2002). De manière cohérente avec les conclusions tirées de l'analyse des PY, **les peuplements continentaux de Mazovie semblent être physiologiquement plus proches de ceux de la zone hémiboréale.**

L'indifférence du pin sylvestre pour les conditions climatiques de la saison de végétation pourrait s'expliquer par :

- une bonne adaptation des arbres aux conditions locales des plaines continentales ;
- des sols minéraux bien alimentés en eau toute l'année qui limitent l'influence des chaleurs et sécheresses estivales ;
- un climat de transition peu contraignant, avec une majorité des pluies tombant durant la saison de végétation.

Seule les températures hivernales restent un facteur limitant de la croissance radiale. Et il semble que cela soit amené à évoluer. En effet, Czerepko et al. (2005) a déjà montré l'influence sur la végétation du **réchauffement hivernal observé dans l'est de la Pologne** : + 1,5^{0}C en 50 ans. La levée de cette contrainte thermique pourrait renforcer l'adaptabilité du pin sylvestre aux conditions locales, mais aussi modifier les capacités de compétition de la flore d'accompagnement.

1.3. Le comportement spécifique du bois initial (BI) et du bois final (BF)

On a vu que la réaction au climat lors des années normales était la résultante de l'addition simple des comportements individuels du BI et du BF. Et ces comportements sont bien différents. **La différenciation du BI ne réagit qu'aux températures, tandis que pour le BF, le facteur clé** (hormis les températures hivernales) **est la présence/absence de précipitations.**

A l'instar de Lebourgeois et al. pour le chêne sessile (2004), nous avons mis en évidence **des périodes-clés différentes pour le BI et le BF**. La prévalence du signe des PY est elle aussi spécifique du compartiment considéré : 78 % des PY sont positives pour le BF, 46 % pour le BI. Une telle proportion de PY(+) dans le BF traduit une largeur de bois final communément assez faible mais ponctuellement accrue par une levée des contraintes, lors des PY(+). Ce qui

nous pousse à penser **que le climat de la Mazovie est assez limitant pour l'élaboration du bois final.** Il serait intéressant pour le confirmer d'étudier le déterminisme climatique des PY concernant spécifiquement le bois final.

Par ailleurs, on a vu que le BF % répondait à un déterminisme climatique fort, dépendant des variations relatives du BI et du BF ; et donc des conditions climatiques qui influent indépendamment sur chacun d'eux**. Ce caractère intégrateur du BF % le rend indépendant de la largeur du cerne**. Une modélisation de la proportion de bois final dans le cerne devra donc préférer les paramètres BI et/ou BF à celui de largeur de cerne.

Enfin, nous avons calculé que l'écart relatif moyen entre deux cernes est plus élevé dans chacun des compartiments que dans le cerne complet. On note qu'un ERM élevé traduit une réponse forte au climat. Comme d'autre part la moitié des PY ne concernent qu'un seul compartiment sans se refléter dans le cerne complet, une étude qui vise la compréhension fine de la réaction du pin sylvestre au climat doit donc nécessairement intégrer l'analyse du comportement spécifique du BI et/ou du BF. Le développement récent d'étude sur la dynamique infra-annuelle de formation du bois est en cela prometteur (Cuny et al. 2012).

2. L'influence du passé agricole *versus* forestier

Le deuxième axe de recherche vise à évaluer l'influence de deux facteurs sur la réaction au climat du pin et la xylogénèse de son bois. Un facteur « occupation antérieure du sol » et un facteur « type phytosociologique de peuplement », *proxy* de la richesse trophique.

2.1. La sensibilité au climat est modifiée

Le nombre de régresseurs climatiques significatifs dans la relation cerne-climat est nettement plus élevé en sols agricoles (AP=9; AM=8) que sur sols forestiers (FP=3 ; FM=5) ; les régresseurs de températures restant toujours prééminents. D'autre part, le groupe AP développe un nombre très important de PY (3,69/10 ans), en grande partie négative : 2,15 contre 1,38 ou 1,23 pour les autres groupes. Cette prévalence des PY(-) laisse présager ici aussi des arrières-effets néfastes qui perdurent plus longtemps chez le groupe AP, témoignant d'une résilience plus faible aux mauvaises années. Les groupes de la modalité agricole (et particulièrement le groupe AM) ont en outre un ERM plus élevé que les groupes de sols forestiers.

Ce nombre plus important de PY et de régresseurs significatifs, cette moins bonne résilience aux événements extrêmes, et enfin ces ERM élevés témoignent tous d'une **sensibilité plus forte des sols agricoles aux variabilités inter-annuelles du climat**. Lebourgeois et al. (2004) signale la réserve utile maximale du sol comme un des facteurs clé de cette sensibilité. Peut-être que l'alimentation en eau des arbres, diminué sur sols agricoles en raison de leur moindre infestation en mycorhize, est-elle à l'origine de cette anomalie ? Les conclusions de la littérature sur ce point ne sont pas définitives (Hilszczańska et al. 2012, Menkis, 2005).

2.2. Xylogénèse et qualité technologique du bois

L'étude a fortement discriminé les patrons de croissance entre les modalités agricole et forêt (**fig. 12**). Les 5 premières années, les boisements de terre agricole ont une croissance initiale plus forte, profitant sans doute de l'azote disponible en plus grande quantité sous forme NO_3^- (Smal & Olszewska 2008), facilement assimilable mais rapidement épuisé. C'est alors en forêt, pendant une phase de 30 ans, que la croissance est la plus forte, grâce probablement à la minéralisation de l'humus et une mycorhization plus importante. Malgré tout, les différences s'estompent avec le temps, les sols agricoles subissant une transformation continue et

progressive de leurs caractéristiques (Olszewska & Smal 2008). La croissance instantanée des terres agricoles rattrape alors celle des terrains forestiers. A l'âge de 65 ans, subsiste uniquement le différentiel de croissance cumulé sur les 30 ans de la phase « jeune » du peuplement (de 5 à 35 ans), et représentant 46,6 cm^2 par arbre. La surface terrière d'un pin forestier vaut alors 300 cm^2, et celle d'un pin agricole 253 cm^2, soit 16 % de moins.

Ce pin agricole montre une croissance plus faible de 16 %, mais dans les peuplements jeunes (5-35 ans), ils montrent aussi une proportion de bois final (BF%) plus élevée qu'en forêt. En phase adulte (35-65 ans), le différentiel est observable uniquement entre les peuplements sur sols pauvres (-P), au BF % plus forts que ceux de sols mésotrophes (-M).

L'évaluation macroscopique du bois juvénile distingue nettement le groupe FM comme celui en produisant le plus (avec un noyau central de près de 12 cm) et le plus longtemps (22 ans). Puis vient le groupe AM (7cm en 13 ans) et les groupes de sols pauvres (environ 5cm en 11 ans). **Les groupes agricoles ont, en matière de *durée de production* du bois juvénile un comportement semblable à celui du groupe FP, nettement inférieur à celui du groupe FM**. Mais dû à leur croissance initiale forte, la *quantité* de bois juvénile est intermédiaire entre celles du groupe forêt : 28 % de plus que FP, mais 53 % de moins que FM. Une confirmation en microscopie de la limite précise du bois juvénile reste nécessaire.

Ainsi, l'étude comparée du patron de croissance et celui de proportion de bois final font apparaître des changements importants survenant au cours de la vie du peuplement. Il semble qu'il y ait **un *avant* et un *après* 35 ans**. Passé cet âge, les modalités *agricole* et *forêt* ne sont plus distinguables sur des critères de croissance et de BF %. L'étude de Smal & Olszewska (2008) et Olszewska & Smal (2008) montrent qu'à cette période, bon nombre de paramètres pédologiques ont rapprochés les sols agricoles boisés des sols historiquement forestiers. **La réinstallation progressive des mycorhizes pourraient aussi jouer un rôle.** Hilczanska (2012) propose à ce propos que la recolonisation soit aérienne et facilitée par la présence de forêts, avant que d'être opérée par progression mycélienne.

3. Conclusion

Les peuplements issus du boisement des terres agricoles les plus pauvres ont, dans leur jeune âge, peut-être moins bien réussi que les reboisements forestiers ; mais 65 ans plus tard, les différences en terme de macrostructure du bois sont limitées. Un pin de sol agricole, typiquement, aura poussé moins vite de 16 %, et présentera une sensibilité accrue aux facteurs climatiques, tant en années normales que lors de conditions extrêmes ; ce qui confirme l'hypothèse de travail. Par contre il bénéficie, entre l'âge de 5 et 35 ans, d'une proportion de bois final plus importante qu'un pin forestier, et d'un noyau central de bois juvénile d'en moyenne seulement 6 cm. Par ailleurs, à 65 ans, il n'existe plus de différence en terme d'accroissement courant ou de proportion de bois final.

D'autre part, l'étude a permis d'établir la cinétique et les patrons d'évolution de la croissance radiale et de la proportion de bois final chez le pin sylvestre. Ce travail a de plus permis de préciser à la fois l'importance des années extrêmes -leur fréquence- et leur influence sur la croissance radiale du pin, en terme d'amplitude de variation. Les facteurs climatiques responsables de ces *pointer years,* et de manière plus générale de la croissance radiale du pin ont été dégagés. Enfin, il est apparu que le comportement du bois initial et du bois final devait être pris en compte, non seulement parce qu'il détermine la proportion de bois final, mais aussi en raison de son comportement spécifique face à la variabilité interannuelle du climat.

Cette étude a ainsi montré que sur des critères de macrostructure du bois, rien n'empêchait de continuer à boiser des terres agricoles avec des peuplements purs et réguliers de pins sylvestres. Mais, *primo*, ces conclusions devront être étayées par une analyse des caractéristiques mécaniques et microstructurelles ; s*ecundo*, la sensibilité accrue du pin sylvestre aux variations du climat, associé au contexte actuel de dérive climatique, incite à envisager de nouvelles voies. Car tandis que l'accroissement modéré des températures ne constituerait *a priori* pas un problème dans le contexte planitiaire continental de la Mazovie, *a contrario* une modification du régime des pluies affecterait sensiblement le pin sylvestre. L'étude du comportement du pin en mélange, en vue de constituer des peuplements plus résistants et plus résilients, est une nécessité d'actualité.

BIBLIOGRAPHIE

- ALTEYRAC, J., CLOUTIER, A., ZHANG, S.Y. (2006). Characterization of juvenile wood to mature wood transition age in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP) at different stand densities and sampling heights. *Wood science and technology*, ***40***(2): 124-138.

- BADEAU, V., BECKER, M., BERT, D., DUPOUEY, J. L., LEBOURGEOIS, F., PICARD, J. F. (1996). Long-term growth trends of trees: ten years of dendrochronological studies in France. In *Growth trends in European forests*. Springer Berlin Heidelberg. p. 167-181.

- BECKER, M., GEREMIA, F., SCHIPFER, R. (1987). Bilan de santé actuel et rétrospectif du sapin (*Abies alba* Mill.) dans les Vosges. Etude écologique et dendrochronologique. *Annales des Sciences forestières* ***44***(4) : 379-402.

- BECKER, M. (1989). 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*, ***19:*** 1110-1117.

- BERT, D. (2006). *Croissance secondaire de la tige & croissance des aiguilles de Pin maritime (Pinus pinaster)*. Synthèse bibliographique d'une monographie en attente de publication, 37p.

- CEDRO, A. (2006). Comparative dendroclimatological studies of the impact of temperature and rainfall on *Pinus nigra* Arnold and *Pinus sylvestris* in Northwestern Poland. *Baltic Forestry*, ***12***(1): 110-116.

- C.I.L.P, Centrum Informacyjne Lasów Państwowych (2011). *Lasy Państwowe w liczbach 2012*. [La forêt publique en chiffres]

- COOK, E.R. (1987). The decomposition of tree ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*, ***47***: 37-59.

- CROPPER, J.P. (1979). Tree-ring skeleton plotting by computer. *Tree-Ring Bulletin,* ***39***: 47–59.

- CUNY, H. E., RATHGEBER, C. B., LEBOURGEOIS, F., FORTIN, M., & FOURNIER, M. (2012). Life strategies in intra-annual dynamics of wood formation: example of three conifer species in a temperate forest in north-east France. *Tree physiology*, ***32***(5): 612-625.

- CZEREPKO, J., BOCZOŃ, A., NIKITIN, A. (2005). Threats of alder swamp forests in a changing environment. In W. Kotowski (Ed.), WETHYDRO Center of Excellence in Wetland Hydrology.

Anthropogenic influence on wetlands biodiversity and sustainable management of wetlands, Warsaw Agricultural University Press, Warsaw, pp. 21–33

- DĄBROWSKI, S. (2002). The National Programme for the Augmentation of Forest Cover and its Implementation in the Region of Warmia and Mazury. In *Afforestation in the context of sustainable forest management*. Economic commission for Europe, Ennis.

- DIFFERT, J. (2001). *Phénologie des espèces arborées. Synthèse bibliographique. Analyse des données du Réseau RENECOFOR.* UMR INRA-ENGREF. Rapport, 224 p.

- ECKSTEIN, D., & BAUCH, J. (1969). Beitrag zur Rationalisierung eines dendrochronologischen Verfahrens und zur Analyse seiner Aussagesicherheit. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, ***88***(1): 230-250.

- ELFERTS, D. (2007). Scots pine pointer-years in northwestern Latvia and their relationship with climatic factors. *Acta Univ. Latv*, ***723***: 163-170.

- FELIKSIK, E. (2000). The influence of thermal and pluvial conditions on the radial increment of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from the area of Dolny Ślask. *Folia Forestalia Polonica. Seria A, Leśnictwo,* ***42***: 55-66.

- FRITTS, H. C. (1976). *Tree rings and climate*. Academic Press, London, New York, San Francisco, 567p.

- HILSZCZAŃSKA, D., ZBIGNIEW, S., MONIKA, M. (2012). Ectomycorrhizal Status of Scots Pine Saplings Growing in Post-Agricultural Soils. *Polish Journal of Environmental Studies,* ***21***(1).

- HOLMES, R. L., ADAMS, R., FRITTS, H. (1986). Quality control of crossdating and measuring: a users manual for program COFECHA. *Tree-ring chronologies of western North America. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, USA*, 41-49.

- JELONEK, T., TOMCZAK, A., JAKUBOWSKI, M., PAZDROWSKI, W. (2005). Properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) timber growing on former arable and forest land. *Acta Sci. Pol. Silv. Colendar. Rat. et Ind. Lignar.*, ***4***(2) : 35-47.

- KARLSSON, L., MÖRLING, T., BERGSTEN, U. (2013). Influence of silvicultural regimes on the volume and proportion of juvenile and mature wood in boreal Scots pine. *Silva Fennica* ***47***(4), 17p.

- KOUBAA, A., ZHANG, S. T., MAKNI, S. (2002). Defining the transition from earlywood to latewood in black spruce based on intra-ring wood density profiles from X-ray densitometry. *Annals of forest science*, ***59***(5-6): 511-518.

- LARSON, P.R., KRETSCHMANN, D.E., CLARK, A., ISEBRANDS, J.G. (2001). *Formation and properties of juvenile wood in southern pines: a synopsis.* Gen. Tech. Rep. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 42 p.

- LEAL, S. et al. (2007). Tree-ring growth variability in the Austrian Alps: the influence of site, altitude, tree species and climate. *Boreas,* ***36***(4): 426-440.

- LEBOURGEOIS, F., COUSSEAU, G., DUCOS, Y. (2004). Climate-tree-growth relationships of *Quercus petraea* Mill. stand in the Forest of Bercé ("Futaie des Clos", Sarthe, France). *Annals of forest science*, ***61***(4) : 361-372.

- MENKIS, A. Root associated fungi of conifer seedlings and their role in afforestation of agricultural land. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae*, ***2005***(106).

- MERIAN, P. (2012b). POINTER et DENDRO : deux applications sous R pour l'analyse de la réponse des arbres au climat par approche dendroécologique. *Revue forestière française*, ***64***(6) : 789-798.

- MERIAN, P. (2012a). *Variations spatio-temporelles de la réponse au climat des essences forestières tempérées: quantification du phénomène par approche dendroécologique et influence de la stratégie d'échantillonnage*. Thèse de Doctorat. Nancy : AgroParisTech.

- MERIAN, P. (2013). Conseils pour l'échantillonnage des arbres en peuplements purs et réguliers en vue de l'estimation de leur sensibilité au climat par analyse dendroécologique. *Revue forestière française* ***65***(1): 21-36.

- MERIAN, P., & LEBOURGEOIS, F. (2011). Size-mediated climate-growth relationships in temperate forests: a multi-species analysis. *Forest Ecology and Management* ***261***(8): 1382-1391.

- NEUWIRTH, B., SCHWEINGRUBER, F. H., WINIGER, M. (2007). Spatial patterns of central European pointer years from 1901 to 1971. *Dendrochronologia*, ***24***(2): 79-89.

- OLSZEWSKA, M., SMAL, H (2008). The effect of afforestation with Scots pine (*Pinus silvestris* L.) of sandy post-arable soils on their selected properties. I. Physical and sorptive properties. *Plant and soil* ***305***(1-2): 157-169.

- SAINT-ANDRE, L. (1998). Excentricité et forme des sections transversales de bois. Définitions, méthodologie, exemples sur l'épicéa commun (*Picea abies* Karst.). *Annales des sciences forestières,* ***55***(8) : 899-909.

- SCHOH, W., HELLER, I., SCHWEINGRUBER, F.H., KIENAST, F (2004). Wood anatomy of central European Species. Online version: www.woodanatomy.ch

- SCHWEINGRUBER, F.H., ECKSTEIN, D., SERRE-BACHET, F., BRÄKER, O.U. (1990). Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia* ***8***: 9–38.

- SMAL, H., OLSZEWSKA, M. (2008). The effect of afforestation with Scots pine (*Pinus silvestris* L.) of sandy post-arable soils on their selected properties. II. Reaction, carbon, nitrogen and phosphorus. *Plant and Soil* ***305***(1-2): 171-187.

- TOMCZAK, A., & JELONEK, T. (2013). Radial variation in the wood properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) grown on former agricultural soil. *Forest Research Papers*, ***74***(2): 171-177.

- WILCZYŃSKI, S., & SKRZYSZEWSKI, J. (2002). The climatic signal in tree-rings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from foot-hills of the Sudetic Mountains (southern Poland). *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, ***121***(1): 15-24.

- WODZICKI, T. J. (2001). Natural factors affecting wood structure. *Wood Science and Technology*, ***35***(1-2): 5-26.

- W. R. B., IUSS Working Group. (2006). World reference base for soil resources. *World Soil Resources Reports No. 103*. FAO, Rome. 145 p.

- ZIELSKI, A., KRĄPIEC, M., KOPROWSKI, M. (2010). Dendrochronological data. In *The Polish climate in the European context: an historical overview*. Springer Netherlands, p. 191-217.

- ZUNDE, M., BRIEDE, A., ELFERTS, D. (2008). Influence of climatic factors on the annual radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Western Latvia. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B,* ***62***(3): 120-128.

ANNEXE 1

Contexte scientifique de l'étude

- **La recherche forestière en Pologne**
- **La structure d'accueil**
- **Place de mon étude au sein du projet mené par le laboratoire**

La recherche forestière en Pologne

Elle est exclusivement publique :

→ parce que le bois récolté l'est essentiellement dans les forêts publiques (95 % du bois rond récolté)

→ en raison du passé historique communiste qui n'a jamais privilégié les instituts privés. Il n'existe donc pas d'équivalent polonais à des structures telles que le FCBA (Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement) ou l'ancien IDF (Institut pour le Développement Forestier).

La recherche forestière en Pologne est le fruit de différents organismes:

- Forest Research Institute (*Instytut Badawczy Leśnictwa*) à Sękocin
- des facultés forestières au passé ancien
  - Warsaw University of Life Sciences (SGGW)
  - Poznan University of Life Sciences
  - University of Agriculture in Krakow

  ou plus récent :

  - Białystok University of Technology in Hajnówka
  - University of Warmia and Mazury in Olsztyn
  - University of Łódź

La structure d'accueil

A côté de 12 autres facultés, la faculté forestière s'insère au sein de l'Université des Sciences de la Vie de Varsovie - SGGW (*Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie*). Au sein de cette faculté, 86 professeurs et chercheurs œuvrent dans l'un des 7 départements.

J'ai mené mon projet au laboratoire du département de botanique de la faculté forestière de SGGW, à Varsovie. L'équipe est composée de 7 enseignants-chercheurs, une secrétaire et un stagiaire *Erasmus* en master 2.

Les principaux axes de recherche scientifique du laboratoire de botanique concernent :

- la morphogenèse des plantes, et particulièrement la xylogénèse
- la variabilité de l'activité du cambium
- l'acclimatation et l'introduction d'espèces exotiques d'arbres et d'arbustes
- l'écologie et la dynamique des communautés forestières

Mon étude sur l'influence de l'antécédent cultural sur la qualité du bois (au travers du bois juvénile et de la proportion de bois final) concerne donc les axes 1 et 2 de ces thématiques de recherche ; puisque le bois juvénile et le bois final sont directement liés à l'activité cambiale.

Place de mon étude au sein du projet mené par le laboratoire

Mon travail de 6 mois s'inscrit dans le cadre plus large d'un projet de trois ans financé par une subvention du Centre National pour la Recherche Scientifique (*Narodowe Centrum Nauki* – NCN).

Pour répondre aux questions de recherche soulevés par la problématique du reboisement des terres agricoles, j'ai été amené à mesurer les paramètres de macrostructure du bois (mesure des accroissements annuels, délimitation des zones de bois initial et de bois final) tandis que les paramètres de microstructure (diamètre des cellules, épaisseur de paroi, inclinaison des micro-fibrilles S2, densité) auront été mesurés par des collègues impliqués dans ce projet de recherche. J'ai eu en charge l'interdatation des différents échantillons et la standardisation des séries de croissance. J'ai procédé à l'entièreté de l'analyse climatique et statistique pour les paramètres de macrostructure.

Avant mon arrivée, une personne avait prélevé les rondelles de bois à analyser et avait préparé leur surface pour assurer une bonne lecture optique au scanner. Après mon départ, une autre personne aura en charge les mesures des paramètres aubier / bois de cœur et celles relatives à l'excentricité / bois de compression. Enfin, c'est le laboratoire de la Faculté de Technologie du Bois qui mesurera les propriétés physiques et mécaniques des échantillons.

ANNEXE 2

Paramétrages des logiciels

Afin d'assurer une reproductibilité maximale des travaux présentés dans ce mémoire, les paramétrages et seuils retenus sont détaillés ci-dessous, pour les logiciels suivants :

- **WinDENDRO** (version Density 2012a, Régent Instruments, Canada)
- **COFECHA** (Holmes, 1986)
- **Pack POINTER** (Mérian 2012b)
- **Pack DENDRO** (Mérian 2012b)

WinDENDRO : détection de la transition Bois initial / Bois final

WinDENDRO a assuré la détection de la transition BI/BF selon la méthode de seuil relatif. Chaque limite BI/BF a été calculée en fonction d'un pourcentage choisi de différence entre les valeurs maximum et minimum d'intensité lumineuse. Le seuil retenu est de 50 % (le *X* de la **figure 18**). Cette méthode est dite « relative » car pour positionner chaque limite, elle utilise uniquement les valeurs locales des minimas et des maximas d'intensité lumineuse, à l'intérieur de chaque cerne ; et non pas une valeur fixe pour l'ensemble des cernes et des arbres.

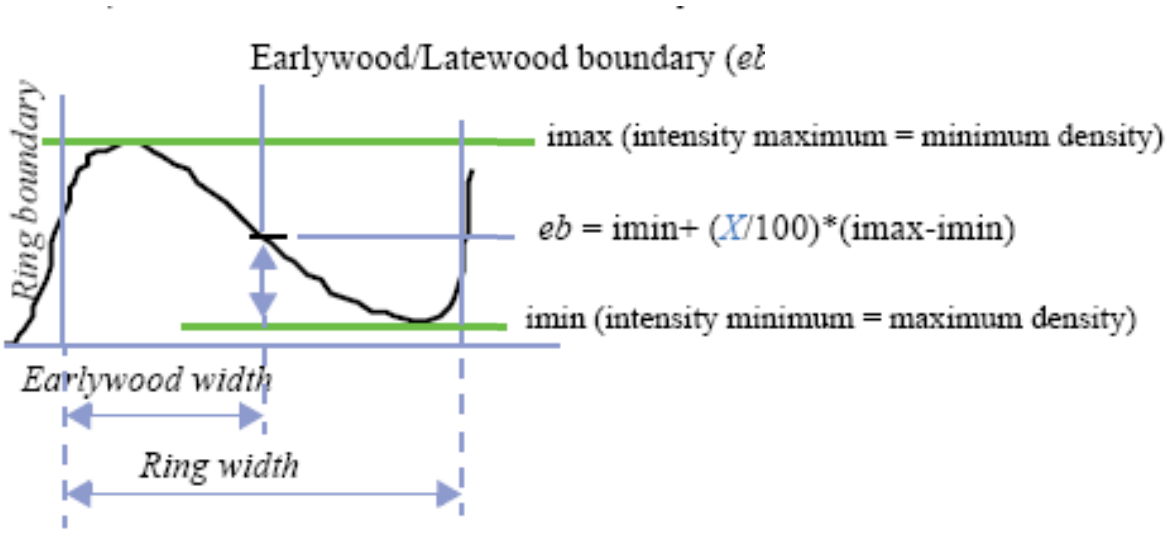


Fig. 18 : Profil d'intensité lumineuse à l'intérieur d'un cerne et méthode de détermination de la limite BI/BF (extrait du manuel WinDENDRO, 2012).

COFECHA : vérification de la qualité de l'interdatation

De manière à améliorer la détection des erreurs, 2 longueurs de fenêtre et de recouvrement furent utilisés. Une fenêtre classique 30/15 analysant la corrélation de segments de 30 ans avec des décalages successifs de 15 ans. Puis une fenêtre 15/5 fut employée pour mettre en évidence de manière exhaustive tous les décalages possibles. La contrepartie est un très grand nombre de suggestions de corrections à vérifier, dues à l'étroitesse de la fenêtre.

Le pack POINTER : détection des *pointer years*

Deux seuils sont à choisir. Une année a ici été considérée comme une *pointer years* quand au moins 75 % des arbres de l'échantillon (1er seuil) ont présentés un écart relatif de croissance d'au moins 10 % par rapport à l'année précédente (2ème seuil).

Le Pack DENDRO : standardisation des séries de croissance

Les séries brutes individuelles de largeur de cerne ont bénéficié d'une double standardisation (voir le principe en **Annexe 3**). Le pack DENDRO reprend la procédure ARSTAN. Le paramétrage appliqué est :

Un premier ajustement au moyen d'une exponentielle négative (ou d'une droite à pente négative si l'ajustement en est meilleur). Puis un ajustement polynomial du 3ème degré par morceaux (*cubic smoothing spline*) ; avec une longueur de fenêtre de 25 ans et 50 % de la variance éliminée, ce qui est suffisamment flexible pour réduire considérablement la part de la variance non climatique.

Les indices de croissance sont obtenus par division puis moyennés arithmétiquement pour construire la chronologie moyenne. Enfin, le bruit blanc n'est pas retiré des séries standardisées.

Le Pack DENDRO : calcul des fonctions de corrélations cerne-climat

Nous avons retenu une période d'analyse personnalisée de 1946 à 2010 (65 ans), soit la période la plus longue pour une présence des 40 arbres. La fenêtre d'analyse va de juillet de l'année précédente (-7), jusqu'à septembre de l'année en cours (9), pour tenir compte des arrières-effets climatiques de l'automne/hiver précédent.

L'intervalle de calcul est laissé simple. L'analyse de corrélation a été menée avec deux jeux de données climatiques (température et précipitations). Sans *bootstrap* sur les chronologies individuelles. Par contre, les coefficients de corrélation *bootstrapped* ont été corrigés par l'EPS (*expressed population signal*), une statistique qui quantifie la force de la relation du signal commun par rapport au signal total (qui lui comporte une part de bruit). La correction par le facteur [1/ racine de l'EPS] permet de réduire l'erreur d'estimation des coefficients de corrélation *bootstrapped* en tenant compte de la taille réduite de l'échantillon (Mérian, 2013).

ANNEXE 3

Principe de la double standardisation

Nous avons cherché à amplifier le signal climatique, en mettant en évidence la variation interannuelle de la largeur de cerne due au climat. Nous avons donc supprimé les signaux basse et moyenne fréquence au travers de 2 standardisations successives :

➢ <u>1ère standardisation</u>

Pour chaque série brute individuelle de largeur de cerne (la courbe noire de la **figure 19a**), un premier ajustement au moyen d'une exponentielle négative (ou d'une droite à pente négative si l'ajustement en est meilleur) permet de retirer la tendance à long terme de diminution de la largeur de cerne induite par l'âge et la géométrie du tronc (la courbe rouge de la **figure 19a**).

Puis, la largeur de cerne observée (en mm) est divisée par la valeur prédite par l'exponentielle négative, pour chacune des années. On obtient alors un indice de croissance issu de la 1ère standardisation (IC.1), sans unité (la courbe rouge de la **figure 19b**). Le signal basse-fréquence est ainsi éliminé.

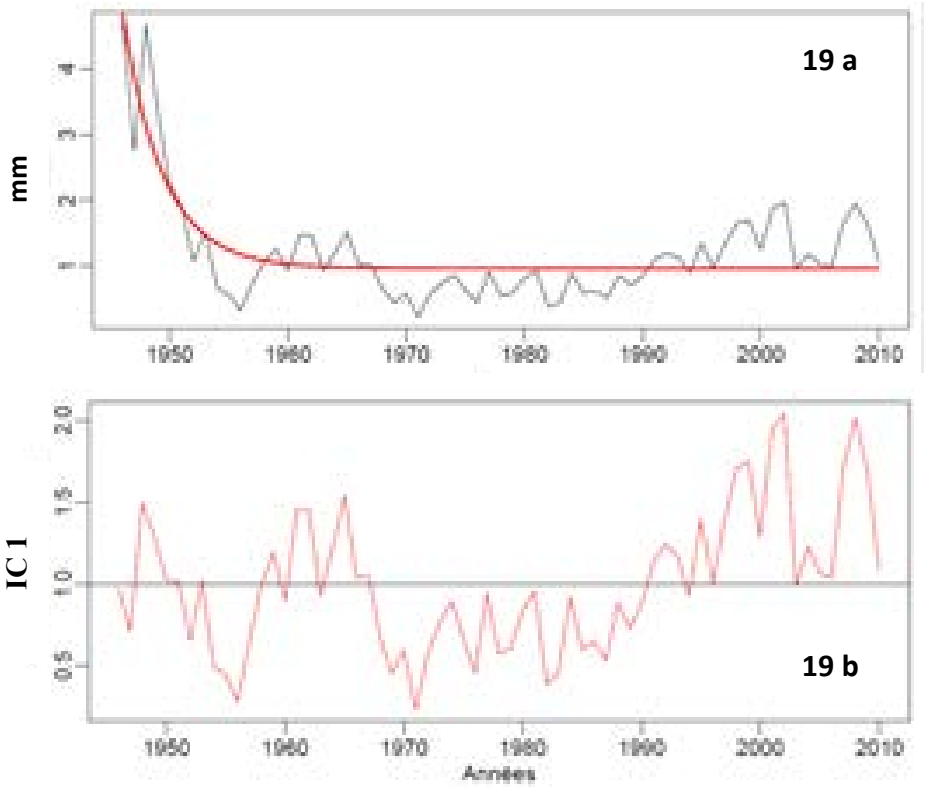


Figure 19 : 1ère étape de la double standardisation de la chronologie d'un pin sylvestre du groupe AP (n°9). Série de largeur de cerne (mm) et ajustement d'une exponentielle négative (en haut) ; série d'indices de croissance issus de la 1ère standardisation (IC 1, en bas).

➢ 2ème standardisation

La procédure est réitérée afin d'extraire le signal de moyenne fréquence correspondant aux autocorrélations longues : les facteurs inter- et intra-peuplement tels que éclaircies, fertilité, insectes, etc. Un ajustement polynomial du 3ème degré par morceaux (*cubic smoothing spline*) permet d'y parvenir (courbe verte **figure 20a**).

Les IC.1 sont eux-mêmes divisés par les valeurs prédites par la *spline* cubique afin d'obtenir des indices de croissance (IC) issus de la 2ème standardisation. Cette série standardisée est dégagée des signaux basse et moyenne fréquence, le signal climatique de haute-fréquence est mis en évidence (courbe verte **figure 20 b**). C'est cette série d'indices qui sera employée dans les analyses de corrélation cerne-climat.

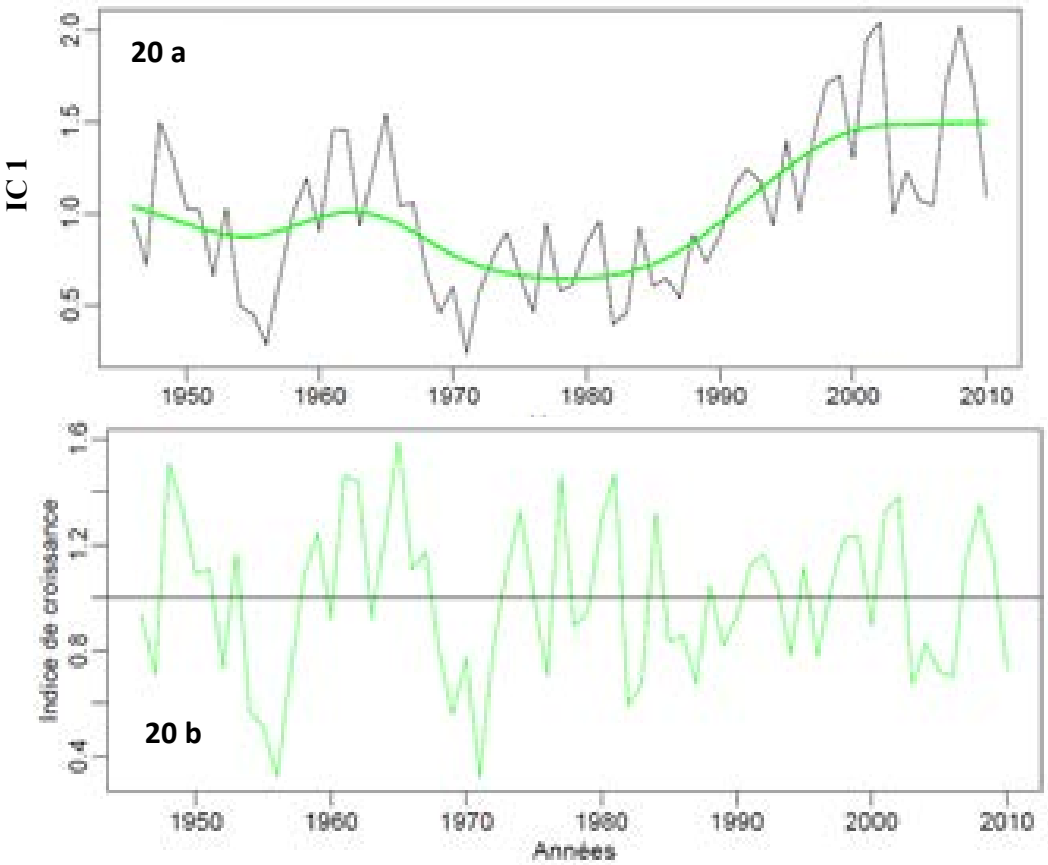


Figure 20 : 2ème étape de la double standardisation. Ajustement d'une *spline* cubique sur la série d'indices de croissance issus de la 1ère standardisation (IC 1, en haut); série d'indices de croissance issus de la 2ème standardisation (en bas).

RESUME

La Pologne continue de boiser ses terres agricoles les plus pauvres ; même si les conditions pédologiques y sont réputées plus défavorables que celles des reboisements forestiers. Ainsi, le précédent cultural (*i.e.* agricole *versus* forestier) modifie-t-il la xylogénèse et la sensibilité au climat ? L'étude porta sur 40 pins sylvestres de la plaine polonaise, âgés de 65 à 101 ans. La mesure à l'aide de WinDENDRO des largeurs de cerne permit la construction d'une série de croissance par arbre. Les techniques de dendrochronologie (*i.e.* interdatation et double standardisation) permirent d'obtenir une chronologie maîtresse qui fut confrontée aux données climatiques par le biais de fonctions de corrélation et d'une analyse des *pointer years*. Ces résultats montrèrent qu'un automne frais et humide et surtout des températures hivernales douces constituaient le principal facteur d'un cerne large pour le pin sylvestre de Mazovie. L'analyse comparée mit en évidence qu'un pin de sol agricole poussait moins vite qu'un pin forestier (-16 %), et présentait une sensibilité accrue aux facteurs climatiques, tant en années normales que lors de conditions extrêmes. *A contrario*, il bénéficiait, entre l'âge de 5 et 35 ans, d'une proportion de bois final plus importante, pour un noyau central de bois juvénile de seulement 6 cm en moyenne.

Mots-clés : *Pinus sylvestris* L., boisement de terres agricoles, dendrochronologie, croissance radiale, dendroclimatologie, fonction de corrélation.

ABSTRACT

Poland continues to be afforested its poorest agricultural land, even if the soil conditions are deemed worse than those of forest plantations. Thus, does the previous land-use (*i.e.* agriculture versus forest) modifies xylogenesis and sensitivity to climate? Investigations were conducted in Polish lowland, on 40 Scots pines from 65 to 101 years old. Ring-width series of double radii were created based on measurement of annual rings using WinDENDRO. Dendrochronology technics (*i.e.* crossdating and double standardization) allowed obtain a master chronology, which was confronted with climate data through correlation functions and an analysis of pointer years. These results showed that a mild winter and additionally a cool and wet autumn were the main factor for a large Scots pine ring. Comparative analysis highlighted that pines from former farmland (i) grown more slowly (-16%) than pines grown under forest typical conditions and (ii) showed increased sensitivity to climatic factors, both in normal years and in extreme conditions. *A contrario*, pines from former farmland from 5 to 35 years-old, experienced a higher latewood proportion, for a core of juvenile wood of only 6 cm on average.

Keywords: Pinus sylvestris L., afforestation of former farmland, dendrochronology, radial growth ring, dendroclimatology, correlation function.