

## **Le tilleul à petites feuilles, une essence providentielle face aux changements climatiques ?**

**Auteur :** Taverniers, Philippe

**Promoteur(s) :** Claessens, Hugues

**Faculté :** Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

**Diplôme :** Master en bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels, à finalité spécialisée

**Année académique :** 2016-2017

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/3109>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---

# **LE TILLEUL À PETITES FEUILLES, UNE ESSENCE PROVIDENTIELLE FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ?**

**PHILIPPE TAVERNIERS**

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU  
DIPLÔME DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES  
ESPACES NATURELS**

**ANNÉE ACADEMIQUE 2016-2017**

**PROMOTEUR : HUGUES CLAESSENS**

**"Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisé qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech"**

**"Le présent document n'engage que son auteur"**

# **LE TILLEUL À PETITES FEUILLES, UNE ESSENCE PROVIDENTIELLE FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ?**

**PHILIPPE TAVERNIERS**

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU  
DIPLÔME DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES  
ESPACES NATURELS**

**ANNÉE ACADEMIQUE 2016-2017**

**PROMOTEUR : HUGUES CLAESSENS**



**En collaboration avec l'Unité de Gestion de Ressource Forestière**

**Remerciements :**

En préambule à ce mémoire, je souhaiterais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur Nicolas Latte, Docteur en sciences agronomiques et ingénierie biologique au Département BIOSE – axe Gestion des Ressources forestières, pour son aide, sa technicité et sa disponibilité à chaque étape de ce projet. Il a su me transmettre une partie de son expérience dans le domaine de la dendroécologie et s'est montré patient lors des explications techniques liées à l'analyse des données.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Hugues Claessens, mon promoteur et professeur au sein de la faculté de Gembloux Agro Bio-Tech, pour sa disponibilité, son soutien, sa motivation communicative et ses nombreuses explications.

Je tiens à remercier vivement tous les gestionnaires et/ou propriétaires forestiers qui m'ont accueilli au sein des peuplements échantillonnés et qui m'ont permis d'acquérir un jeu de données suffisamment important pour discuter les présents résultats.

J'exprime ma gratitude à Antoine Porsont, Hadiy Lahcen et Benoît Mackels, qui m'ont offert une assistance technique essentielle à l'avancement des travaux, et plus particulièrement à Antoine Porsont pour sa grande disponibilité et son implication dans ce projet.

Je tiens à exprimer ma vive reconnaissance à Adrienne Taverniers, ma tante, qui a eu la gentillesse de relire attentivement ce travail.

J'adresse mes plus sincères remerciements à mes parents, ainsi que ma compagne, pour leur inestimable soutien, leur contribution et leur patience.

Enfin, je remercie grandement mes proches, mes amis et tous les membres de l'unité de Gestion des Ressources forestières qui m'ont aussi soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce travail. Merci à tous et à toutes.

## Résumé

Les changements globaux et, plus spécifiquement, les changements climatiques ont des conséquences visibles sur les conditions de croissance des forêts européennes. La sensibilité moyenne du tilleul à petites feuilles (*Tilia cordata* Mill.) à ces changements a été évaluée pour ces 60 dernières années. Au total, les séries chronologiques de 129 tilleuls à petites feuilles ont été analysées au travers de 10 sites répartis le long du gradient altitudinal (60 – 480 m) de la Wallonie. La relation temporelle accroissement-climat a pu être étudiée grâce aux méthodes classiques de la dendrochronologie telles que l'analyse des années caractéristiques et l'indice de sensibilité moyenne mobile (1950-2002). Un modèle de régression des moindres carrés partiels (PLS), couplé à un modèle de corrélation mobile de type bootstrap a permis d'évaluer la significativité de la corrélation des variables climatiques les plus explicatives.

La présente étude permet de vérifier et mettre en avant les hypothèses avancées par De Jaegere et al. (2016) concernant les potentialités de cette essence. Les résultats démontrent en effet que la sensibilité climatique du tilleul est relativement faible et n'augmente pas au cours du temps. De plus, la corrélation négative de *T. cordata* à la somme des températures maximales de juin-juillet (meilleure variable explicative) diminue visiblement au cours du temps. Ces premiers résultats sont donc encourageants car ils démontrent que le tilleul réagit positivement aux changements climatiques.

**Mots clés :** *Tilia cordata*, tilleul à petites feuilles, Wallonie, dendrochronologie, changement climatique, accroissement radial, gradient altitudinal, sensibilité moyenne.

## Abstract

Global changes, especially climate changes, have significantly altered forest growing conditions in Europe. The mean sensitivity of small leaved lime (*Tilia cordata* Mill.) to these changes was evaluated for the last 60 years. A total of 129 small leaved limes were analyzed through 10 sites spread along the altitudinal gradient (60 – 480 m) of Wallonia. The temporal growth-climate relationship could be studied using classical dendrochronology methods such as pointer years analysis and the moving mean sensitivity index (1950-2002). A partial least squares regression model (PLS) coupled with a bootstrap mobile correlation model allowed to evaluate the significance of the correlation of the most explanatory climatic variables.

The present study allows to promote and verify the hypotheses put forward by De Jaegere et al. (2016) concerning the potentialities of this essence are verified today through this study. The results show that the climate sensitivity of the lime tree is relatively low and does not increase over time. Moreover, the negative correlation of *T. cordata* to the sum of the maximum temperatures of June-July (best explanatory variable) decreases visibly over time. These first results are therefore encouraging as they show that the lime tree reacted positively to climate changes.

**Keywords :** *Tilia cordata*, Small leaved lime, Wallonia, dendrochronology, climate change, radial growth, altitudinal gradient, mean sensitivity.

## Table des matières

I.	Introduction .....	1
II.	Contexte historique et actuel .....	2
1.	L'ère du tilleul .....	2
2.	Le tilleul aujourd'hui.....	3
2.1.	Répartition.....	3
2.2.	Exigences stationnelles.....	3
2.3.	Stratégie de survie .....	4
2.4.	Sylviculture .....	5
2.5.	Qualité du bois de tilleul et utilisations.....	5
3.	Le climat, son évolution et les implications de ses changements sur le tilleul à petites feuilles .....	6
4.	Conclusions.....	7
III.	L'évaluation des potentialités du tilleul par la dendroécologie .....	7
1.	Définition et principes .....	7
2.	Méthodologie générale .....	9
IV.	Matériel et méthode.....	10
1.	Présentation de la zone d'étude et choix des sites .....	10
2.	Protocole de récolte, préparation et analyse des échantillons .....	14
2.1.	Récolte des carottes et rondelles/barreaux.....	14
2.2.	Préparation des échantillons.....	19
2.3.	Numérisation des échantillons .....	23
2.4.	Délimitation des cernes et interdatation à l'aide du logiciel WinDENDRO™ .....	24
3.	Protocole d'analyse des données.....	26
3.1.	Matériel .....	26

3.2. Méthode .....	28
V. Résultats.....	36
1. Echantillonnage .....	36
2. Dendrochronologie.....	40
2.1. Chronologie moyenne et Indice de cerne moyen pour l'ensemble des échantillons .....	40
2.2. Séries chronologiques moyennes au niveau site .....	41
2.3. Série chronologique maîtresse régionale.....	44
2.4. Sensibilité moyenne .....	46
3. Dendroécologie – Relation « cerne-climat » .....	47
3.1. Méthode PLS : « Partial Least Squares regression » et modèle de corrélation « bootstrap » .....	47
VI. Discussion générale .....	50
1. Protocole de récolte, de mesure et d'analyse.....	50
2. Synthèse des résultats et discussions.....	52
2.1. A l'échelle de la Wallonie .....	52
2.2. A l'échelle des sites.....	53
3. Les années caractéristiques de <i>T. cordata</i> .....	56
4. Comparaison avec d'autres essences.....	58
5. Quel avenir pour le tilleul en Wallonie ? .....	60
VII. Conclusion générale et perspectives .....	60
VIII.Bibliographie .....	61
IX. Annexes.....	- 1 -
Annexe 1 : Fiche descriptive du tilleul à petites feuilles (DGO3, 2017) .....	- 1 -
Annexe 2 : Script d'analyse original – Rstudio .....	- 12 -
Annexe 3 : Chronologies moyennes et les indices de cerne moyens par site .....	- 23 -

## I. Introduction

Le changement climatique est une problématique aux effets démontrés et aux perspectives inquiétantes. Néanmoins, les évidences scientifiques sont toujours controversées et bon nombre de climato-sceptiques s'efforcent de naviguer à contre-courant en semant systématiquement le doute face aux preuves de ce changement. Dans le contexte de l'accord cadre de recherche et vulgarisation forestières, ce mémoire a pour objectif d'évaluer les impacts du phénomène sur la croissance du tilleul à petites feuilles (*Tilia cordata* Mill.). Cette essence est connue pour sa résistance face à des conditions de température et d'humidité limitantes (De Jaegere et al., 2016). Une approche basée sur l'étude de la relation cerne-climat permettra de déterminer si la croissance des tilleuls a été impactée lors d'épisodes climatiques extrêmes ou exceptionnels. Si les prédictions climatiques sont correctes, ces épisodes climatiques seront de plus en plus fréquents, d'où l'importance d'évaluer la réponse du tilleul à ces derniers. En effet, une résistance accrue aux changements imposés par le climat serait un atout incontestable pour cette essence aujourd'hui peu représentée en Wallonie.

Les arbres peuvent confirmer ou infirmer les phénomènes liés aux changements globaux à travers leur vécu, dont l'historique est conservé dans leurs cernes (Latte et al., 2012). L'étude de cet historique est rendue possible grâce à la dendroécologie, une science dérivée de la dendrochronologie, dont le principe repose sur l'étude des largueurs des cernes annuels des arbres. Ce type d'expertise est notamment complémentaire aux résultats de récentes études basées sur les modèles de niches écologiques. Ces dernières posent comme hypothèse que les aires de répartition de nos essences familiaires, y compris nos principales essences commerciales, risquent d'être modifiées à moyen et long termes selon leur affinité et leur résilience aux conditions abiotiques changeantes (Walther et al., 2002 ; Pearson et Dawson, 2003).

Ce travail de fin d'études est axé sur le potentiel de redéveloppement des essences rares dans le cadre de l'adaptation des forêts aux changements globaux. Cette thématique a fait l'objet d'un projet de thèse, financé par le F.R.I.A.<sup>1</sup> et débutée en janvier 2013 par M. Tanguy De Jaegere, ancien doctorant à Gembloux Agro Bio-Tech. Trois catégories d'approche méthodologiques étaient définies selon les objectifs et échelles spatiotemporelles : les modèles de niche, les modèles de productivité et les modèles dendroécologiques. M. De Jaegere a entrepris une approche par modélisation autécologique, appliquée à *Tilia cordata* Mill, plus connu sous le nom vernaculaire de « tilleul à petites feuilles ». Une revue de la littérature sur les caractéristiques de *Tilia cordata* Mill. et leurs implications en sylviculture dans un climat changeant fut publiée par De Jaegere et al. en 2016 dans la revue « Forests ». Parallèlement, des données nécessaires à la construction d'un modèle de productivité avaient été collectées en 2014-2015. Celles-ci ont, entre autres, permis de retrouver les différentes placettes contenant du tilleul à petites feuilles à travers toute la Wallonie.

Cette étude est basée sur le modèle dendroécologique. Elle apporte les premiers éléments de réponse aux questions suivantes : (1) Existe-t-il une relation entre les largeurs

---

<sup>1</sup> F.R.I.A. = Fonds pour la Formation à la Recherche dans l'Industrie et dans l'Agriculture

des cernes de *Tilia cordata* Mill. et les facteurs liés au climat et à son évolution ? (2) En cas d'affirmation, quelles sont les années climatiques caractéristiques (extrêmes climatiques positifs ou néfastes) pour le tilleul ? (3) Le tilleul est-il apte à résister aux futures conditions climatiques prédictes par les principaux modèles et, par extension, a-t-il sa place dans la forêt wallonne ?

Dans un premier temps, une courte introduction bibliographique permettra de contextualiser cette étude. Le tilleul à petites feuilles y est décrit dans les grandes lignes ainsi que sa relation avec le climat passé, actuel et futur. Ensuite, les principes fondamentaux de la dendroécologie seront abordés et une synthèse des différentes étapes sera proposée sous forme d'organigramme. Le chapitre « Matériel et méthode » sera particulièrement imposant étant donné les nombreuses étapes séparant le choix des sites des variables climatiques explicatives. Enfin, les résultats seront regroupés et discutés pour finalement aboutir à une conclusion synthétique de ces travaux et recherches. Quelques pistes d'améliorations et perspectives d'avenir seront également proposées dans ce chapitre final.

## II. Contexte historique et actuel

Cette section résume les principales informations rassemblées par De Jaegere et al. (2016) dans le cadre de la revue de la littérature sur l'autécologie du tilleul à petites feuilles. Le contexte sera donc décrit brièvement sur base des trois éléments suivants : L'âge d'or du tilleul, sa situation actuelle et sa relation avec le climat.

### 1. L'ère du tilleul

Selon Pigott (2012) et Latałowa et al. (2013), les analyses de pollen ont montré que le tilleul était une essence majeure des milieux forestiers européens, depuis le début de la période post ère-glaciaire jusqu'au milieu de la période de l'Holocène. Durant le maximum thermique très chaud et sec de l'Holocène, entre 8200 et 5300 B.P.<sup>2</sup> (au moins 3°C plus chaud qu'actuellement), sa dominance était quasi absolue en Europe de l'Est (Latałowa et al., 2013). Celle-ci fut maintenue pendant 2000 ans pour ensuite connaître un important déclin entre 4000 et 2400 B.P. selon la région (Pigott, 2012) et en raison d'un refroidissement du climat favorable à la croissance d'autres espèces ainsi que de l'augmentation des activités anthropiques. Cette régression a été confirmée dans plusieurs pays de l'Europe du Nord, qui ont connu en premier le déclin du tilleul suite à la chute des températures. Le tilleul a été rapidement supplanté par le hêtre et l'épicéa (De Jaegere et al., 2016).

---

<sup>2</sup> B.P. = « Before Present », ce qui se traduit par « avant le présent ». Il s'agit d'une locution utilisée en archéologie, en géologie et en climatologie pour désigner les âges exprimés en nombre d'années comptées vers le passé à partir de l'année 1950 du calendrier grégorien, voire symboliquement à partir du 1er janvier 1950. Cette date a été fixée arbitrairement comme année de référence et correspond aux premiers essais de datation par le carbone 14. (Foucault et Raoult, 2010 ; Foucault, 2009)

## 2. Le tilleul aujourd’hui

### 2.1. Répartition

Pigott (1991) décrit le tilleul comme l'une des essences les plus répandues au sein des forêts européennes. Il s'étend de la latitude 63°N jusqu'au nord de la péninsule ibérique et de la Grèce. Au nord, il est limité par l'isotherme de juillet, caractérisé par une température moyenne journalière maximale de 19 à 20°C. Au-delà, le climat devient trop contraignant pour cette essence qui supporte mal les températures estivales trop basses et les gelées trop fréquentes (Kulagin, 2007). Au sud, c'est l'intensité des sécheresses et la trop faible humidité de l'air et du sol qui limitent son expansion (Radoglou, 2009 ; Pigott et Pigott, 1993). Sa limite ouest est matérialisée par le nord de l'Irlande et il s'étend à l'est jusqu'au-delà de l'Oural en Russie centrale, où les précipitations finissent par devenir le facteur limitant. La Figure 1 ci-dessous illustre l'étendue de l'aire naturelle du tilleul. Néanmoins, il est possible de retrouver du tilleul en dehors de sa zone de confort si les conditions locales y sont favorables.

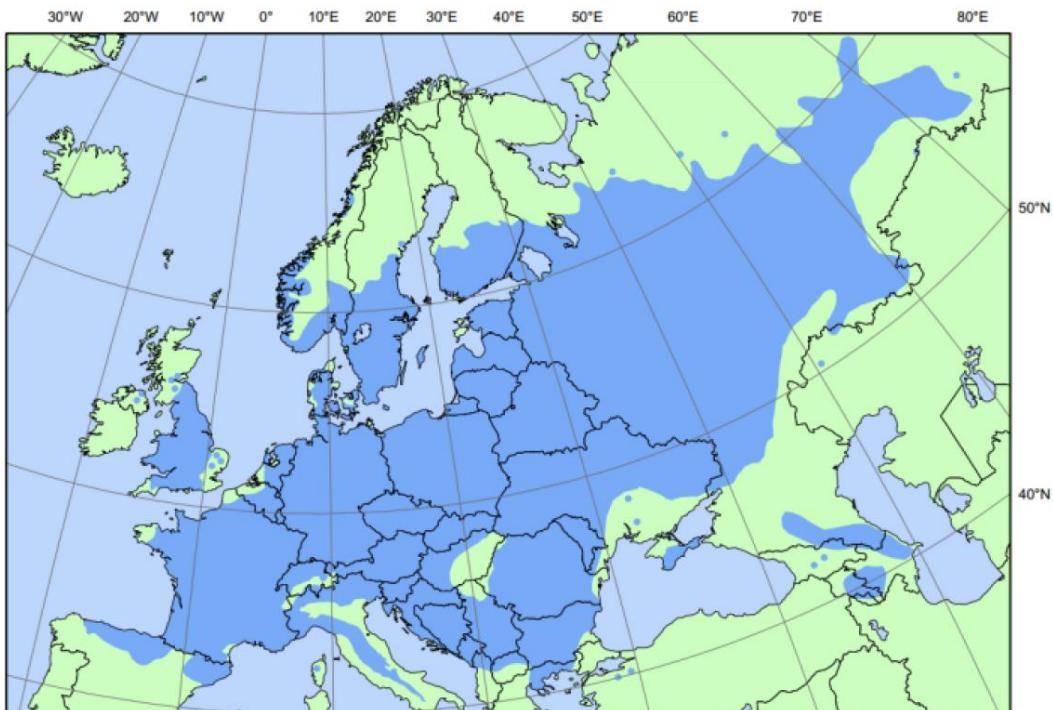


Figure 1 : Aire de distribution de *Tilia cordata* Mill. (Svejgaard Jensen, 2003)

### 2.2. Exigences stationnelles

Le tilleul est une essence à large tolérance thermique (températures minimale et maximale critiques : -48/-45°C à 44°C) (Radoglou et al., 2009 ; Pigott, 2012). Sa seule exigence, durant la période de végétation, est d'avoir une chaleur suffisante pour garantir son succès reproductif (bonne fertilité des graines). Lors de cette période, la température doit être supérieure à 15°C. De manière générale, les fortes températures impactent peu le tilleul. Il est toutefois essentiel d'assurer un apport suffisant en eau. En effet, la réponse de *T. cordata* est corrélée avec l'apport en eau mais ce facteur devient secondaire dès que les précipitations excèdent 550-600 mm. C'est alors la température qui devient le facteur prépondérant (Pigott, 2012). Le tilleul supporte également les températures froides. Les bourgeons en dormance sont capables de survivre, sans aucun dommage, à des températures pouvant descendre

jusque -34°C. De plus, l'essence a adopté une stratégie de survie efficace. Celle-ci consiste, d'une part, à débourrer tardivement dans le but d'éviter les dégâts dus aux dernières gelées printanières et d'autre part, à perdre précocement ses feuilles afin d'éviter les premières gelées à l'approche de la saison hivernale. Par conséquent, le tilleul a une période de végétation plus courte que la plupart des autres essences (Pigott, 1991 ; Weissen et al., 1991).

Non-impacté ou faiblement touché par les courtes périodes de sécheresse, le tilleul voit néanmoins sa croissance radiale et en hauteur réduites, particulièrement en été (Hemery et al., 2010 ; Pigott, 1991 ; Köcher et al., 2012 ; Thompson et Clark, 2006). Selon Pigott (1982), une symbiose mycorhizienne pourrait expliquer cette résistance à la sécheresse. De plus, l'arbre possède des racines profondes et des stomates relativement sensibles, ce qui permet une utilisation économique de l'eau. L'essence est dite « mésophile » et tolère aussi bien les sols très secs que les sols très humides (Weissen et al., 1991 ; Rameau et al., 1989 ; ). Le tilleul supporte notamment les courtes périodes d'inondation et est à armes égales avec le frêne (*Fraxinus excelsior*) pour cet aspect. Cependant, un engorgement prolongé du sol met en évidence une tolérance inférieure à celles du frêne ou des saules (*Salix sp.*). La texture du sol n'est pas non plus un élément limitant puisqu'il est possible de retrouver du tilleul sur sols sableux à argileux, en passant par les sols limoneux. Les sols fortement caillouteux lui conviennent également, au même titre que les sols superficiels, en pentes raides ou encore les escarpements rocheux et les ravins (De Jaegere et al., 2016).

De Jaegere et al. (2016) ajoutent que le tilleul peut croître dans des sols présentant un pH variant de 4 à 8, avec un optimum se situant aux alentours de 5 à 6. Il est également tolérant sur sols riches en calcaire.

L'**annexe 1** (page - 1 -) de ce présent mémoire contient la fiche complète du Nouveau Fichier Ecologique des Essences (DGO3, 2017) pour le tilleul à petites feuilles. Son contenu est inspiré de la fiche descriptive de l'ancien Fichier Ecologique des Essences (Weissen et al., 1991), de la revue de la littérature faite par De Jaegere et al. (2016) et de l'ouvrage de référence sur la biologie du genre *Tilia* (Pigott, 2012).

### 2.3. Stratégie de survie

Concernant son tempérament, le tilleul est une essence post-pionnière tolérante à l'ombrage, souvent qualifiée de « semi-ombre ». En guise de comparaison, on peut situer sa tolérance entre celles de l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*) et du hêtre (*Fagus sylvatica*). De plus, cette tolérance varie selon le stade de croissance (le besoin en lumière augmente avec l'âge) et la situation géographique (De Jaegere et al., 2016).

Il s'agit d'un arbre très longévif (>1000 ans) (Pigott, 1989 ; Mayer, 1992) qui rejette facilement de souche. Sa croissance est rapide entre 15 et 25 ans puis ralentit progressivement. En comparaison avec le hêtre, le tilleul croît plus rapidement entre <20-40 ans et montre un modèle de croissance en hauteur similaire à l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*), le frêne (*Fraxinus excelsior*), l'aulne glutineux (*Alnus glutinosa*) et le merisier (*Prunus avium*). Néanmoins, la croissance du tilleul est moins prononcée que ces derniers dans les premières années. Il est d'ailleurs régulièrement planté en peuplement mélangé avec d'autres feuillus précieux sciaphiles afin d'éviter les pousses épícorniques dans le sous-étage (De Jaegere et al., 2016).

Deux modes de reproduction existent pour le tilleul, à savoir génératif et végétatif. Cependant, la reproduction végétative, essentiellement par rejets de souche ou par drageons, est largement plus utilisée. Le genre est considéré comme hermaphrodite mais les fleurs mâles sont plus nombreuses. On parle dans le cas présent d'andromonoécie, c'est-à-dire que l'on distinguera soit des fleurs hermaphrodites, soit des fleurs mâles, le tout sur le même individu (De Jaegere et al., 2016).

Le tilleul est une essence intéressante du point de vue santé. Il n'a pas de pathogènes ou de maladies graves pouvant l'affecter. Les dommages éventuels liés aux insectes et aux champignons ne mettent pas en danger l'essence en milieu forestier. Les semis qui poussent dans des conditions favorables, même ceux de plus de 150 ans, ne présentent généralement aucune pourriture. Néanmoins, la pourriture peut apparaître dans le bois de cœur des tilleuls issus de rejets de souche à 60-70 ans (Pigott, 2012). Concernant le gibier, le tilleul n'est pas un arbre de choix pour les cervidés. Son attractivité est relativement modérée et moins importante que pour *Picea abies*, *Fraxinus excelsior*, *Betula pendula*, ou encore la plupart des fruitiers. Il est rarement visité et est donc modérément susceptible d'être écorcé par le cerf (Radoglou et al., 2009).

## 2.4. Sylviculture

Le tilleul à petites feuilles est rarement retrouvé en peuplement pur (Svejgaard Jensen, 2003) et se rencontre plutôt au sein d'une forêt mélangée, dispersé en petits groupes ou bien en arbres isolés. Sur les meilleurs sols, le tilleul est associé avec une série d'essences compagnes telles que l'érable sycomore, le bouleau verruqueux, le merisier ou les sorbiers dans les chênaies-charmaies secondaires. Cette essence est idéale pour contrôler l'apport en lumière du sous-bois et permet de limiter le développement de la strate herbacée. Elle favorise également l'élagage naturel des essences principales auxquelles elle est associée. La fane du tilleul est améliorante car elle se décompose rapidement dans la litière et apporte de nombreux nutriments, ce qui peut présenter un atout sur sols pauvres. Les rapports C/N et Lignines/N sont bas en comparaison avec ceux du hêtre (Langenbruchet et al., 2012). Le tilleul peut par la même occasion limiter le phénomène d'acidification naturel et augmenter la fertilité du sol s'il est mélangé aux peuplements existants. Enfin, ses fleurs sont une source importante de pollen pour les abeilles. Tout compte fait, il est certain que le tilleul est une essence auxiliaire de choix, bénéfique pour les peuplements en présence et généreuse en services écosystémiques (Pigott, 1991).

## 2.5. Qualité du bois de tilleul et utilisations

Toutefois, son rôle ne s'arrête pas à l'accompagnement. Selon Pigott (2012), le tilleul est capable de produire du bois de qualité, tant sur le plan technique (solide et flexible) qu'esthétique (structure régulière et fine, pas de différence de coloration entre l'aubier et le duramen). Une fois sec, le bois de tilleul est considéré comme l'un des meilleurs par les sculpteurs et les tourneurs, qui affectionnent particulièrement ses propriétés isotropiques. Ses caractéristiques en font également un matériau de choix pour la lutherie, l'ébénisterie et la menuiserie. Dans le domaine agroalimentaire, le tilleul n'influence pas sur les propriétés organoleptiques des aliments et sa légèreté est un atout supplémentaire. Les manches d'outils peuvent également être fabriqués en bois de tilleul car il a la particularité de ne pas laisser d'échardes en cas de frottement. En revanche, son manque de durabilité le rend inutilisable dans le bâtiment et la construction extérieure. De plus, les composés chimiques qu'il contient

le rendre incompatible avec la production de pâte à papier. Son utilisation principale est la menuiserie car il est possible d'obtenir naturellement et facilement des individus ayant une bonne longueur utile de bille, dépourvue de branches par élagage naturel (De Jaegere et al., 2016).

### **3. Le climat, son évolution et les implications de ses changements sur le tilleul à petites feuilles**

Selon l'IPPC (2014), les pays du Nord de l'Europe connaissent, depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle, une augmentation particulièrement intense de la température moyenne annuelle. De nombreux records de chaleur ont été battus entre 1998 et 2015. Depuis ces trente dernières années, la fréquence des événements climatiques extrêmes a sensiblement augmenté. Les modèles climatiques ne sont pas rassurants et prédisent, au mieux, la même tendance pendant le 21<sup>ème</sup> siècle. Les tempêtes et autres aléas liés au climat seront également plus fréquents et la communauté scientifique s'accorde sur les impacts négatifs de ces événements extrêmes sur les écosystèmes forestiers et leur état sanitaire (Lindner et al., 2010 ; Hemery et al., 2010 ; Latte et al., 2015.2)

Les scientifiques ayant étudiés la question des impacts potentiels des changements climatiques sur *T. cordata* concluent qu'un printemps plus chaud sera associé avec une reprise de végétation plus précoce, suivie d'une coloration automnale retardée. En d'autres termes, la courte période de végétation actuelle du tilleul pourrait se voir allongée avec le temps. Les populations de tilleuls observées ont adopté différentes stratégies d'adaptation et mécanismes face aux changements climatiques. Jusqu'à présent, les impacts attendus du changement climatique sur la vitalité du tilleul sont généralement déduits à partir de sa biologie par manque d'observations. En comparaison avec les réactions face au climat d'autres essences, la grande tolérance du tilleul aux vagues de chaleur et aux sécheresses est un avantage significatif. Ses racines solides devraient également limiter l'impact des tempêtes de vent sur les individus matures (De Jaegere et al., 2016).

Selon Spiecker et al. (2009), la tendance actuelle du tilleul à réapparaître dans les peuplements mélangés peut être partiellement expliquée par le réchauffement climatique, en référence à sa dominance ancienne quasi absolue durant le maximum thermique de l'Holocène (Huntley et Birks, 1983). Il est fortement probable que l'augmentation de la température estivale dans les pays nordiques a, et a déjà eu, un impact positif significatif sur le potentiel de production de graines fertiles par les tilleuls dans ces régions. Différents modèles prédisent aussi une expansion de la forêt boréale vers le nord et une augmentation significative de l'abondance du tilleul due au changement du climat. Dans les régions boréales et boréo-némorales, l'épicéa et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) souffriront des changements prévus à l'avantage des essences feuillues. Le hêtre, les chênes, le bouleau verruqueux et le tilleul pourraient s'étendre vers le nord et devenir plus compétitif, écologiquement parlant, suite à la hausse de température et à la prolongation de la saison de végétation. Dans la péninsule italienne, le changement climatique pourrait mener à une diminution significative des surfaces forestières (*T. cordata* inclus). L'augmentation potentielle de l'abondance du tilleul en Europe du Nord ne pourra se faire qu'avec la volonté du forestier. Il est nécessaire de continuer à rassembler de l'information sur le tilleul et sur les autres essences encore peu répandues afin de mieux mesurer les potentialités d'adaptation et les risques associés (De Jaegere et al., 2016).

D'après de Jaegere et al. (2016), il n'existe pas encore de marché ni d'itinéraires sylvicoles établis pour le tilleul. Néanmoins, il pourrait occuper une place potentiellement intéressante sur le marché futur étant donné sa grande productivité comparable aux autres essences feuillues traditionnelles d'Europe de l'Ouest et centrale. En effet, avec le changement climatique, l'approvisionnement de la plupart des essences commerciales largement utilisées pourrait décroître, ce qui impliquerait de trouver d'autres alternatives. Le tilleul n'a pas seulement un intérêt pour sa productivité mais aussi pour les nombreux services écosystémiques qu'il peut rendre (support de fertilité du sol, protection du sol, biodiversité, etc.) et pour ses rôles sylvicoles (prévention des développements épicormiques, gestion de la lumière en sous-bois, etc.). Il pourrait apporter une contribution considérable à la diversification de la forêt, laquelle devra bientôt relever un défi important face aux changements globaux. La diversification est l'une des meilleures stratégies d'adaptation aux changements incertains. Un effet tampon peut être créé pour contrer les risques liés au réchauffement, d'autant que le tilleul est actuellement dépourvu de maladies ou ravageurs problématiques. La résilience de l'écosystème doit être renforcée pour contrer les extrêmes climatiques. Les risques liés à la sylviculture du tilleul dans le futur sont clairement minimisés grâce à ses caractéristiques propres.

#### 4. Conclusions

De Jaegere et al. (2016) concluent en disant que *T. cordata* se développe dans un très large éventail de conditions environnementales. Il est capable de s'implanter sur une large gamme de sols. De plus, sa flexibilité climatique face à des événements secs ou chauds est remarquable. Le tilleul fournit également de nombreux services écologiques. Il a également des atouts sylvicoles et possède un réel potentiel en termes de production de bois. Le tilleul représente une opportunité pour la gestion forestière en proie aux changements globaux. L'adaptation aux changements climatiques implique une augmentation de la diversité des espèces et *T. cordata* apparaît comme une essence de choix au vu de ses nombreux points forts. Malheureusement, l'essence est encore très disséminée dans les forêts d'Europe occidentale et présente un faible intérêt pour la littérature. L'amélioration des connaissances sur les espèces disséminées est donc cruciale afin de mieux déterminer leur potentiel.

### III. L'évaluation des potentialités du tilleul par la dendroécologie

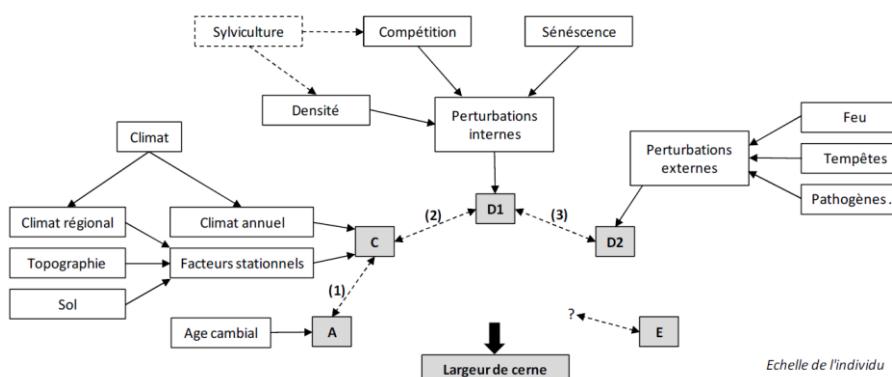
#### 1. Définition et principes

Selon Lebourgeois et Merian (2012), « la dendrochronologie (du grec : *dendron* = arbre ; *kronos* = le temps ; *logos* = l'étude) est une science qui repose sur la mesure des largeurs des cernes annuels de croissance et sur leur datation précise ». Cette science regroupe plusieurs domaines desquels découlent des disciplines spécialisées.

Latte et al. (2012) affirment que l'accroissement annuel du bois dépend d'une multitude de facteurs intrinsèques (espèce, individu, génétique, stade, état de santé global, etc), stationnels (climat, topographie, pédologie, aléas naturels, etc) et sylvicoles (statut au sein du peuplement, concurrence). Avec ses variations constantes d'une année à l'autre, le climat s'avère être un facteur particulièrement explicatif du comportement des essences forestières.

La présente étude associe justement la dendrochronologie et l'autécologie<sup>3</sup> du tilleul à petites feuilles afin de déterminer sa sensibilité au climat. La principale discipline concernée est donc la « dendroécologie ». Ces outils sont de plus en plus utilisés pour étudier et détecter les variations de l'environnement.

La dendrochronologie est basée sur le modèle conceptuel de Cook (1985) repris à la Figure 2 et complété par Mérian (2012). Ce cycle est basé sur le postulat qu'un arbre produit des cernes annuels dont la largeur est influencée par les variations interannuelles des conditions de son environnement et de ses processus physiologiques. Cook (1985) a créé un modèle de base purement théorique puisqu'il considérait les effets des facteurs de manière additive pour expliquer la largeur de cerne ( $LC = A + C + D1 + D2 + E$ ), sans prendre en compte les interactions entre facteurs. Les principaux facteurs pris en compte sont l'âge cambial [A] (l'accroissement diminue avec l'âge de l'arbre une fois son optimum de croissance dépassé), le climat [C] (l'accroissement peut être réduit ou favorisé lors d'événements climatiques exceptionnels), les perturbations internes [D1] (liées essentiellement au mode de sylviculture appliquée et à la hiérarchie du peuplement), les perturbations externes [D2] (Feu, tempêtes, pathogènes) et enfin la variation inter-individus [E]. (Lebourgues et Merian, 2012).



**Figure 2 : Synthèse des facteurs influençant la variabilité de la largeur de cerne (Mérian, 2012). Les notes (1) à (3) illustrent quelques interactions possibles entre les cinq catégories de signaux (A à D2) du modèle conceptuel de Cook (1985).**

Selon Latte (2017), les nombreux facteurs décrits ci-dessus peuvent influencer les largeurs de cerne d'un individu selon plusieurs fréquences. En effet, on distingue (Figure 3) :

- ✓ La basse fréquence : celle-ci décrit la variabilité sur le long-terme (50-100 ans) et dépend principalement du stade de développement de l'arbre. L'évolution de la sylviculture et les impacts de la pollution atmosphériques peuvent également être étudiés grâce à la basse fréquence.
- ✓ La moyenne fréquence : on étudie cette fois les variations pluriannuelles (5-10 ans) dues aux éclaircies sylvicoles, aux pertes de vitalité (dépérissages) et même au climat si le stress occasionné est important.
- ✓ La haute fréquence est liée quasi exclusivement aux variations dues au climat de l'année en cours ou précédente. Il s'agit donc du signal climatique de l'accroissement.

<sup>3</sup> Science qui étudie l'ensemble des relations d'une espèce vivante avec son milieu (Larousse, 2017)

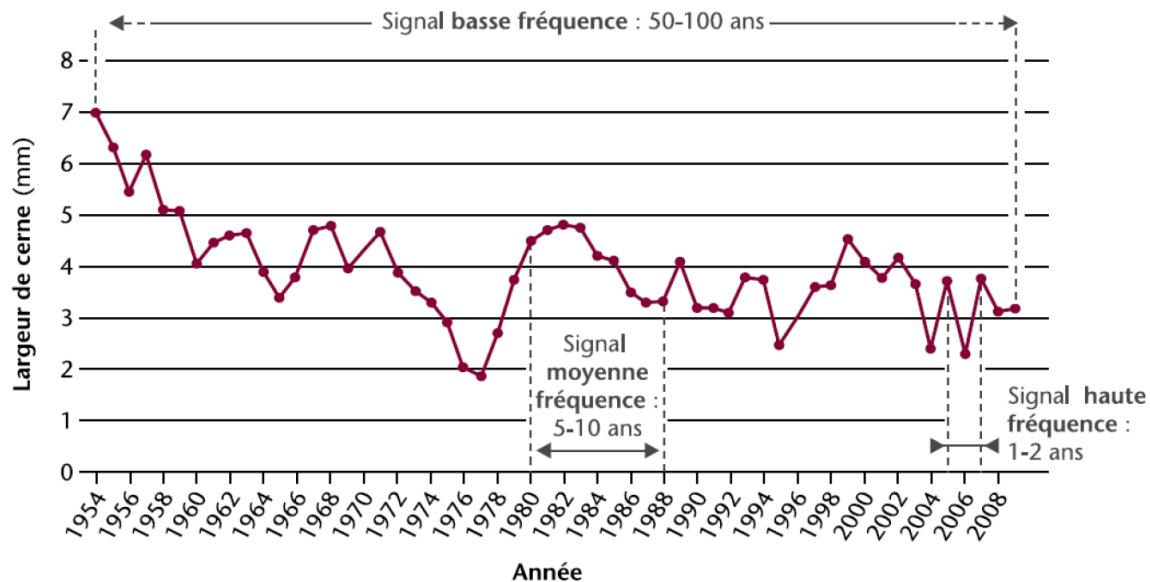


Figure 3 : Signaux basse, moyenne et haute fréquences de l'accroissement radial d'un arbre (Latte et al., 2012)

## 2. Méthodologie générale

L'organigramme ci-dessous (Figure 4) présente de façon simplifiée les différentes étapes qui ont permis d'obtenir et de présenter les résultats de ce travail de fin d'études.

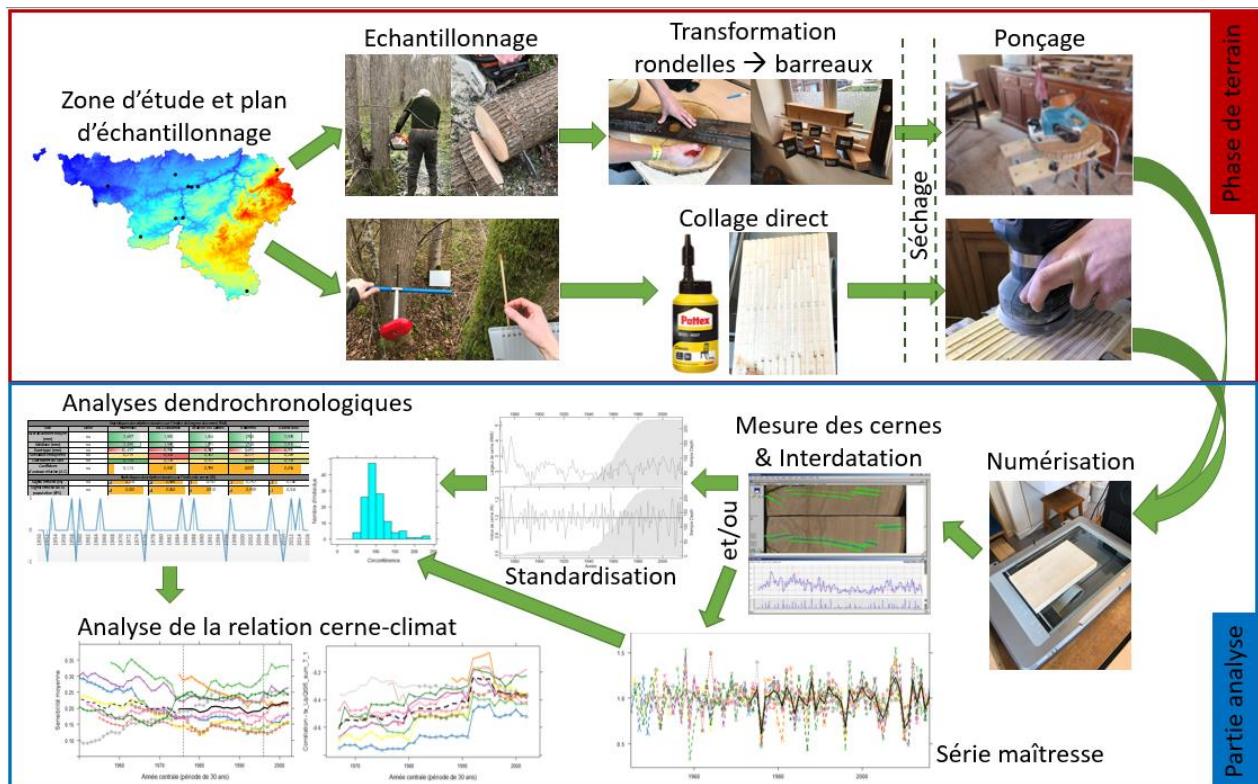


Figure 4 : Méthodologie générale – Organigramme (Photos : Latte, Porsont et Taverniers, 2017)

## **IV. Matériel et méthode**

### **1. Présentation de la zone d'étude et choix des sites**

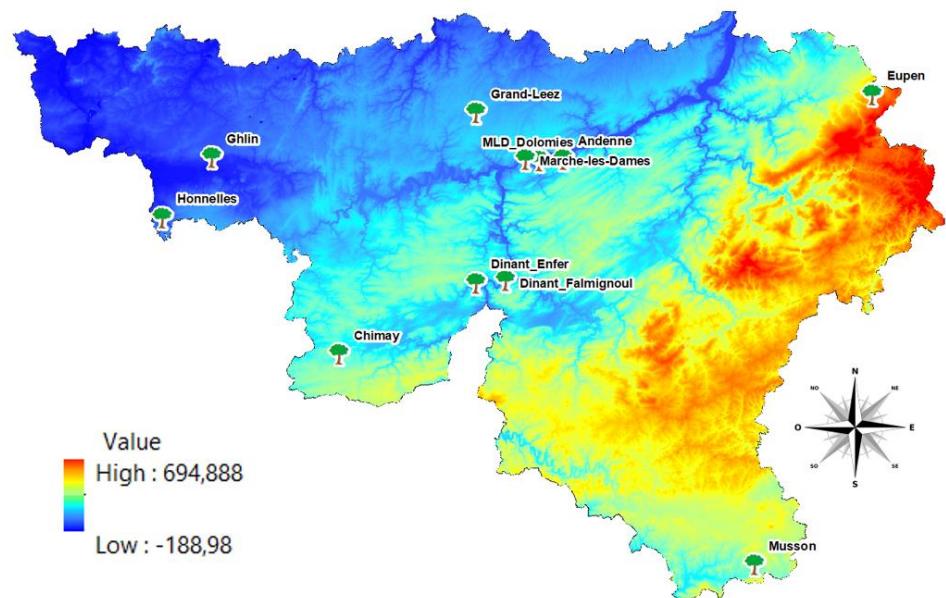
Les recherches et travaux menés par De Jaegere et al. (2016) ont abouti, entre autres, à la réalisation de fiches descriptives pour un ensemble de placettes contenant du tilleul à petites feuilles. Ces fiches synthétisaient l'ensemble des informations stationnelles et les mesures effectuées sur 479 tilleuls « sains » (sur 520) et prises dans 44 placettes (dans 29 peuplements) à travers toute la Wallonie. Pour trouver des placettes contenant du tilleul, trois sources de données ont été nécessaires aux prospections de M. De Jaegere : l'IFW (Inventaire Forestier Wallon de 1980), l'IPRFW (Inventaire Permanent de Ressources Forestières de Wallonie) et les données de l'Observatoire de la biodiversité en Wallonie.

Sur les 29 peuplements, 10 sites présentaient un potentiel dendroécologique intéressant, c'est-à-dire qu'ils contenaient des tilleuls dominants et/ou co-dominants. Le choix s'est donc avant tout orienté selon les possibilités d'abattage et de forage au sein de ces peuplements. De plus, les prélèvements devaient maximiser la diversité des contraintes stationnelles. Le site situé à Rochefort faisait partie de cette liste mais il s'est avéré que les tilleuls qu'il contenait, tous plantés en 1992, étaient beaucoup trop jeunes pour répondre aux objectifs de l'étude. Le site de Braibant n'a pas non plus été pris en compte car le propriétaire (privé) était injoignable. Dans le bois de Grand-Leez, des placettes avaient été identifiées mais leur potentiel dendrochronologique était faible. Ce site a initialement servi de test pour les prélèvements à la tarière de Pressler et a finalement été intégré au jeu de données. Le site de Ghlin, au potentiel dendrochronologique intéressant, a été échantillonné (15 carottages) mais les analyses n'ont pas pu être menées à terme par manque de temps. Enfin, deux nouveaux sites ont pu être mis en évidence et analysés au cours de ce présent travail de fin d'étude. Il s'agit des sites de Marche-les-Dames et de Falmignoul.

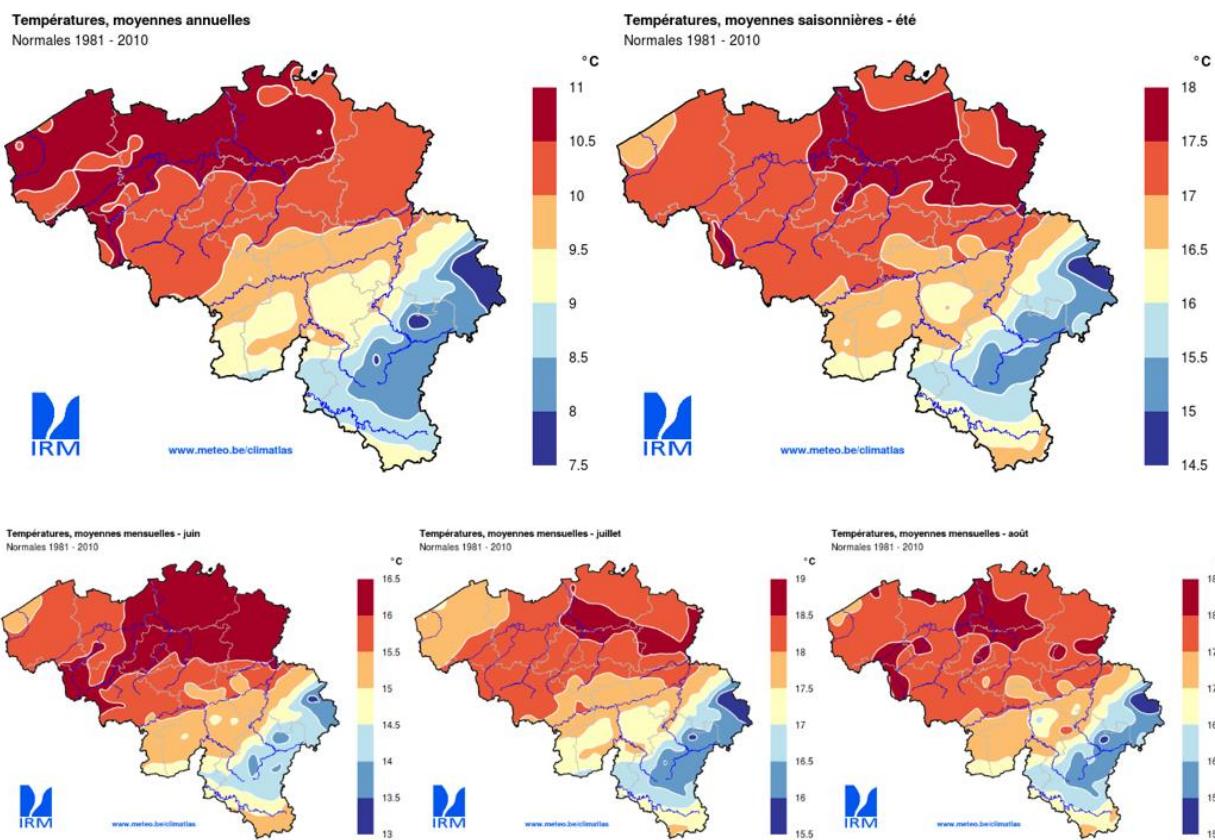
Onze peuplements contenant des tilleuls à petites feuilles ont donc été échantillonnés sur l'ensemble de la Wallonie. Cet échantillonnage couvre 6 régions bioclimatiques distinctes (Figure 5) et est réparti selon un gradient altitudinal (60 – 480 m) (Figure 6).



**Figure 5 : Localisation des sites échantillonnés sur la carte bioclimatique de Wallonie (Van der Perre et al., 2015)**

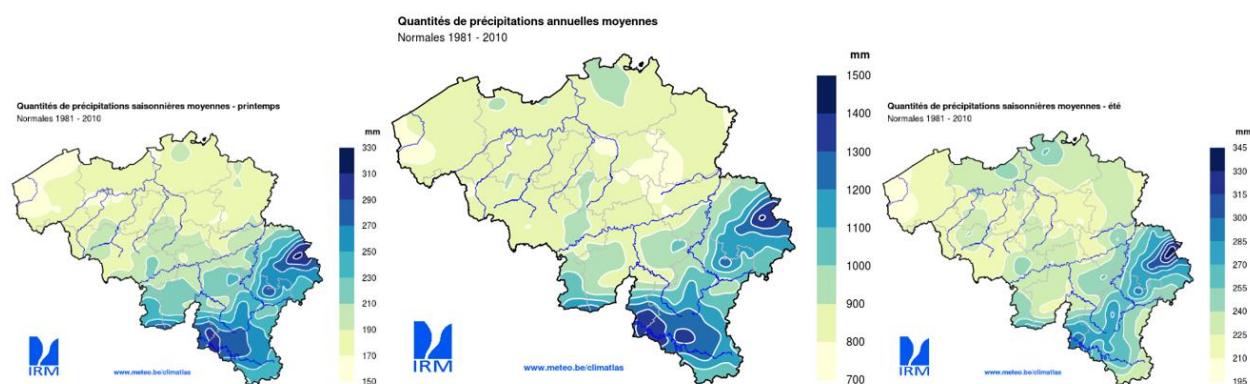


**Figure 6 : Localisation des sites échantillonnés sur le gradient altitudinal wallon (SPW, 2015)**



*Figure 7 : Cartes de l'atlas climatique de l'Institut Royal Météorologique belge (IRM).*  
*En haut à gauche : Normales des températures moyennes annuelles. En haut à droite : Normales des températures moyennes estivales. En bas de gauche à droite : Normales des températures moyennes des mois de juin – juillet – août.*

Le long de ce gradient, les températures moyennes annuelles (TMA de 1981-2010) passent de 11°C en Campine à 7,5°C pour les Hautes Fagnes et certains sommets de l'Ardenne (Figure 7 – en haut à gauche). La TMA s'élève en Belgique à 9,8°C. La température moyenne décroît d'environ 0,6°C / 100 m d'altitude, ce qui explique les 3°C de différence entre les plaines et les hauts plateaux ardennais. L'IRM (2017) relève la température moyenne mensuelle la plus élevée en juillet (Figure 7 – en bas au centre), tandis que le mois de janvier est le plus froid (2,5°C).



*Figure 8 : Cartes de l'atlas climatique de l'Institut Royal Météorologique belge (IRM).*  
*Au centre : Normales des précipitations totales annuelles. A gauche : Normales des précipitations totales printanières. A droite : Normales des précipitations totales estivales.*

Selon l'IRM (2017) Le gradient est également marqué par les précipitations totales annuelles qui peuvent varier du simple au double (740 mm/an au nord de la Hesbaye à plus de 1400 mm/an pour les Hautes Fagnes). Elles s'élèvent en moyenne à 925 mm/an (Figure 8 – au centre). Le relief peut sensiblement influencer les normales de quantité de précipitations (moins importantes en basse altitude) et l'orientation des versants joue également un rôle important. Les moyennes de précipitations sont généralement plus abondantes en hiver et les plus faible au printemps (Figure 8 – à gauche). Le mois présentant habituellement les plus fortes précipitations est celui de décembre, tandis qu'avril se présente comme étant le plus sec. Durant la période d'avril à septembre, les précipitations sont maximales dans les Hautes Fagnes, tandis que d'octobre à mars, elles sont maximales dans la zone Libramont-Carlsbourg-Bouillon.

Depuis le début du 20ème siècle, la Belgique a vu sa température moyenne annuelle augmenter d'environ 2°C (IRM, 2017). Une concentration des années les plus chaudes et/ou sèches a été observée pour ces dernières décennies (Figure 9), période durant laquelle la fréquence et l'intensité des canicules et sécheresses ont augmenté significativement (Latte et al., 2017).

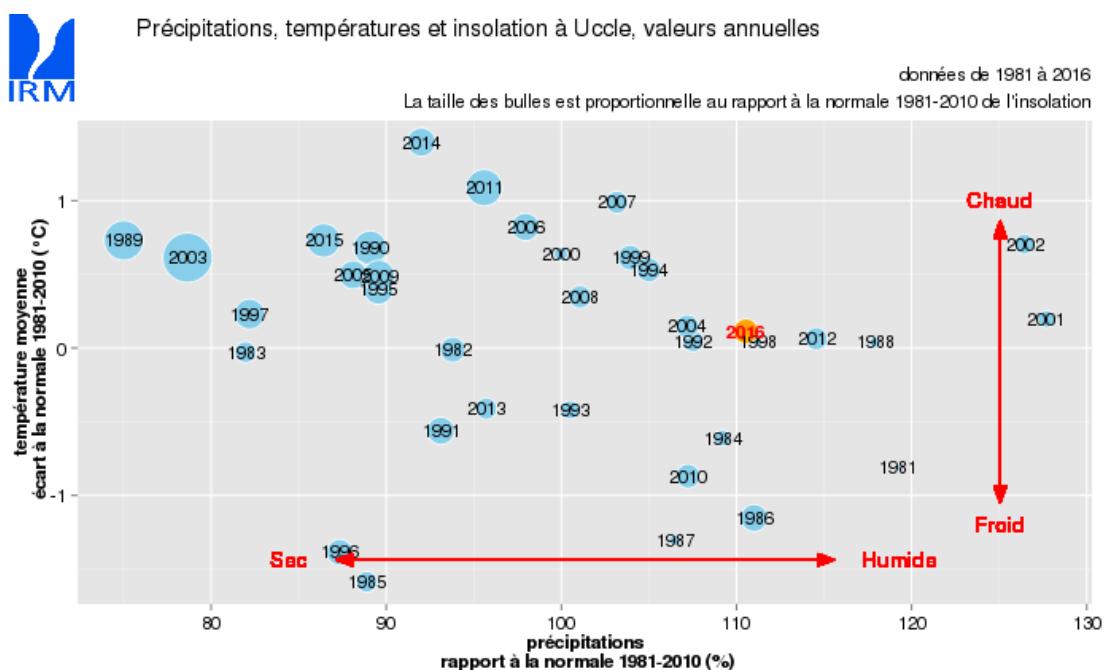


Figure 9 : Valeurs annuelles des précipitations, des températures et de l'insolation (proportionnelle à la taille des bulles) à Uccle de 1981 à 2016 (IRM, 2017)

Selon le GIEC, la tendance décrite par les principaux modèles climatiques prédit une augmentation de la TMA de 2 à 4°C et jusqu'à 3 à 4°C en été d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (IPCC, 2014 ; moyenne des principaux modèles et scénarios). La fréquence d'observation des valeurs extrêmes par rapports aux normales saisonnières va elle aussi augmenter. Les précipitations totales annuelles devraient rester stables mais avec une répartition plus contrastée au fil des saisons (plus faibles en été, plus fortes en hiver) mais ces prévisions sont à considérer avec plus de prudence. L'effet combiné des canicules et des faibles précipitations en période de végétation aura donc à coup sûr des répercussions négatives sur l'humidité relative de l'air et la réserve en eau utile des sols, tandis que la demande en eau augmentera suite à une évapotranspiration accrue.

## 2. Protocole de récolte, préparation et analyse des échantillons

La rédaction de ce protocole est largement inspirée des procédures appliquées par Latte (2017) dans le cadre de sa thèse de doctorat portant sur la dendroécologie du hêtre en Belgique.

### 2.1. Récolte des carottes et rondelles/barreaux

#### 2.1.1. Méthode générale d'échantillonnage

Etant donné la diversité des caractéristiques inter-sites (plantations, bouquets, individus épars, dominance par rapport aux autres essences, contraintes de prélèvement d'échantillons, etc.), la sélection des échantillons sera appréciée directement sur place. Néanmoins, dans la mesure du possible, cet échantillonnage tiendra compte des différences stationnelles au sein du site (pédologie, topographie, etc.) afin d'avoir une représentativité optimale pour chaque site échantillonné.

#### 2.1.2. Récolte de rondelles

Lors de la première visite au sein d'un site potentiellement intéressant du point de vue dendrochronologique, le propriétaire, le gestionnaire ou l'agent DNF responsable du peuplement est systématiquement invité à être présent. De cette façon, les objectifs et détails techniques de la recherche lui sont exposés de manière directe et plus claire. La partie la plus délicate consiste à obtenir une autorisation d'abattage pour un ou plusieurs arbres, le but étant de récolté un ou plusieurs échantillons de type « rondelle ». La qualité de l'information extraite d'une rondelle est supérieure à celle obtenue par le carottage en termes de fiabilité puisque la surface de lecture est plus large et claire (Latte et al., 2015.2). Cela est d'autant plus vrai dans le cas du tilleul à petites feuilles, dont l'accroissement et la disposition des cernes les uns par rapports aux autres peuvent se révéler très particulier (Figure 10).



Figure 10 : Mise en évidence de défauts occasionnels dans le bois de tilleul – Barreau « Falm04 » prélevé à Falmignoul (Cantonnement de Dinant) (Photo : Taverniers, 2017)

Idéalement, 8 abattages-rondelle permettent une représentativité suffisante du site (Latte et al., 2015.2). Cependant, dans la plupart des cas, ce nombre ne sera pas atteint et nécessitera automatiquement plusieurs carottages (cf. point 2.1.3).

Dans la mesure du possible et avec l'accord du propriétaire/gestionnaire forestier, les arbres sélectionnés pour abattage-rondelle doivent être dominants ou co-dominants et sans défauts significatifs, et dont l'estimation de l'âge est supérieure à 30 ans (idéalement >50 ans). En effet, la réponse climatique de ces arbres sera généralement plus significative que dans le

cas d'arbres dominés depuis de nombreuses années. Un seuil d'estimation de l'âge intervient également pour permettre l'étude de la réponse climatique du tilleul face à certaines années climatiques exceptionnelles connues, appelées « années caractéristiques ».

### 2.1.3. Récolte de carottes

Lorsque le nombre d'abattages-rondelle est insuffisant (< 8 rondelles), des prélèvements de carottes sont effectués à l'aide d'une tarière de Pressler (cf. point 2.1.4.2).

Le nombre d'arbres à carotter dépend principalement des autorisations, obtenues ou non, pour un ou plusieurs abattages-rondelle. Dans tous les cas, le prélèvement de deux carottes par arbres a été fixé.

Si aucun arbre ne peut être abattu pour l'obtention de rondelles, le nombre d'arbres à carotter s'élève idéalement à 15. Pour une essence comme *T. cordata*, ce nombre peut être considéré comme représentatif d'un site donné étant donné le peu d'arbres disponibles par site. Selon Lebourgeois et Mérian (2011), ce nombre est trop faible car, pour une essence tolérante à l'ombrage, ils préconisent 20 à 30 arbres carottés pour que la population échantillonnée soit représentative de la distribution théorique. Dans une étude de 2012 réalisée sur plusieurs essences, Latte et al. se basent sur un minimum de 12 arbres. Afin d'éviter les interprétations hâtives, la discussion des résultats tiendra compte du signal effectif (ES) et de l'indice EPS (cf. point 3.2.2.8) de chaque site.

L'échantillonnage sera aussi considéré comme valable si un ou plusieurs abattages-rondelle sont autorisés et que le nombre d'arbres pouvant être carottés est inférieur à 15.

Dans le cas d'une interdiction d'abattages-rondelle et d'un effectif d'arbre caratables inférieur à 15, l'échantillonnage sera moins représentatif du site prospecté. Les mesures sont néanmoins réalisées et exploitées avec plus de prudence.

Dans la même optique que les prélèvements de type « rondelle », les carottes seront prélevées préférentiellement sur les individus dominants ou co-dominants et sans défauts significatifs (Latte et al., 2015.2). L'estimation de l'âge doit être supérieure à 35 ans (idéalement >50 ans) afin d'intégrer la mesure de l'année caractéristique repère 1976.

### 2.1.4. Méthode de prélèvement

#### 2.1.4.1. Rondelles/barreaux

Les arbres préalablement sélectionnés sont abattus. Ensuite, une rondelle d'environ 6 à 10 cm d'épaisseur (selon l'importance de la circonférence) est prélevée sur chacun d'eux à une hauteur d'environ 1,3 mètre. De cette façon, la variabilité liée à l'effet d'empâtement est évitée.

Afin d'éviter les fentes de retraits lors du séchage des rondelles, un trait de tronçonneuse supplémentaire doit être fait en partant du bord extérieur de la rondelle vers le centre (sans toutefois l'atteindre) (Figure 11).



Figure 11 : Libération des contraintes tangentielles du bois pour les rondelles de petites dimensions (Photo : Taverniers, 2017)

Lorsque les dimensions de la rondelle sont supérieures à celle de la vitre du scanner (44 x 32 cm), il est nécessaire de procéder différemment. L'échantillon de type « rondelle » est alors transformé en échantillon de type « barreau » (Latte et al., 2015.2 ; Latte, 2017). Le principe du barreau est de réaliser deux coupes tangentielles parallèles sur la rondelle, en y incluant la moelle. La largeur d'un barreau est de 12 cm. Les deux côtés du barreau doivent être lisibles en termes de comptage de cernes. Cette méthode permet notamment de réduire la surface à numériser (ce qui diminue simultanément la taille de l'image numérique). La Figure 12 ci-dessous illustre les opérations à réaliser pour produire un échantillon de type « barreau ».



*Figure 12 : Libération des contraintes tangentielles du bois par transformation des rondelles de grandes dimensions en format « barreau » (Photos : Latte et Taverniers, 2017)*

Un code est attribué à chaque rondelle et est repris sur une étiquette plastifiée et agrafée sur place. Ce code sera attribué de la manière suivante :

- Localisation géographique en (4 lettres) ;
- Numéro de l'arbre abattu (2 chiffres).

Exemple pour le site du Parc du Prince à Chimay : Chim27, Chim28, etc.

#### **2.1.4.2. *Carottes***

Le prélèvement s'effectue à hauteur de poitrine (1,3 m) à l'aide d'une tarière de Pressler (Figure 13 et Figure 14). L'objectif est d'atteindre la moelle au centre du tronc (cette dernière pouvant parfois être décentrée).

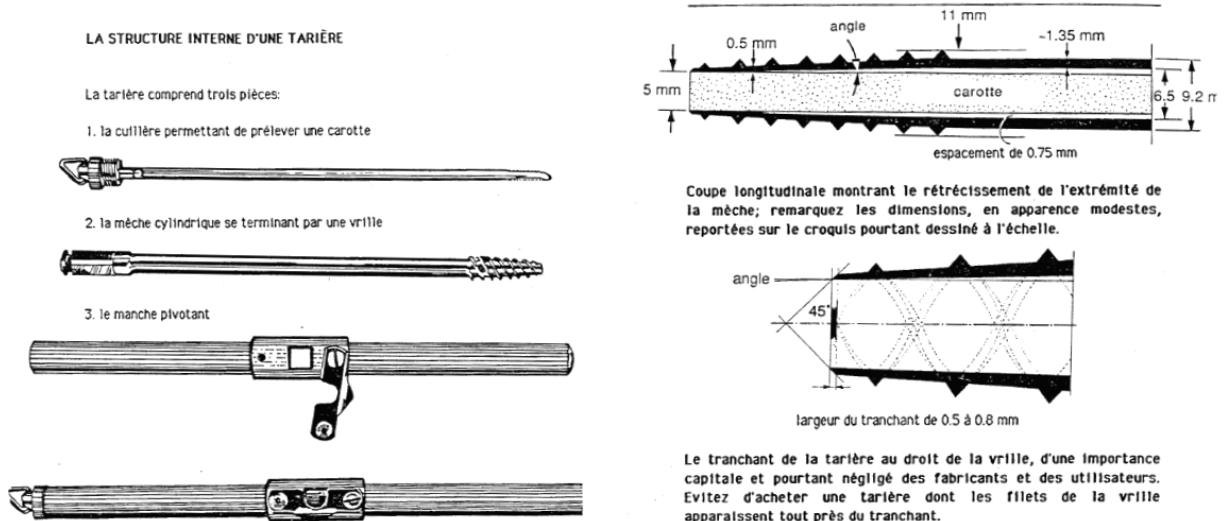


Figure 13 : Composition et structure interne d'une tarière de Pressler selon Les Jozsa (1989)

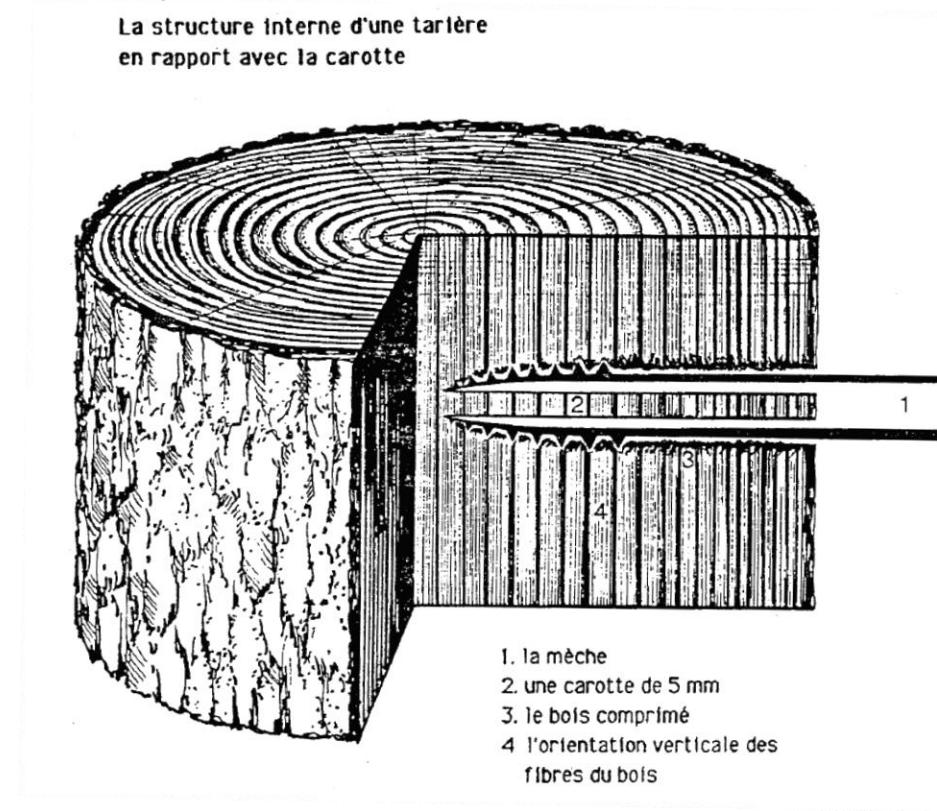
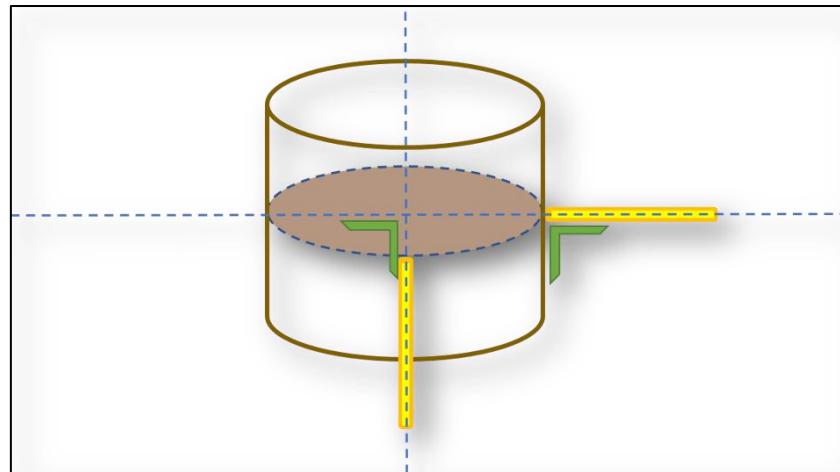


Figure 14 : Schéma de prélèvement d'une carotte à la tarière de Pressler selon Les Jozsa (1989)

Si la présence de bois de tension apparaît comme évidente, suite à une inclinaison plus ou moins importante de l'arbre, les deux prélèvements devront de préférence être réalisés en évitant ce bois de tension. Dans le cas contraire, les deux carottes doivent être prélevées de manière perpendiculaire l'une par rapport à l'autre, telle que l'illustre l'Figure 15 ci-après.



*Figure 15 : Prélèvements de deux carottes perpendiculaires entre-elles*

Un code est attribué à chaque carotte et se compose des éléments suivants :

- Localisation géographique en (4 lettres) ;
- Numéro de l'arbre carotté (2 chiffres) ;

Exemple pour le Parc du Prince à Chimay : Chim01 (x2), Chim-02 (x2), etc.

Pour le transport, plusieurs porte-carottes (Figure 16) ont été fabriqués à partir de panneaux en plastique creux.



*Figure 16 : Porte-carotte destiné au transport des échantillons (Photo : Taverniers, 2017)*

## **2.2. Préparation des échantillons**

### **2.2.1. Préparation des rondelles/barreaux**

Une fois séchées, les rondelles sont poncées à l'aide de deux types de ponceuse. La première est une ponceuse professionnelle à bandes. Cet outil réalise un travail intensif sur le bois et permet d'aplanir les défauts grossiers liés au tronçonnage. Il est impossible d'obtenir une finition de qualité avec ce type de machine. C'est pourquoi une seconde ponceuse dite « excentrique » est utilisée.

A chaque étape du ponçage, un flux d'air comprimé est dirigé vers la surface de travail de la machine en état de marche afin d'évacuer instantanément la sciure et la poussière générées. De cette manière, les pores du bois sont moins vites colmatés et les largeurs de cernes demeurent par conséquent plus lisibles, même à l'œil nu.

#### **2.2.1.1. Utilisation de la ponceuse à bande**

Le papier de verre utilisé avec la ponceuse à bande répond aux normes FEPA-Standards 42-1:2006 ; 42-2:2006 et ISO 8486 (FEPA, 2017). Son code, « F120 », correspond à des macro-grains ayant un diamètre de 109µm. La gamme de papier de verre disponible en magasin ou par commande spécialisée varie du code F4 (macro-grains de 4890 µm) à F2000 (micro-grains de 1,2 +- 0,3 µm).

Malgré sa relative finesse, le F120 se montre très abrasif une fois associé à la puissance d'une ponceuse professionnelle. Il est donc nécessaire de rester attentif lors de son utilisation afin de ne pas enlever une trop grande quantité de matière ligneuse, le but étant de rendre la surface de la rondelle la plus plane possible avant l'étape de numérisation (cf. point 2.3).

#### **2.2.1.2. Utilisation de la ponceuse excentrique**

Une fois les gros défauts éliminés, le travail est relayé par la ponceuse excentrique. Trois types de papier de verre sont utilisé avec cette machine significativement moins puissante que la ponceuse à bande. Un premier ponçage est réalisé avec un papier de verre F80 (Macro-grains de 185 µm). Il s'agit d'un macro-grain plus grossier que celui employé précédemment avec la ponceuse à bande. Néanmoins, le travail est beaucoup plus doux avec cette association (Ponceuse excentrique – F80). Les défauts mineurs restants et les imperfections liées au passage de la ponceuse à bande sont ainsi atténués, voire éliminés.

Un second passage est effectué avec un macro-grain F180 (69 µm). Cela affine encore la qualité du travail et permet d'éliminer des défauts de moins en moins grossiers.

Enfin, un troisième et dernier passage, utilisant cette fois un micro-grain F240 (44,5 +- 2 µm), peaufine les dernières aspérités de la surface à numériser.

## 2.2.2. Préparation des carottes

Deux méthodes ont été expérimentées pour la préparation des carottes. La première consistait à planer les échantillons à l'aide d'une machine spécialisée, une double scie circulaire (cf. point 2.2.2.1). Cette machine permet de planer les carottes sur les sections transversales inférieure et supérieure de la carotte (sections définies par rapport à l'arbre sur pied) et d'obtenir des lamelles d'épaisseur identique. Néanmoins, cette méthode est très contraignante en termes de délais (séchage complet obligatoire des échantillons et temps de fonctionnement). De plus, un problème technique apparaît lorsque les carottes sont plus longues que le support de fixation de la double-scie. C'est pourquoi une seconde méthode a été mise au point. Le principe est de coller directement les carottes (sans séchage préalable) sur des supports préalablement rainurées (cf. point 2.2.2.2).

### 2.2.2.1. Première méthode : Double scie circulaire

#### ✓ Séchage

Avant le planage, il est nécessaire de procéder à un séchage des carottes fraîchement récoltées. Cette étape peut se faire à température ambiante (environ 20°C) pendant au moins 48h. Le séchage est nécessaire pour faciliter le travail de la double-scie circulaire et pour assurer une meilleure qualité de rendu post-sciage (ce qui facilitera l'étape de lecture).

Toutefois, il faut impérativement que les carottes soient contenues dans un « séchoir » adapté à leur diamètre afin d'éviter que celles-ci ne perdent leur rectitude. Ce type de séchoir peut être réalisé à partir de planches en multiplex (88 x 34 x 1 cm dans le cas présent). Des rainures de 6 mm de larges, sur 3 mm de profondeur et espacées par un intervalle allant de 5 à 8 mm sont réalisées à l'aide d'une défonceuse (combinée à une fraise de 6 mm). Une planche de dimension identique est ensuite placée par-dessus en guise de couvercle, ce dernier pouvant être maintenu par des tiges filetées et des écrous de type « papillons » (Figure 17).



Figure 17 : Construction d'un séchoir pour la préparation des carottes (Photo : Taverniers, 2017)

#### ✓ Planage

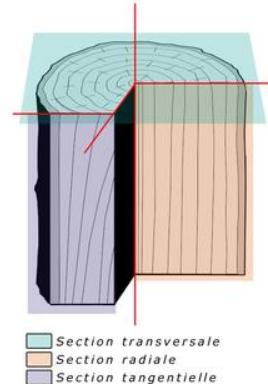
Cette étape est essentielle pour assurer une bonne lecture des cernes lors de l'analyse. Le planage est donc réalisé à l'aide d'une double-scie circulaire (Figure 18) spécialement conçue pour des études de densitométrie du bois.



*Figure 18 : Placement et planage d'une carotte avec la double scie circulaire (Photo : Taverniers, 2017)*

#### Méthode :

- Avant de positionner la carotte face au deux lames circulaires de la machine, il faut s'assurer de réaliser la double coupe dans la section transversale des cernes (Figure 19).
- Afin de faciliter le positionnement, un fin trait peut être tracé à l'extrémité de la carotte (côté moelle) parallèlement à la carotte et sur la section radiale des cernes (ou tangentielle lorsque la moelle n'est pas visible sur la carotte). Cela permet d'avoir un repère visuel lors de la fixation de la carotte sur le rail (Figure 20).



*Figure 19 : Sections de référence du bois (Image : wikipedia.org, 2010)*



*Figure 20 : Placement du repère visuel selon l'orientation des fibres du bois*

- Une fois la carotte fixée sur le rail, le cycle automatique de la machine peut être lancé.

#### ✓ Collage

Une fois planés, les échantillons sont collés sur une planche qui servira de support pour les étapes suivantes. Une planche de dimension 30 x 20 cm peut accueillir jusqu'à 6 arbres échantillonnes (soit 12 carottes).

✓ Ponçage

Bien que le résultat post-sciage soit de qualité suffisante pour une lecture à l'œil nu, un ponçage réalisé avec un micro-grain F240 ( $44,5 \pm 2 \mu\text{m}$ ) est appliqué. L'objectif est de profiter au maximum de la haute résolution de la numérisation, étape préalable à l'analyse de cernes proprement dite (cf. points 2.3 et 2.4), pour augmenter la fiabilité de l'analyse automatisée du programme WinDENDRO (Regent Instruments Inc., 2002).

#### 2.2.2.2. Deuxième méthode : collage direct

✓ Supports

Contrairement à la méthode précédente, il n'est pas nécessaire de sécher préalablement les carottes à température ambiante avant le collage sur le support définitif. En effet, une fois les échantillons prélevés sur le terrain, ceux-ci peuvent être directement placé sur des supports particuliers (Figure 21).



Figure 21 : Prototype de support pour le collage direct (Photo : Taverniers, 2017)

Ces supports ont été fabriqués à partir de planches en bois relativement épaisses (+3 cm), suffisamment larges (18 à 20 cm). Il est également important que les planches utilisées soient sèches depuis un bon nombre d'années afin de garantir leur stabilité et d'éviter les irrégularités.

A l'aide d'une défonceuse combinée à une fraise de 5 mm, des rainures d'une profondeur de 2,5 mm (soit la moitié du diamètre d'une carotte) sont créées sur toute la longueur de la planche. Ces rainures sont séparées par un intervalle de 8 mm afin d'éviter l'éclatement du bois inter-rainures. Une fois l'opération terminée, la dernière étape consiste à découper cette grande planche d'environ 2 m en plusieurs petites planches rainurées de 30 cm de longueur à l'aide d'une scie circulaire.

✓ Collage

Les carottes fraîchement prélevées sont collées directement sur les supports (jusqu'à 6 arbres, soit 12 carottes par planche). Il est nécessaire d'identifier chaque support en lui attribuant par exemple une lettre et en précisant la provenance et la numérotation des échantillons qui y sont collés (ex : A, Chim01\_05).

✓ Ponçage

La dernière étape de préparation des carottes est le ponçage (Figure 22). Cette étape est réalisée avec une ponceuse excentrique et la méthodologie est identique à celle explicitée au point 2.2.1.2 .



Figure 22 : Ponceuse excentrique (Photo : Taverniers, 2017)

✓ Traitement à l'huile de lin (optionnel)

C'est étape n'est pas indispensable au protocole. Néanmoins, est permet de gagner un temps précieux à l'étape d'interdatation (cf. point 2.4.2.2) car le rendu de l'huile de lin est de meilleure qualité et augmente le contraste au niveau des limites de cernes.

## 2.3. Numérisation des échantillons

### 2.3.1. Matériel : Scanner Epson Expression 10000 XL

Le scanner graphique employé pour cette étape est en mesure de proposer une numérisation à très haute résolution, 2400 DPI (ppp) x 4800 DPI (ppp), pour des formats allant jusqu'aux dimensions A3 (310 mm x 437 mm). Néanmoins, il est nécessaire d'employer une résolution de numérisation inférieure (1200 DPI) afin de pouvoir exploiter l'image numérisée avec le logiciel WinDENDRO™ (Regent Instruments Inc., 2002) (Cf point 2.4). En effet, le programme n'est pas capable de prendre en charge une image ayant un volume inférieur à 550 mégaoctets.

### 2.3.2. Méthode de numérisation

La numérisation est effectuée site par site. L'ensemble des échantillons (rondelles, barreaux et/ou carottes) associé à un site doivent être scannés avant de passer à un autre site.

Avant de lancer la numérisation, il faut veiller à la propreté de la vitre du scanner (nettoyage régulier). Il est également utile de poncer une dernière fois la surface de l'échantillon avec un papier de verre à micro-grains (P240) afin d'éliminer au maximum la poussière de bois résiduelle.

Les supports contenant les échantillons « carottes » sont disposés délicatement sur la vitre, proche du bord gauche et le plus au centre possible par rapport aux bords supérieur et inférieur. Le côté moelle des carottes doit être disposé à droite (et donc la partie écorce à gauche).

De la même façon, les rondelles suffisamment petites sont scannées dans leur intégralité et les deux barreaux issus d'un même arbre peuvent être numérisés simultanément, si toutefois leurs dimensions couplées n'excèdent pas celles de la vitre du scanner (44 x 32 cm). Il faut également veiller à ce que l'axe principal des barreaux soit parallèle aux bords de la vitre. Lorsqu'un barreau est trop long, il est possible de le scanner en deux étapes et de fusionner les deux images complémentaires avec l'aide d'un logiciel spécialisé (Microsoft ICE).

Le capot du scanner ne doit pas nécessairement être fermé. Néanmoins, cela peut s'avérer utile pour limiter la pollution liée à la lumière extérieure. Il est également conseillé de diminuer l'intensité de cette lumière externe en fermant les stores ou en éteignant la lumière. Une fois l'échantillon placé correctement sur la vitre de scannage, quelques réglages doivent être optimisés avant chaque numérisation. Ces réglages sont réalisés avec l'aide du logiciel *EPSON Scan*.

La configuration utilisée (24 couleurs, aucune correction de couleur, 1200 dpi) est suffisante pour l'analyse des largeurs de cernes. Une résolution supérieure est un plus mais il

faut veiller à maintenir une image numérisée en deçà des 550 Mo afin de pouvoir l'exploiter avec le logiciel WinDENDRO (Regent Instruments Inc., 2002). La taille de l'image est estimée dès que la création d'un aperçu est demandée (dans le bas de la fenêtre).

Le focus du scanner doit également être optimisé. Pour ce faire, il est nécessaire de sélectionner successivement 3 ou 4 petites zones au sein de l'échantillon et d'ensuite lancer le réglage automatique du focus. Il est également possible de le régler manuellement une fois la moyenne des focus automatiques calculée.

Une fois ce dernier paramètre optimisé, la numérisation peut commencer. Il faut seulement préciser dans quel dossier et sous quel nom l'échantillon doit être enregistré avant que l'opération ne débute. Le temps de numérisation est de 5 à 15 minutes selon la taille de l'échantillon.

Il est possible de visualiser l'image en haute résolution avec le logiciel « Irfanview » ou bien directement avec le logiciel WinDENDRO (Regent Instruments Inc., 2002). Si l'image est floue, il est alors nécessaire de réitérer l'opération de numérisation en faisant varier manuellement le focus du scanner.

## 2.4. Délimitation des cernes et interdatation à l'aide du logiciel WinDENDRO™

### 2.4.1. Matériel : Logiciel WinDENDRO™

Le logiciel WinDENDRO (Regent Instruments Inc., 2002) est, entre autres, capable de :

- ✓ Prendre en charge une image (format TIFF) à très haute résolution (1200 dpi dans le cas présent) ;
- ✓ Proposer l'édition de « path » ou « chemin » permettant ensuite le positionnement numérique des limites de cernes ;
- ✓ Standardiser les indices de largeur de cerne (RWI : Ring Width Index), exprimés en millimètres, en indices de cerne (RI : Ring Index), adimensionnel, en éliminant les effets liés l'accroissement naturelle de l'arbre (basse fréquence) non lié au climat sur base des écarts relatifs à la moyenne des largeurs des cernes voisins ;
- ✓ Afficher en temps réel le graphe illustrant l'évolution temporelle des largeurs de cernes ou des indices de cernes ;
- ✓ Proposer un solution d'interdatation intra- et inter-échantillons via la création de courbes de référence ;
- ✓ Exporter les données brutes sous un format exploitable dans le logiciel d'analyse statistique « RStudio » (The R Core Team, 2017).

### 2.4.2. Méthode d'analyse des échantillons numérisés

#### 2.4.2.1. Digitalisation des cernes

Une image de l'échantillon numérisé est chargée au sein de l'interface du programme. Un chemin de mesure (ou « path ») est ensuite créé manuellement en partant de la moelle jusqu'à l'écorce. Chaque cerne identifié est ensuite digitalisé et donc matérialisé numériquement par un repère. Les distances inter-cernes sont alors mesurées

instantanément par le programme. Un graphique de l'indice de cerne apparaît en temps réel et permet de visualiser l'impact du placement de chaque cerne.

Le premier passage consiste à placer un maximum de cernes visibles et ce pour l'ensemble des échantillons. Ensuite, un second passage doit être effectué afin de comparer les échantillons entre eux et repérer les éventuels cernes manqués lors du premier passage ou non visibles. Ce deuxième passage est une étape clé pour la suite des analyses. Il s'agit de l'étape d'interdatation, l'une des plus chronophages du protocole.

#### **2.4.2.2. *L'interdatation***

L'interdatation consiste à repérer les décalages éventuels entre deux ou plusieurs séries chronologiques. Pour ce faire, une courbe de référence peut être extraite à partir de séries chronologiques fiables, issues d'échantillons particulièrement lisibles. Plusieurs courbes de références peuvent être créées et ensuite fusionnées pour que la comparaison inter-échantillons soit la plus fiable possible. Au plus la courbe de référence repose sur des séries temporelles fiables, au plus les échantillons auxquels elle est comparée seront faciles à interdater.

L'interface du logiciel permet de comparer, dans un même repère, les séries chronologiques issues des chemins en train d'être édités par rapport à la (aux) série(s) chronologique(s) de référence.

Cette méthode permet également d'ajouter des « cernes nuls » sur la série de l'échantillon ne présentant pas un ou plusieurs cernes. En effet, le coefficient de corrélation permet de mettre en évidence une faible concordance entre l'échantillon concerné et la courbe de référence. Dans ce cas, la démarche consiste à ajouter, par essai-erreur, un cerne nul au sein de la série chronologique en tenant compte des années caractéristiques négatives connues (cf. chapitre V point 3 - Figure 40), pour lesquelles un accroissement très faible est récurrent. Si, suite au placement du cerne nul, le coefficient de corrélation augmente significativement, il y a alors de fortes chances que le cerne existe mais ne soit pas visible suite à un accroissement nul. Cela peut être dû à des contraintes climatiques, édaphiques ou encore hiérarchiques (arbre ayant été dominé dans le jeune âge).

La recherche d'un cerne manquant peut également être facilité par l'utilisation d'une loupe (agrandissement 10x). Si le traitement à l'huile de lin a été appliqué, le contraste au niveau des limites de cernes sera un peu plus facile à distinguer.

#### **2.4.2.3. *Exportation des données brutes***

Lorsque l'ensemble des séries temporelles a été validé / interdaté, il est nécessaire d'exporter les données dans le but de les analyser statistiquement avec l'aide du logiciel RStudio (The R Core Team, 2017). L'exportation se fait sous le format « tucson », un format texte particulier originaire de la ville du même nom et employé spécifiquement pour les études dendrochronologiques. En effet, ce type d'extension est utilisé pour le stockage de fichiers de données au sein de la banque de données ITRDB (International Tree Ring Data Bank) de l'Université d'Arizona. Plusieurs séries dendrochronologiques peuvent être stockées dans le même fichier. La première colonne contient les codes des échantillons, la seconde contient des dates repères, suivies par 10 mesures de cernes avec une précision au centième

de millimètre. Seule contrainte technique, les codes donnés à chaque échantillon ne doivent jamais dépasser 8 caractères (caractères spéciaux et espaces compris) (Cybis Elektronik & Data AB, 2013).

### 3. Protocole d'analyse des données

#### 3.1. Matériel

Pour cette étape, l'outil principal d'analyse est le logiciel RStudio (The R Core Team, 2017), utilisable en licence libre. Il permet le traitement de données et l'analyse statistique en utilisant le langage de programmation « R ».

Différents R packages ont été installés préalablement :

- ✓ Package « lattice » : Visualisation des données, graphiques adaptés à des jeux de données multivariés (Sarkar, 2008) ;
- ✓ Package « latticeExtra » : Complément du package « lattice », il offre davantage d'options graphiques (Sarkar et Andrews, 2016) ;
- ✓ Package « RColorBrewer » : Complément graphique (Neuwirth, 2014) ;
- ✓ Package « reshape2 » : Restructuration et agrégation de données (Wickham, 2007) ;
- ✓ Package « dplR » : Principale boîte à outils pour l'analyse dendrochronologique. Permet notamment les fonctions de « detrending » nécessaires à la standardisation des données brutes, les fonctions de création de séries chronologiques et les fonctions liées à l'interdatation ou « cross dating » (Bunn, 2008 ; Bunn, 2010 ; Bunn et al., 2017) ;
- ✓ Package « zoo » : Objet de classe S3 utilisé lors du calcul de la sensibilité moyenne sur une fenêtre mobile de 30 ans (Zeileis et Grothendieck, 2005) ;
- ✓ Package « mixOmics » : contient les fonctions nécessaires à l'application des méthodes de régression PLS (Le Cao et al., 2017).

Un tableau récapitulatif a été construit et recense, pour chaque échantillon, plusieurs séries d'informations pratiques (type d'échantillon, coordonnées XY L72<sup>4</sup> du site, années manquantes pour certains échantillons, etc.) mais aussi les principaux facteurs stationnels (pédologie, topographie, niveaux hydrique et trophique).

Pour l'étude de la relation « cernes-climat », les deux principaux types de données utilisés sont, d'une part, les fichiers « tucson » extraits du logiciel WinDENDRO (Regent Instruments Inc., 2002) au terme de l'étape d'interdatation et, d'autre part, les données climatiques mensuelles couvrant la période 1950-2016. (Haylock et al., 2008).

---

<sup>4</sup> Système de coordonnées Belge Lambert 72 exprimé en mètre.

Ces variables climatiques sont identifiées selon un code précis. Le premier champ contient deux lettres qui indiquent la nature de la variable (Tableau 1) :

*Tableau 1 : Nature de la variable climatique*

rr	Précipitation
tg	Température moyenne
tx	Température maximale
tn	Température minimale

Les champs intermédiaires précisent la partie sous-jacente du type de variable prise en compte pour l'analyse (Tableau 2) :

*Tableau 2 : Partie sous-jacente de la variable climatique*

mean	Moyenne des valeurs sur la période considérée
max	Maximum des valeurs sur la période considérée
min	Minimum des valeurs sur la période considérée
UpQt95	Valeurs supérieures au 95ème percentile sur la période considérée
LowQt05	Valeurs inférieures au 5ème percentile sur la période considérée
95q	Valeur du 95 <sup>ème</sup> percentile sur la période considérée
05q	Valeurs du 5 <sup>ème</sup> percentile sur la période considérée
sum	Somme des valeurs pour la période considérée
length	Nombre de jours pour la période considérée

Le dernier champ contient deux chiffres (le 1<sup>er</sup> varie entre 1 et 12 et le 2<sup>ème</sup> varie de 0 à 6) indiquant la période concernée par la variable. Le premier chiffre indique le dernier mois de la période et le second indique qu'il faut remonter dans le temps de N mois pour trouver le début de la période. Si le second chiffre est nul, la période concernée s'applique uniquement sur le mois identifié par le premier chiffre. Par exemple, "5\_0" concerne le mois de mai uniquement et "5\_3" concerne la période allant du mois de février (3 mois avant mai) au mois de mai. De plus, il est possible que ces deux chiffres soient associés à la mention "n-1". Cela signifie qu'il s'agit du mois (ou de la période) de l'année précédente. Par exemple, "8\_0n-1" concerne le mois d'août de l'année précédente.

### **3.2. Méthode**

Cette partie résume les différentes étapes et analyses réalisées via le logiciel RStudio (The R Core Team, 2017). Généralement, plusieurs opérations de transformation des données sont nécessaires pour obtenir les résultats exposés. Pour plus de détails sur ces opérations, il est utile de se référer à l'**annexe 2** (page - 12 -) qui contient l'intégralité du script R employé. Il suffit alors de télécharger les logiciels **R** et **RStudio** (The R Core Team, 2017) et de copier-coller le script dans l'environnement du programme. Chaque fonction possède une description accessible en faisant appel à la rubrique « aide » du programme ou en inscrivant, dans la partie « console », le nom de la fonction précédé du caractère spécial « ? ».

#### **3.2.1. Initialisation et description de l'échantillonnage**

Une fois le répertoire de travail défini et les packages installés, la première étape consiste à importer les fichiers « tucson ». L'information qu'ils contiennent est stockée dans le data frame initial "**tm**". Le tableau récapitulatif évoqué précédemment au point 3.1 est également importé et stocké dans le data frame "**recap**". Ce dernier contient, entre autres, une colonne indiquant le nombre estimé d'années manquantes pour les échantillons de type « carottes », pour lesquels la moelle n'est pas systématiquement inclue. En effet, lors du prélèvement à la tarière de Pressler, la moelle est souvent décentrée par rapport au centre géométrique de l'arbre. Une partie de l'information est donc perdue mais le nombre d'années entre le dernier cerne de la carotte et la moelle peut aisément être estimé et multiplié par l'accroissement moyen des cinq derniers cernes présents sur l'échantillon. Cette information, associée au data frame "**tm**" est employée pour estimer l'âge total de l'arbre et sa circonférence. L'objectif est d'avoir une idée générale des caractéristiques propres aux individus échantillonés.

#### **3.2.2. Analyses dendrochronologiques**

##### **3.2.2.1. Calibration du jeu de données**

Pour cette étape, il est essentiel de ne prendre en compte que les échantillons pour lesquels l'interdatation est correcte. En effet, certains échantillons sont très difficiles à interdater. C'est souvent le cas lorsque plusieurs cernes d'une série chronologique sont invisibles. Cette série est alors incohérente avec les séries voisines ainsi qu'avec la série de référence. Lorsque le coefficient de corrélation avec la chronologie de référence est trop faible et que beaucoup de cernes nuls (cf. point 2.4.2.2 du présent chapitre) sont à ajouter, il devient judicieux de mettre l'échantillon concerné de côté. Le tableau récapitulatif (cf. point 3.1) contient une colonne (« Ech\_OK ») spécialement dédiée à cette information (1 = Echantillon correctement interdaté ; 0 = échantillon incohérent). Les lignes de commandes associées aux analyses dendrochronologiques sont par conséquent appliquées sur les échantillons correctement interdatés uniquement.

Pendant ses premières années d'existence, un arbre présente généralement une croissance très variable et exclusivement dépendante de la concurrence. Les largeurs de cernes qui en découlent ne sont pas représentatives du signal climatique (haute fréquence). Pour cette raison, les valeurs mesurées associées aux cinq premiers cernes de chaque échantillon ont été ignorées systématiquement pour l'analyse.

### **3.2.2.2. Signal basse fréquence et variabilité haute fréquence des largeurs de cerne du tilleul à petites feuilles**

Une fois le jeu de données « nettoyé », les séries chronologiques des largeurs de cernes (RWI) de chaque arbre (rappel : 2 séries/arbre) ont été décomposées selon leur basse, moyenne et haute fréquence.

Pour ce faire, la basse fréquence (BF) a d'abord été estimée au moyen d'une fonction spline cubique de lissage en utilisant le R package dplR (Bunn, 2008 ; Bunn, 2010 ; Bunn et al., 2017). Il s'agit d'une fonction particulière définie par morceaux (intervalles de 40 ans dans le cas de la basse fréquence) par des polynômes de degré 3 (Lebourgeois et Mérian, 2012).

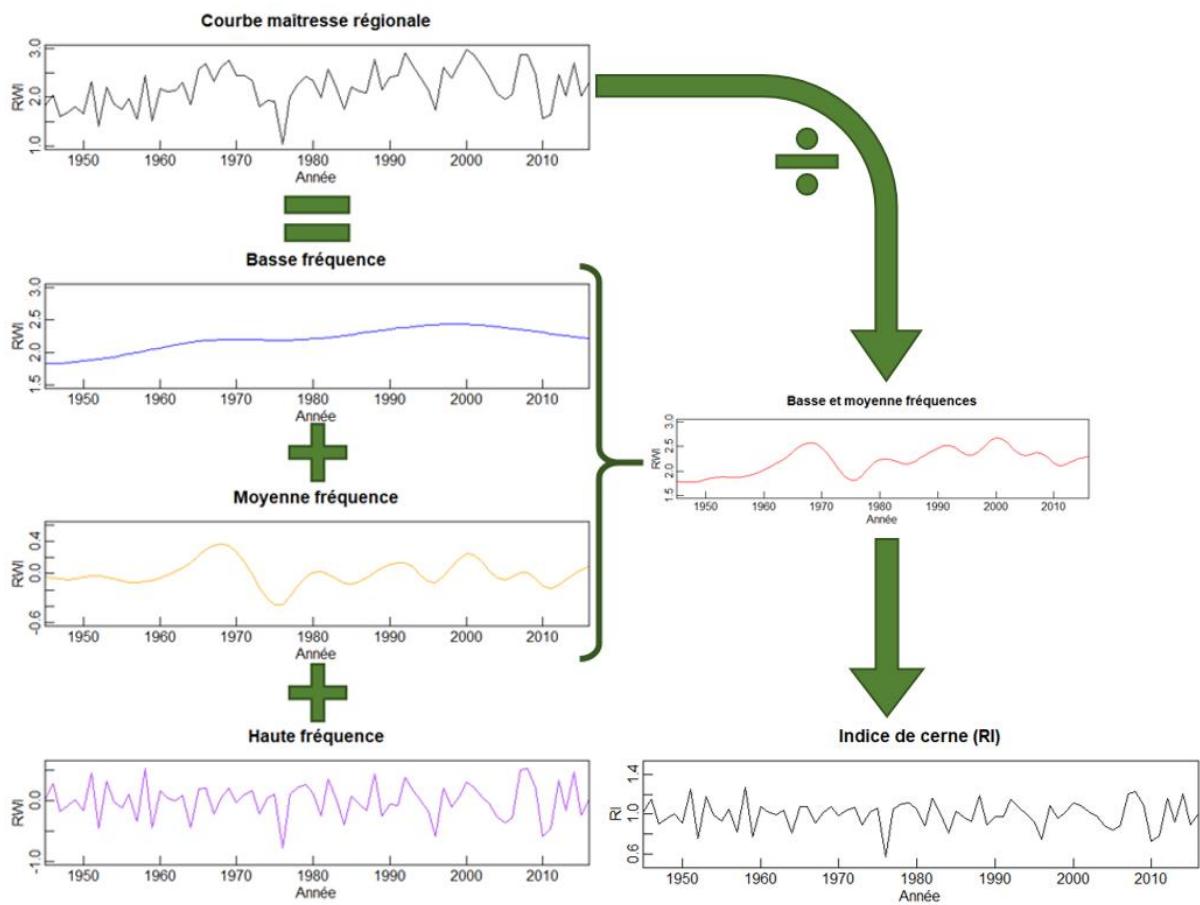
Ensuite, il est possible d'obtenir la basse et la moyenne fréquence combinées grâce à l'application de cette même fonction sur les séries chronologiques de base, mais cette fois par intervalles de 10 ans (Latte, 2017).

Il est dès lors possible de déduire la moyenne fréquence seule (MF) en soustrayant les résultats de la spline cubique de 10 ans (BF + MF) par ceux de la spline cubique de 40 ans (BF). La moyenne fréquence se calcule donc de la façon suivante :  $MF = (BF + MF) - (BF)$ .

La haute fréquence (HF) peut, quant à elle, être extraite de RWI en soustrayant les résultats de la spline cubique de 10 ans →  $HF = RWI - (BF + MF)$ .

Bien que la haute fréquence puisse être utilisée telle quelle pour étudier la réponse climatique des séries chronologiques brutes, un indice de cerne (RI) similaire en terme d'information a été créé. Il s'obtient en calculant le rapport des largeurs de cernes (RWI) sur le résultat de la spline de 10 ans (BF + MF) →  $RI = RWI / (BF + MF)$ . Cet indice a l'avantage d'être plus stable que la simple expression de la haute fréquence. Il temporent notamment les premières années d'accroissement, dont la variabilité est souvent très marquée, ce qui rend plus difficile le focus sur les années caractéristiques à mettre en évidence *in fine* (Latte, 2017).

Cette procédure de standardisation débouche donc sur l'obtention d'un indice de cerne « détendancé » pour l'ensemble du jeu de données (dataframe "tm2" – la mention **2** signifie que les valeurs ont été standardisées) qui tend à maximiser la variabilité interannuelle en lien direct avec le climat. La Figure 23 illustre, sur base de la courbe maîtresse régionale (cf. point 3.2.2.5 de ce présent chapitre), la décomposition des séries chronologiques jusqu'à l'obtention de l'indice de cerne détendancé.



*Figure 23 : Schéma explicatif de l'obtention de l'indice de cerne ainsi que de la décomposition d'une série chronologique en basse, moyenne et haute fréquences*

### 3.2.2.3. Chronologie moyenne des échantillons et fonction « `chron{dpLR}` » : moyenne robuste à double pondération

Un aperçu de la chronologie moyenne pour l'ensemble des échantillons est proposé dans la partie résultats (cf. chapitre V point 2.1) pour les indices de largeur de cerne (RWI) et pour les indices de cernes détendancés (RI).

Sur base du manuel de dendrochronologie développé par Lebourgeois et Mérian (2012), la moyenne appliquée à l'ensemble des séries chronologique des échantillons est une moyenne robuste à double pondération. En effet, la moyenne arithmétique est rarement appliquée en dendrochronologie car elle donnerait le même poids à tous les échantillons. Or il est possible qu'une ou plusieurs valeurs d'une des séries chronologiques soient aberrantes (« outlier ») et modifient fortement la valeur des indices moyens. Ces « outlier » sont généralement dus à des erreurs lors de l'interdatation ou encore à des perturbations ponctuelles aléatoires. Leur poids doit par conséquent être réduit afin de ne pas obtenir des indices moyens biaisés. Le principe de la moyenne robuste à double pondération est d'attribuer à chaque indice une pondération inversément proportionnelle à son éloignement par rapport à la moyenne. Le poids et la moyenne sont par conséquent dépendants et la chronologie moyenne s'obtient donc par réitération. A chaque réitération, l'indice de

croissance moyen de l'année k et de la placette  $P_i$  ( $IC_{ik}$ ) est obtenu *via* les formules suivantes (d'après Lebourgeois et Mérian, 2012) :

$$IC_{ik} = \sum_{j=1}^t w_{ijk} IC_{ijk} , \quad i \text{ et } k \text{ fixés.}$$

$W_{ijk}$  : poids propre de l'indice de croissance de l'arbre (ou échantillon)  $T_{ij}$  de la placette  $P_i$  pour l'année k, défini selon la formule :

$$w_{ijk} = \left[ 1 - \left( \frac{IC_{ijk} - IC_{ik}}{cS_{ik}} \right)^2 \right]^2$$

quand,  $\left( \frac{IC_{ijk} - IC_{ik}}{cS_{ik}} \right)^2 < 1$       sinon 0.

Où  $S_{ik}$  est la médiane des différences absolues entre les t indices de croissance et l'indice moyen  $IC_{ik}$ . « c » est une constante qui définit à partir de quel écart à la valeur moyenne  $IC_{ik}$  l'indice  $IC_{ijk}$  n'est plus pris en compte dans le calcul ( $W_{ijk} = 0$ ).

Cette fonction « chron » décrite et utilisée par Lebourgeois et Mérian (2012) et par Latte (2017) est incluse dans le R package dplR (Bunn, 2008 ; Bunn, 2010 ; Bunn et al., 2017). Le but est d'obtenir un signal haute fréquence commun à l'ensemble des séries chronologiques sur lesquelles se base la moyenne.

### 3.2.2.4. Transformation des séries chronologiques au niveau site et site/arbre

L'étape suivante consiste à construire les séries brutes à l'échelle des « sites » et à l'échelle des « arbres par site ». On passe donc d'un dataframe contenant les valeurs de largeur de cerne ("tm") ou d'indice de cerne ("tm2") pour chaque combinaison « échantillon-année » à un dataframe reprenant les valeurs moyennes (moyenne robuste) pour chaque combinaison « site-année » ("tms" ou "tms2") ou « site/arbre-année » ("tmsa" ou "tmsa2").

Cette transformation est indispensable pour la création de la courbe maîtresse régionale (cf. point 3.2.2.5) ainsi que pour l'étude de la relation accroissement-climat. Elle offre également la possibilité de représenter graphiquement les séries moyennes de chacun des sites afin de les comparer entre elles (cf. chapitre V point 2.2).

### 3.2.2.5. Création de la courbe maîtresse régionale

Cette étape a pour objectif de fournir une série chronologique moyenne ou courbe maîtresse régionale représentant l'accroissement du tilleul à petites feuilles en Wallonie. Dans le but de donner un poids plus important aux sites présentant un plus grand nombre d'arbres échantillonnés, cette courbe maîtresse a été calculée (moyenne robuste) sur base des séries chronologiques moyennes de chaque arbre et non de chaque site. Même si ce choix se justifie, il n'est pas fondamental dans le cas du tilleul. En effet, les deux pondérations (par site ou par site/arbre) fournissent des courbes presque identiques.

### 3.2.2.6. Exportation des séries chronologiques de référence (niveau sites et région) dans l'environnement WinDENDRO™

Une fois les séries maîtresses créées à partir du jeu de données, il est possible de les extraire sous format texte (extension « .tucson »), lisible par le logiciel WinDENDRO (Regent Instruments Inc., 2002). L'objectif de cette manœuvre est de peaufiner l'interdatation en comparant une dernière fois les échantillons aux courbes de références obtenues via RStudio (The R Core Team, 2017), plus fiables que celles proposées par WinDENDRO. Enfin, il est important de savoir que, pour que les fichiers tucson soient lisibles dans WinDENDRO, il est nécessaire de les ouvrir chacun individuellement avec le logiciel Notepad++ et de convertir les sauts de ligne en format Windows (CR + LF).

### 3.2.2.7. Outil de vérification de l'interdatation

Afin d'éviter de comparer les dernières courbes de références avec l'ensemble des échantillons (fastidieux au vu du nombre d'échantillons), des graphes de vérification peuvent être produits par site et pour chaque échantillon. Deux types de graphes sont proposés dans le script d'analyse. Les graphes dont le titre principal contient uniquement l'abréviation du site concerné (Figure 24, gauche) décrivent la comparaison de chaque échantillon interdaté à la courbe de référence du site. Tandis que les graphes dont le titre principal contient l'abréviation du site concerné et le chiffre "2" (Figure 24, droite) illustrent la comparaison de chaque échantillon interdaté à la courbe maîtresse régionale.

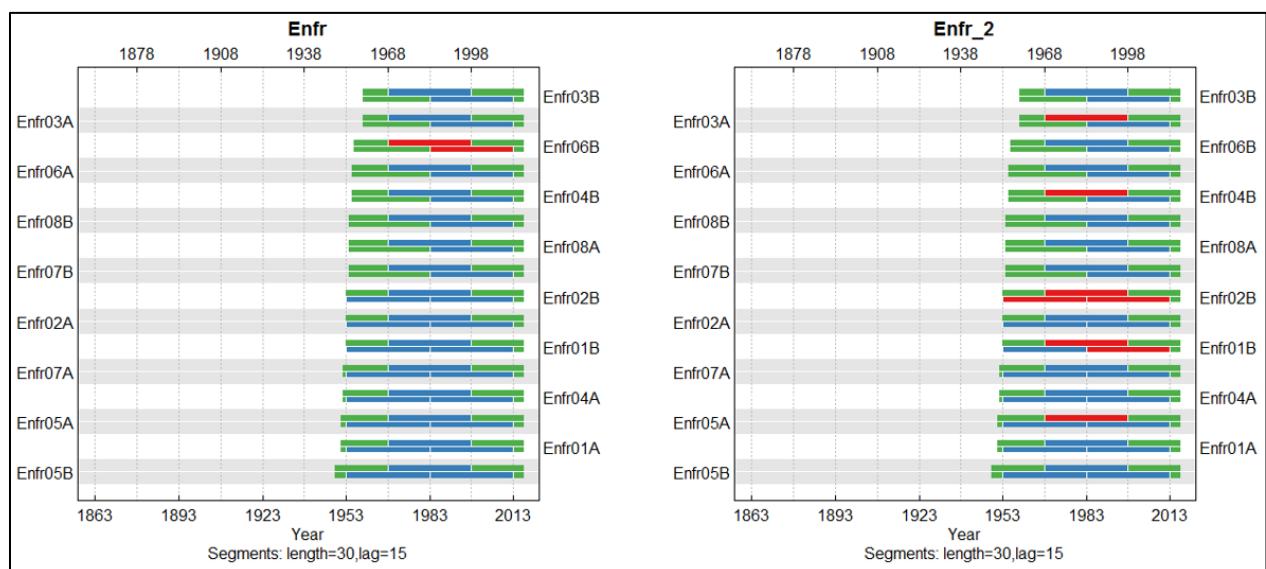


Figure 24 : Système de vérification de l'interdatation (vert = bonne interdatation, bleu = interdatation suffisante et rouge = zone à vérifier)

La mise en évidence des erreurs d'interdatation s'exprime par des segments colorés couvrant des fenêtres temporelles de 30 ans. Cela permet de savoir quels échantillons sont à revérifier et, pour ces derniers, quelle(s) période(s) temporelle(s) est (sont) problématique(s).

### 3.2.2.8. Statistiques descriptives des séries chronologiques

Des informations de base ont pu être rassemblées en se référant au nombre d'années mesurées et de l'estimation du nombre d'années manquantes (cf. point 3.2.1). L'âge moyen,

la circonference moyenne et la derniere annee de mesure sont repris, pour chaque site, dans le Tableau 3 de la partie « resultats » de ce memoire.

✓ Statistiques sur les indices de largeur de cerne (RWI) au niveau site

Selon Leborgeois et Mérian (2012), il existe un grand nombre de statistiques dendrochronologiques pouvant être calculées sur les séries individuelles de largeurs de cerne dans l'optique de déterminer la force de leur signal.

En appliquant les fonctions `rwl.stat {dplR}` (Bunn, 2008 ; Bunn, 2010 ; Bunn et al., 2017) au jeu de données brutes transformé au niveau site ("`tms`"), on obtient pour chaque peuplement les statistiques descriptives suivantes :

- L'accroissement moyen (mm) et l'écart type (mm) ;
- La sensibilité moyenne ;
- Le coefficient de Gini ;
- Le coefficient d'autocorrélation d'ordre 1.

La sensibilité moyenne (ou « Mean sensitivity » - MS) permet de mesurer l'ampleur des variations moyennes des largeurs entre deux cernes consécutifs (Leborgeois et Mérian, 2012). L'indice peut varier de 0 (cernes consécutifs égaux) à 2 (un cerne nul sur deux). La MS de chaque site ( $k$ ) est calculée à partir de l'équation ci-dessous :

$$MS_k = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{k-1} \left| \frac{2 X (LC_{(k+1)} - LC_k)}{(LC_{(k+1)} - LC_k)} \right|$$

La Figure 41 (page 46) insérée dans la partie « Résultats » permet d'observer l'évolution de la sensibilité moyenne de chaque site en considérant une fenêtre mobile de 30 ans. Chaque année centrale est donc dépendante de la sensibilité des 15 années précédentes et des 15 années suivantes.

Le coefficient de Gini est un indice complémentaire à la sensibilité moyenne. Il présente généralement des valeurs inférieures car ce dernier mesure l'ampleur des variations sur plusieurs cernes antérieurs à celui de l'année en cours. Cet indice est repris dans le tableau à titre informatif.

Leborgeois et Mérian (2012) définissent l'autocorrélation d'ordre 1 (AC) comme étant un coefficient qui évalue l'interdépendance entre deux cernes successifs de la même chronologie de référence au niveau site. Il quantifie l'impact des conditions locales sur l'élaboration du cerne de l'année précédente et de l'année en cours. Il permet donc d'évaluer la corrélation entre le signal d'une série chronologique et ce même signal décalé d'une année. Ce coefficient est compris entre -1 (aucune corrélation) et 1 (corrélation parfaite).

✓ Statistiques sur les indices de cerne (RI) au niveau site

On appliquant ensuite les fonctions `rwi.stat {dplR}` (Bunn, 2008 ; Bunn, 2010 ; Bunn et al., 2017) sur le jeu de données détendancées et transformé au niveau site ("`tms2`"). On

obtient deux indices fondamentaux permettant d'évaluer la force du signal commun aux séries chronologiques : le signal effectif (ES) et le signal exprimé par la population (EPS).

Etant donné que les statistiques sont appliquées sur les données transformées au niveau du peuplement, le signal effectif est l'indicateur qui combine les signaux intra- et intersites. Il repose sur la formule suivante (d'après la rubrique d'aide du R package dplR – Bunn, 2008 ; Bunn, 2010 ; Bunn et al., 2017) :

$$ES = \frac{rbar.bt}{(rbar.wt + \frac{(1 - rbar.wt)}{c.eff})}$$

Où  $rbar.bt$  est la moyenne des corrélations entre les séries chronologiques d'un même site,  $rbar.wt$  est la moyenne des corrélations entre les séries de tous les sites et  $c.eff$  est le nombre effectif d'arbres (en fonction du nombre de corrélations intra-site dans chaque site). Il est compris entre 0 (pas de signal intra- et inter-arbres) et 1 (signal identique intra- et inter-arbres).

Le signal EPS ou « Expressed Population Signal » permet quant à lui d'estimer si le signal effectif (ES) est représentatif ou non du signal théorique de la population. La formule de l'EPS (Bunn, 2008 ; Bunn, 2010 ; Bunn et al., 2017) est la suivante :

$$EPS = \frac{n * ES}{((n - 1) * ES + 1)}$$

Où  $n$  est le nombre moyen d'arbres comptés pour chaque cerne annuel mesuré. Il est également compris entre 0 et 1. La valeur 1 indiquant une estimation « parfaite » du signal commun à tous les arbres de la population échantillonnée. Dans leurs travaux, Lebougeois et Mérian (2012) ont fixé la valeur seuil de cet indice à 0,85. Or, le tilleul est une essence très disséminée et son échantillonnage est par conséquent plus contraignant que dans le cas des essences commerciales. Il est donc plus difficile d'atteindre cette valeur. C'est pourquoi il a été décidé de diminuer ce seuil à 0,8. Les sites présentant un EPS équivalent ou supérieur à 0,8 seront donc considérés comme étant représentatifs de la population théorique.

### **3.2.2.9. Les années caractéristiques de *Tilia cordata***

Le R package dplR (Bunn, 2008 ; Bunn, 2010 ; Bunn et al., 2017) comprend une fonction capable de faire ressortir les années caractéristiques sur base des séries chronologiques brutes des largeurs de cerne (RWL). La fonction, « pointer {dplR} », utilise l'algorithme de Becker (Becker et al., 1994) et a été éprouvée par Mérian et Lebougeois (2011). Le premier paramètre fixe le seuil (en pourcentage) de la différence entre deux années, au-delà duquel l'année sera considérée comme année caractéristique (10% par défaut). Le deuxième paramètre définit la proportion d'arbres positifs au premier paramètre (75% par défaut). En d'autres termes, si plus de 75% des arbres présentent une différence d'accroissement supérieure à 10% entre deux mêmes années consécutives, la dernière année comparée sera considérée comme année caractéristique. Les deux paramètres de la fonction sont à définir manuellement dans le cas du tilleul. En effet, si les valeurs par défaut sont maintenues, seul l'année 1976 sera mise en évidence, ce qui ne correspond pas à la réalité observée lors de la phase d'interdatation. Le premier paramètre a été ajusté à 25% et le second à 50%. Pour

qu'une année soit considérée comme caractéristique pour le tilleul, il faut qu'au moins la moitié des arbres présentent une différence d'accroissement d'au moins 25%.

### **3.2.3. Analyse dendroécologique – Relation « Accroissement-Climat »**

#### **3.2.3.1. Méthode de régression PLS « Partial Least Squares regression »**

La meilleure variable explicative commune à tous les sites a été identifiée en utilisant une méthode de régression PLS : régression des moindres carrés partiels (R package mixOmics ; Le Cao et al., 2017). Cette méthode statistique peut être utilisée pour décrire les relations fondamentales entre les indices de cernes (Y) et la matrices reprenant l'ensemble des données climatiques mensuelles (X), en combinant le principe d'analyse en composante principale (ACP) et la régression linéaire multiple ( $Y=f(X)$ ). Cette méthode est particulièrement appropriée lorsque le nombre de variables explicatives X est supérieur au nombre d'observations (c'est-à-dire le nombre de largeurs de cerne mesurées par année dans le cas présent) et lorsque qu'il existe une multi-colinéarité entre les variables explicatives X (Latte et al., 2015.2). La régression PLS a été calculée entre les indices de cerne standardisés (RI) et les variables climatiques mensuelles standardisées (moyenne = 0 ; écart type = 1) pour l'ensemble des sites dans le but d'identifier les meilleures variables explicatives communes. Une fois la méthode de régression PLS appliquée, on obtient une liste des valeurs décroissantes prises par les coefficients de corrélation de ces variables.

#### **3.2.3.2. Calcul des Coefficients de Corrélation « Bootstrap » (BCC)**

Ensuite, les coefficients de corrélation bootstrap (BCC) entre les variables sélectionnées et les indices de cerne standardisés par site sont calculés dans une fenêtre mobile de 30 ans et pour la période 1952-2016. La signification statistique a été testée en utilisant la méthode bootstrap avec un intervalle de confiance de 95% (Efron and Tibshirani, 1986).

Les graphiques illustrant la corrélation de l'accroissement de chacun des sites au cours du temps mettent en évidence les corrélations significatives en ajoutant, pour chaque année, des points sur les courbes concernées (Figure 42 à Figure 44 – pages 48 et 4849). Comme la sensibilité moyenne, l'évolution des BCC est considérée sur une fenêtre mobile de 30 ans (Latte, 2017).

## V. Résultats

### 1. Echantillonnage

La phase de terrain a permis d'échantillonner 143 arbres au sein de 11 sites. Néanmoins, le dernier site, situé à Ghlin, n'a pas pu être analysé par manque de lisibilité et de temps. Il pourrait cependant être pris en compte dans le cadre d'une étude ultérieure. Parmi les 143 arbres échantillonnés, 129 ont été analysés suivant le protocole d'analyse des échantillons numérisés (cf. chapitre IV point 2.3). Ci-dessous, le graphique repris en Figure 25 illustre les principales structures de peuplements des sites échantillonnés en exprimant la circonférence de chaque arbre en fonction de son âge.

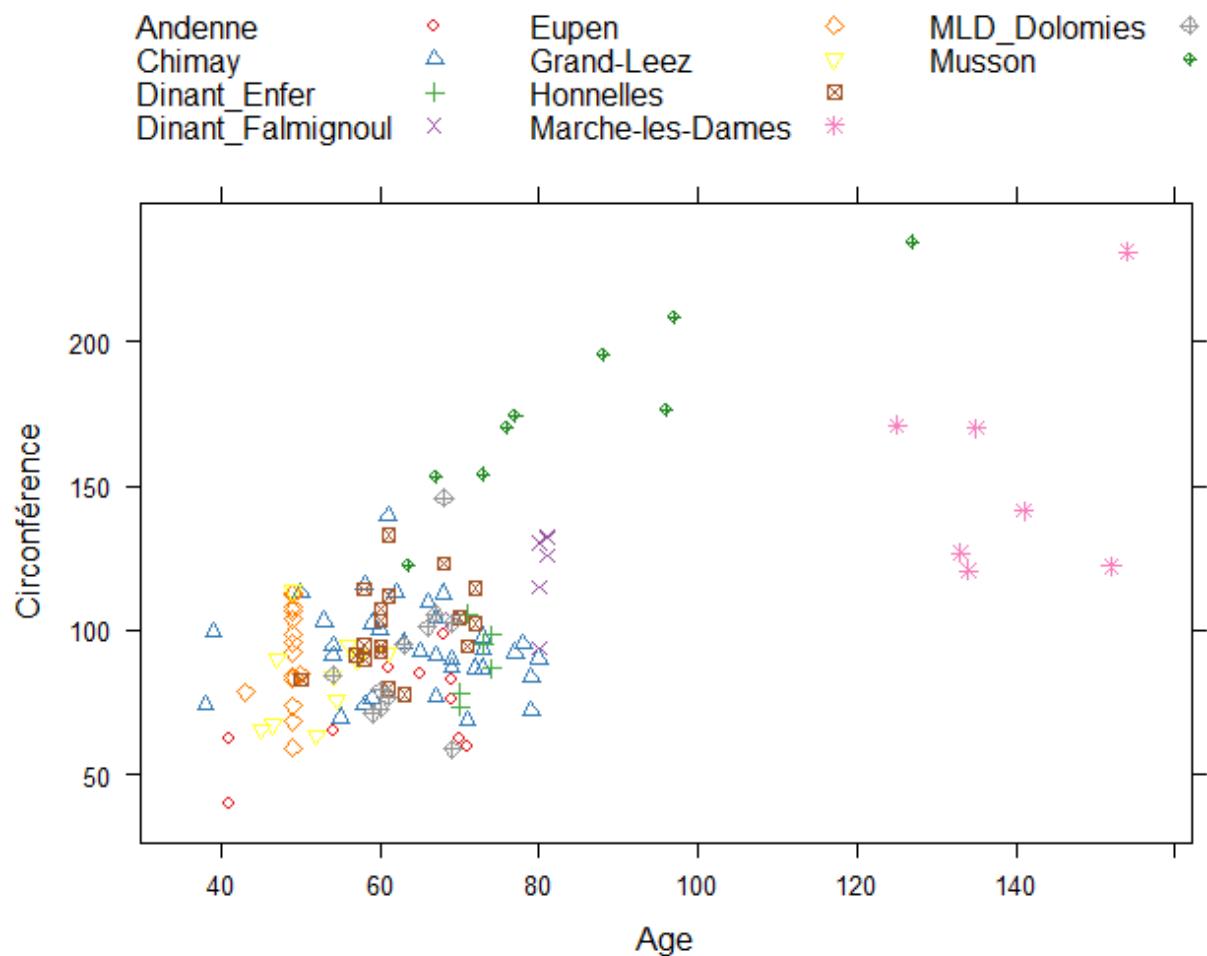
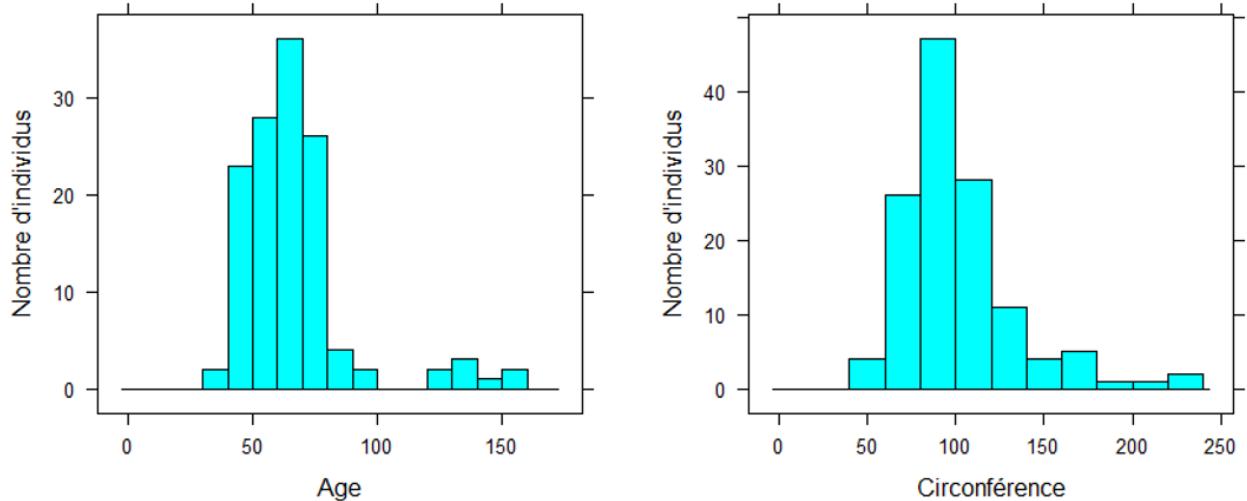


Figure 25 : Circonférence par arbre en fonction de l'âge et pour chaque site



*Figure 26 : Nombre d'individus en fonction de l'âge (à gauche) et de la circonférence (à droite)*

Les deux histogrammes ci-dessus (Figure 26) décrivent respectivement la répartition de l'ensemble des individus en fonction de l'âge et de la circonférence. Enfin, le Tableau 3 ci-après synthétise les informations générales pour chaque site. Les 12 dernières lignes fournissent (pour chaque site) un renseignement sur l'étape d'analyse dendrochronologique. En effet, certains échantillons ne seront pas pris en compte lors de cette étape par manque de lisibilité et/ou suite à des incohérences flagrantes au niveau de l'interdatation (cf. chapitre IV point 2.4.2.2).

Tableau 3 : Informations générales liées à l'échantillonnage

Généralités					
Site	Ghlin	Honnelles	MLD Dolomies	Marche-les-Dames	Andenne
Code	Ghli	Honn	Dolo	MLDa	Ande
X (172)	114750	102616	195456	191937	201350
Y (172)	130865	116010	129945	130362	130291
Region bioclimatique	Plaines et Vallées Scaldisiennes	Plaines et Vallées Scaldisiennes	Condroz-Sambre et Meuse	Condroz-Sambre et Meuse	Hesbino-Brabançon
Altitude (m)	60	70	120	140	160
Texture	Sables limoneux	Limons caillouteux	Limons caillouteux	Limons caillouteux	Limons
Drainage	Favorable	Favorable	Favorable	Favorable	Assez pauvre
Charge	na	Silexite	Gravier	Calcaire	na
Profondeur	40-80cm	20-40cm	40-80cm	>20cm	>80cm
Humus	Mull	Mull	Moder	Mull	Mull
Pente	3-5%	5-7%	>15%	>15%	1-3%
Apport en eau	Variables	Pas d'apport	Pas d'apport	Pas d'apport	Quasi-permanent
Sous-secteur radiatif	Neutre	Neutre	Froid	Ch Fr N	Neutre
Niveau hydrique	Sols mesiques	Sols mesiques	Sols xériques	Sols mesiques	Sols humides
Niveau trophique	Sols mesotrophes	Sols eutrophes	Sols meso-oligotrophes	Sols carbonates	Sols meso-oligotrophes
Type d'échantillon	Carottes	Caro Barr	Carottes	Barreaux	Carottes
Nombre d'arbres échantillonnés	14	18	11	7	10
Nombre d'arbres analysés	na	18	11	7	8
Nombre d'échantillons prélevés	na	35	20	14	20
Classe d'âge	na	50-80	50-70	120-150	40-70
Classe de circonférence (cm)	na	70-130	50-140	120-230	40-100
Age moyen	na	62	63	139	53
Circonf moyenne (cm)	na	101	90	155	72
Première année mesurée	na	1950	1956	1868	1953
Dernière année mesurée	na	2016	2016	2016	2016
Qualité de l'interdattation	✗	1	✓	3	✗ 1

Tableau 3 : Informations générales liées à l'échantillonnage

		Généralités					
<b>Dinant Falmignoul</b>		<b>Dinant Enfer</b>	<b>Chimay</b>	<b>Musson</b>	<b>Eupen</b>	<b>Site</b>	
		Enfer	Chimay	Muss	Eupe	Code	
Falm		179865	146183	248424	277333	X (L72)	
187021		99999	82404	30544	146556	Y (L72)	
100535	Condroz-Sambre et Meuse	Fagne-Famenne-Calestienne	Haute Lorraine	Ardenne centro-orientale	Region bioclimatique		
180	200	240	330	480	Altitude (m)		
Limons caillouteux Favorable	Limons caillouteux Psammite	Limons caillouteux	Limons caillouteux	Limons caillouteux	Texture		
Argilo-calcaire	0-20cm	Favorable	Calcaire	Modere	Assez pauvre	Drainage	
Mesomull	Mesomull	0-20cm	0-20cm	Macigno	Schisto-gresueuse	Charge	
>15%	5-7%	5-7%	1-7%	40-80cm	40-80cm	Profondeur	
Variables	Pas d'apport	Pas d'apport	Pas d'apport	Mull	Mull	Humus	
Froid	Sols secs	Ch Fr N	Neutre	Quasi-permanent	Quasi-permanent	Apport en eau	
Sols secs	Sols xeriques	Sols xeriques	Neutre	Neutre	Neutre	Sous-secteur radiatif	
Sols eutrophes	Sols meso-Oligotrophes	Sols carbonates	Sols eutrophes	Sols oligotrophes	Sols humides	Niveau hydrique	
Barreaux	Barreaux	Caro Barr	Carottes	Carottes	Type d'échantillon	Niveau trophique	
7	8	33	9	15	Nombre d'arbres échantillonnés		
7	8	31	8	14	Nombre d'arbres analysés		
14	16	66	18	30	Nombre d'échantillons prélevés		
13	16	61	15	25	Nombre d'échantillons analysés		
70-80	70-80	40-80	60-130+	50	Classe d'âge		
100-130	70-100	70-140	120-230+	50-120	Classe de circonference (cm)		
1941	1948	1942	1905	1973	Age moyen		
2016	2016	2016	2016	2016	Circonf moyenne (cm)	Première année mesurée	
2	3	3	3	3	3	Dernière année mesurée	
						Qualité de l'interdatation	

## 2. Dendrochronologie

### 2.1. Chronologie moyenne et Indice de cerne moyen pour l'ensemble des échantillons

Les graphiques ci-dessous (Figure 27 et Figure 28) illustrent respectivement l'évolution temporelle de l'Indice de Largeur de cerne (RWI : Ring Width Index), exprimé en millimètres, et de l'Indice de cerne standardisé (RI : Ring index), adimensionnel. Ces représentations sont basées sur les données brutes de chaque échantillon. De plus, ces graphiques intègrent le degré de fiabilité de la relation cerne-climat (Sample Depth) sur base du nombre d'arbres expliquant la variation par année.

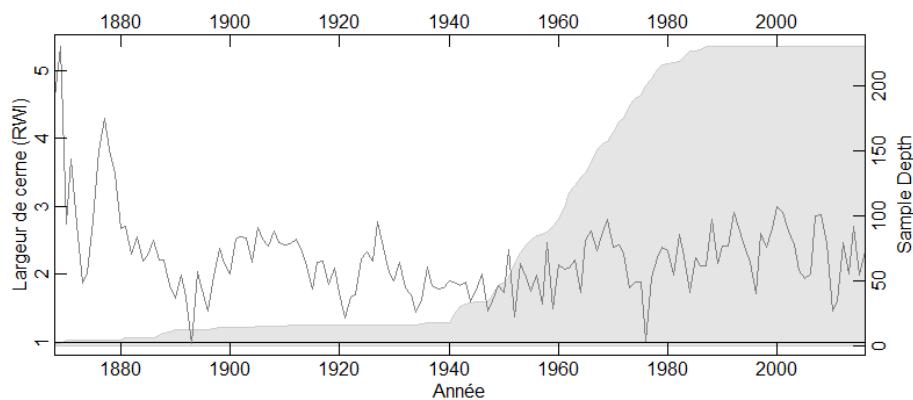


Figure 27 : Chronologie moyenne de l'indice de largeur de cerne (RWI) associée au nombre d'individus impliqués dans la relation cerne-climat annuelle (Sample Depth)

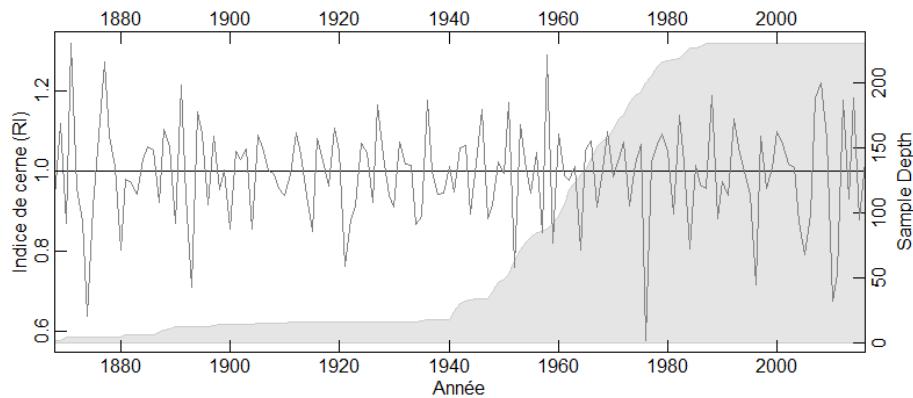


Figure 28 : Chronologie moyenne de l'indice de cerne (RI) associée au nombre d'individus impliqués dans la relation cerne-climat annuelle (Sample Depth)

## 2.2. Séries chronologiques moyennes au niveau site

L'annexe 3 (page - 23 -) contient les chronologies moyennes et les indices de cerne moyens site par site ainsi que l'information « sample depth ».

### 2.2.1. Comparaison des indices de largeur de cernes (RWI) moyens

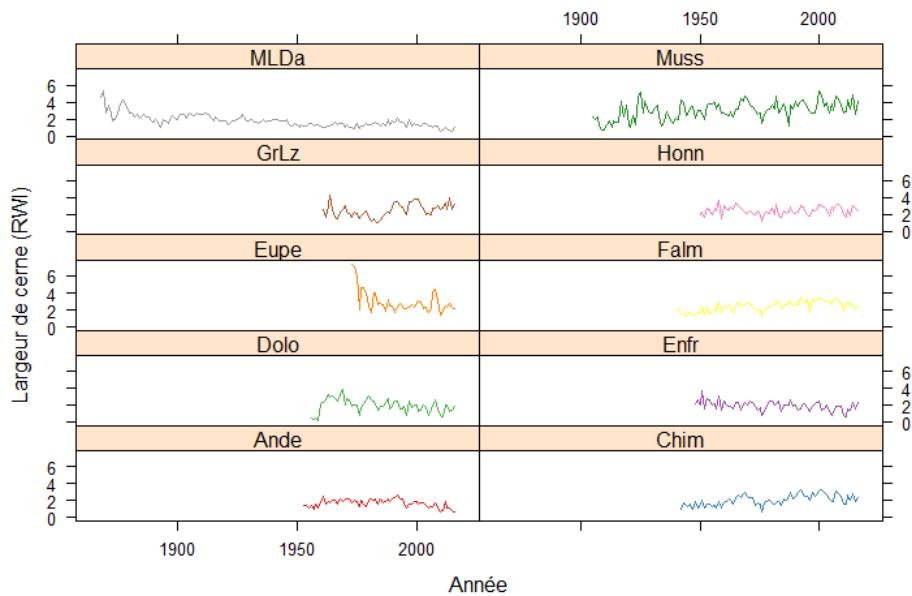


Figure 29 : Séries chronologiques moyennes de l'indice de largeur de cerne (RWI) par site

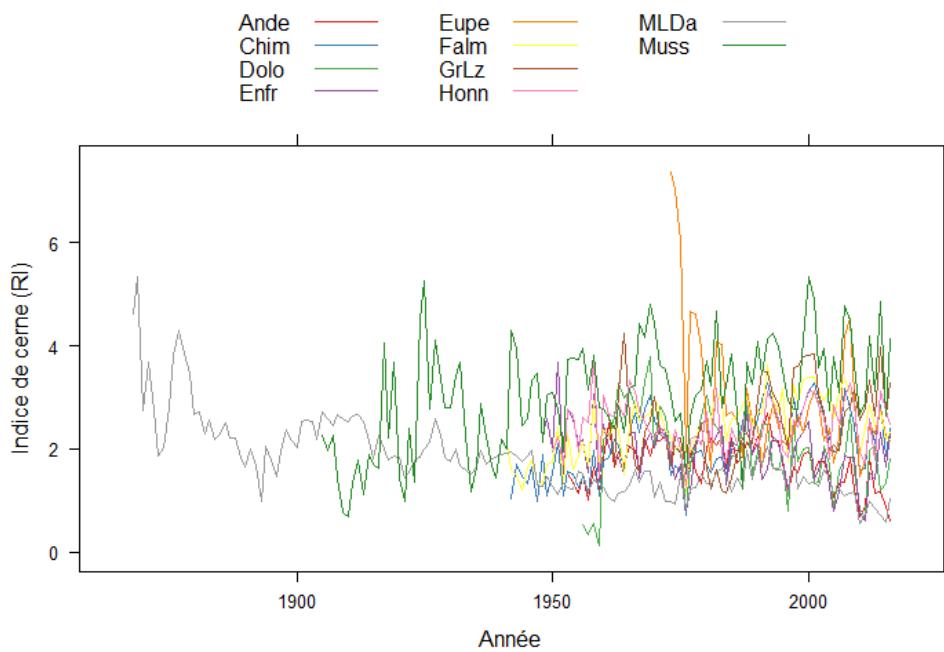


Figure 30 : Séries chronologiques moyennes combinées de l'indice de largeur de cerne (RWI) par site

## 2.2.2. Comparaison du signal basse fréquence au niveau site

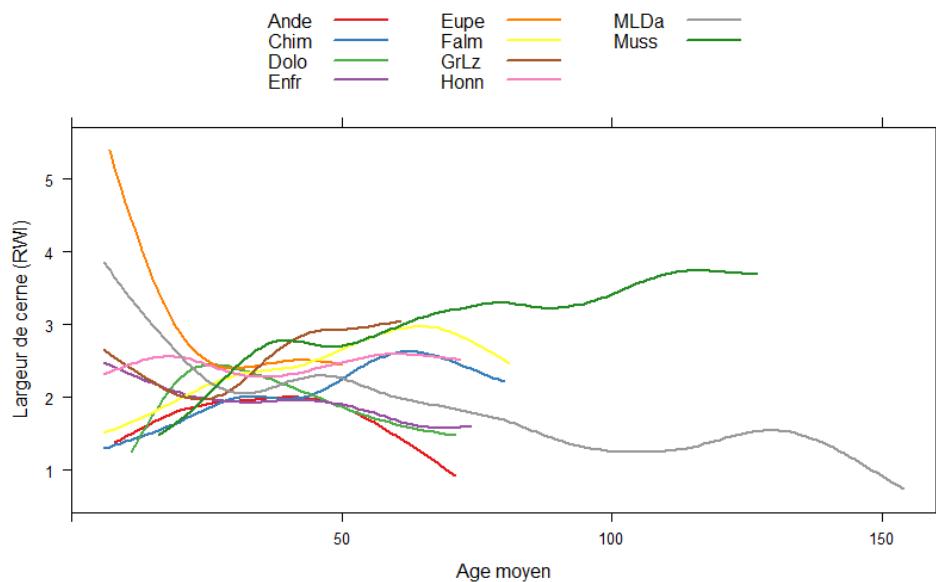


Figure 31 : Courbes des basses fréquences associées à chaque site

## 2.2.3. Comparaison des indices de cernes (RI) moyens

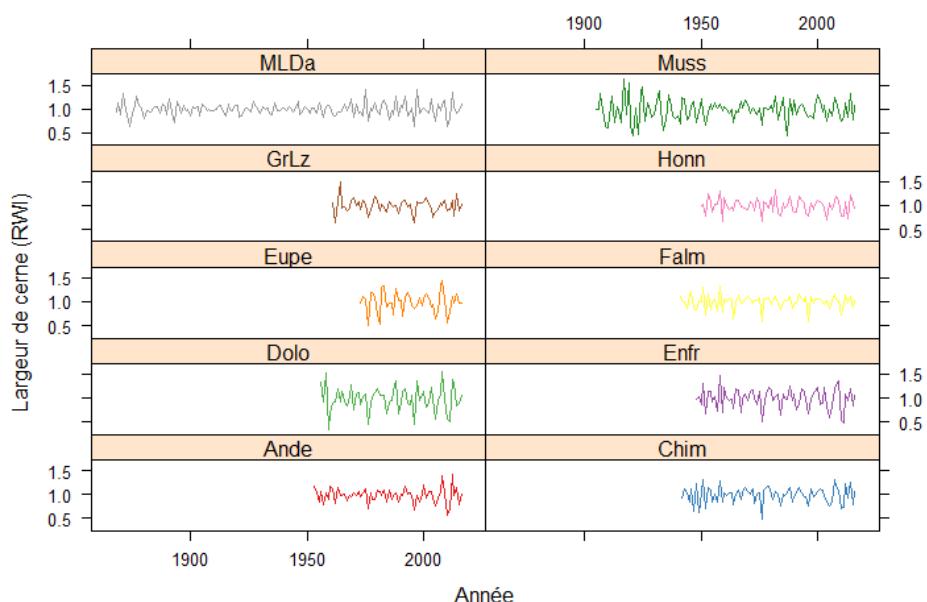
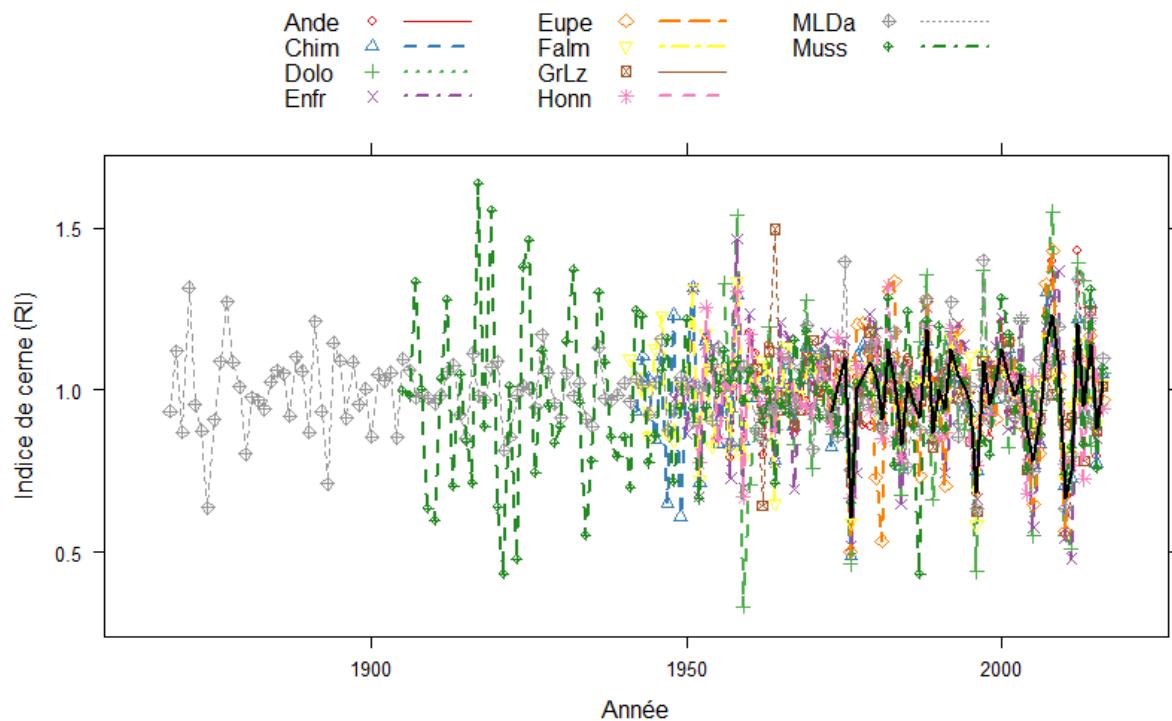
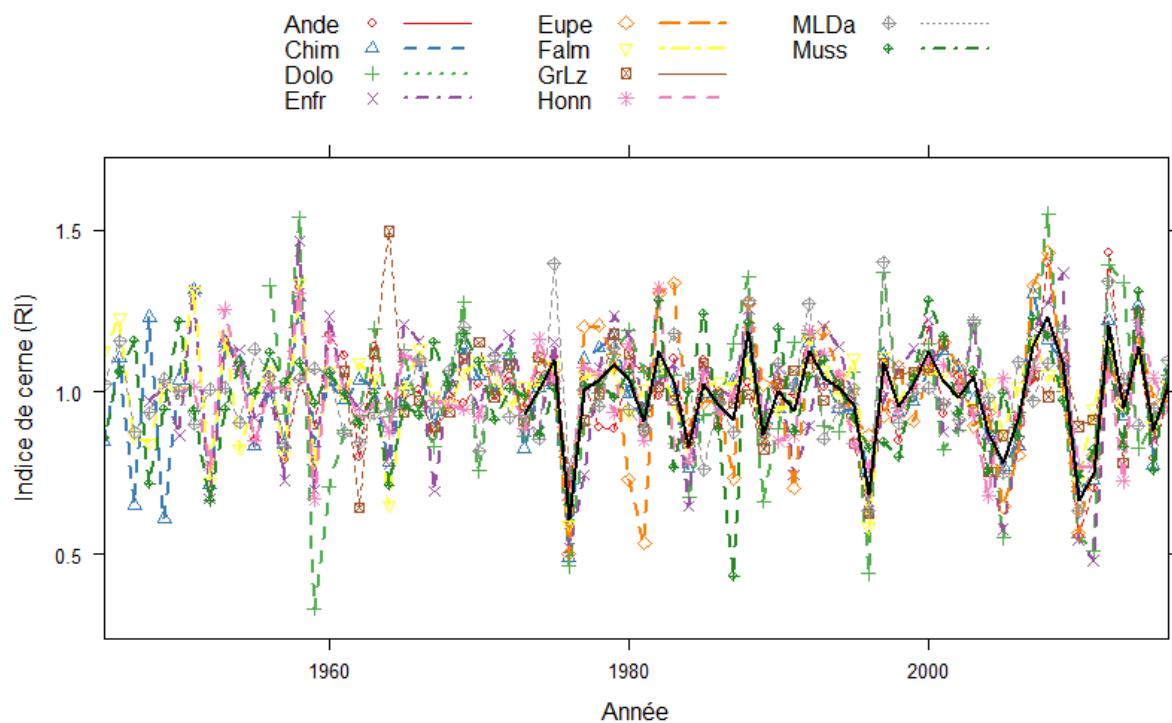


Figure 32 : Séries chronologiques moyennes de l'indice de cerne (RI) par site



*Figure 33 : Séries chronologiques moyennes combinées de l'indice de cerne (RI) par site*



*Figure 34 : Séries chronologiques moyennes combinées de l'indice de cerne (RI) par site (1945-2016)*

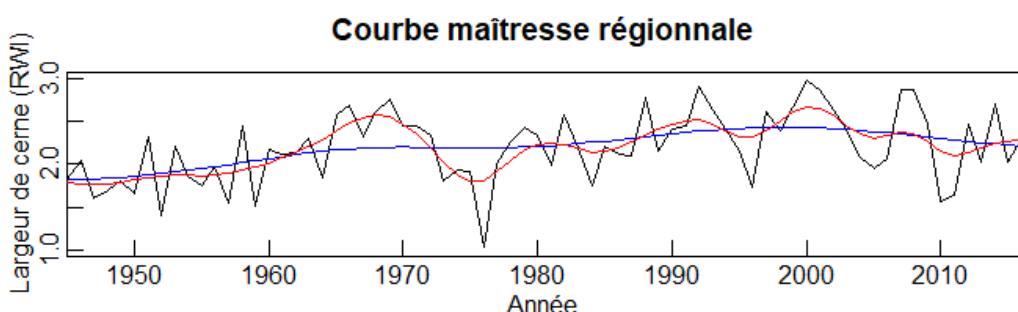
## 2.2.4. Statistiques descriptives

Le Tableau 4 ci-après résume, pour chaque site, l'ensemble des paramètres découlant de l'étude dendrochronologique. Pour rappel, ces analyses ont été appliquées uniquement sur le jeu de données « nettoyé », c'est-à-dire sur les échantillons suffisamment lisibles et correctement interdatés et en omettant systématiquement les 5 premières années mesurées.

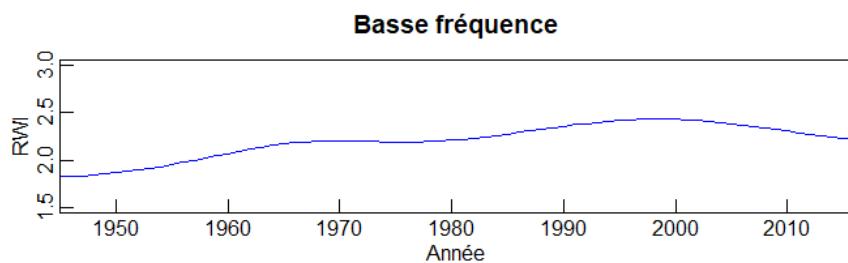
*Tableau 4 : Statistiques descriptives liées aux mesures dendrochronologiques de chaque site*

Site	Ghlin	Statistiques descriptives basées sur l'indice de largeur de cerne (RWI)				
		Honnelle	MLD Dolomies	Marche-les-Dames	Andenne	Grand-Leez
Accroissement moyen (mm)	na	2,457	1,951	1,814	1,700	2,525
Médiane (mm)	na	2,495	1,969	1,671	1,748	2,512
Ecart type (mm)	na	0,497	0,785	0,747	0,452	0,771
Sensibilité moyenne	na	0,215	0,337	0,162	0,227	0,209
Coefficient de Gini	na	0,114	0,224	0,212	0,149	0,173
Coefficient d'autocorrélation (AC)	na	0,113	0,562	0,795	0,507	0,634
Statistiques descriptives basées sur l'indice de cerne (RI)						
Signal effectif (ES)	na	0,373	0,586	0,142	0,257	0,140
Signal effectif de la population (EPS)	na	0,801	0,846	0,510	0,509	0,314
Statistiques descriptives basées sur l'indice de largeur de cerne (RWI)						
Dinant Falmignoul	Dinant Enfer	Chimay	Musson	Eupen	Site	
2,417	1,924	2,073	3,027	2,970	Accroissement moyen (mm)	
2,447	1,987	2,007	3,036	2,504	Médiane (mm)	
0,597	0,557	0,627	1,043	1,340	Ecart type (mm)	
0,187	0,297	0,234	0,288	0,264	Sensibilité moyenne	
0,140	0,159	0,172	0,195	0,219	Coefficient de Gini	
0,582	0,197	0,625	0,504	0,526	Coefficient d'autocorrélation (AC)	
Statistiques descriptives basées sur l'indice de cerne (RI)						
0,407	0,609	0,437	0,386	0,682	Signal effectif (ES)	
0,704	0,849	0,902	0,710	0,891	Signal effectif de la population (EPS)	

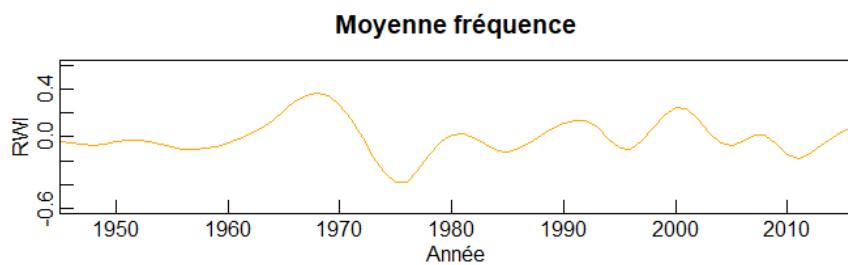
## 2.3. Série chronologique maîtresse régionale



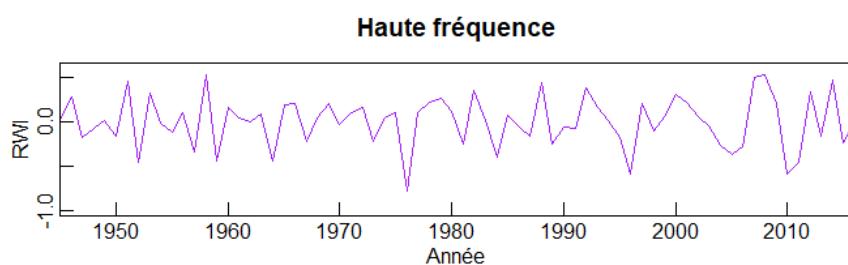
*Figure 35 : Courbe maîtresse régionale. La ligne bleue correspond à la basse fréquence et la ligne rouge à la somme de la basse et moyenne fréquence*



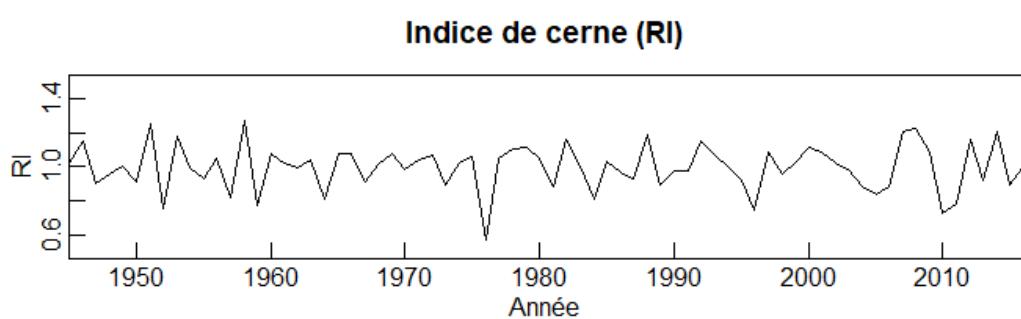
*Figure 36 : Courbe illustrant l'évolution temporelle de la basse fréquence*



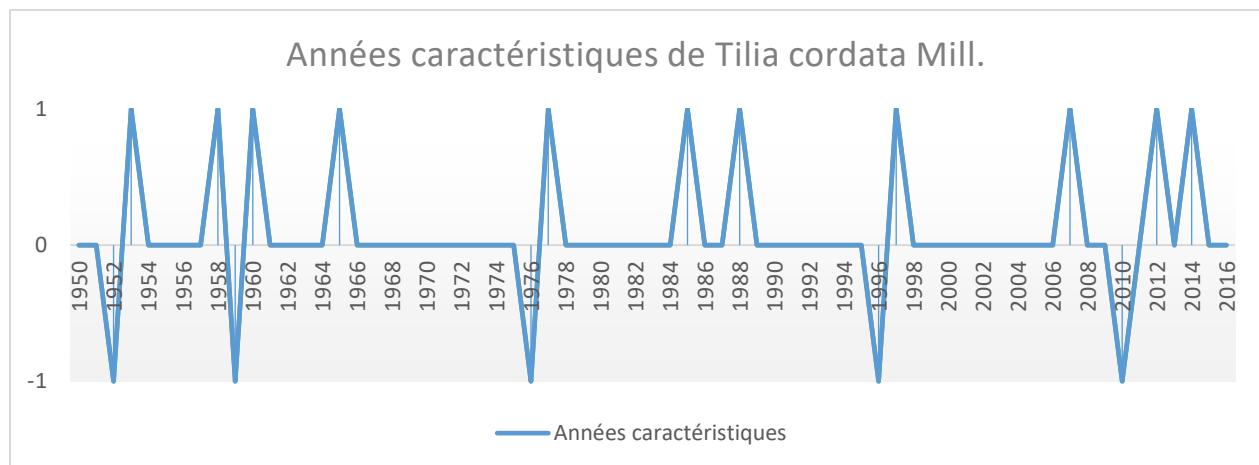
*Figure 37 : Courbe illustrant l'évolution temporelle de la moyenne fréquence*



*Figure 38 : Courbe illustrant l'évolution temporelle de la haute fréquence*

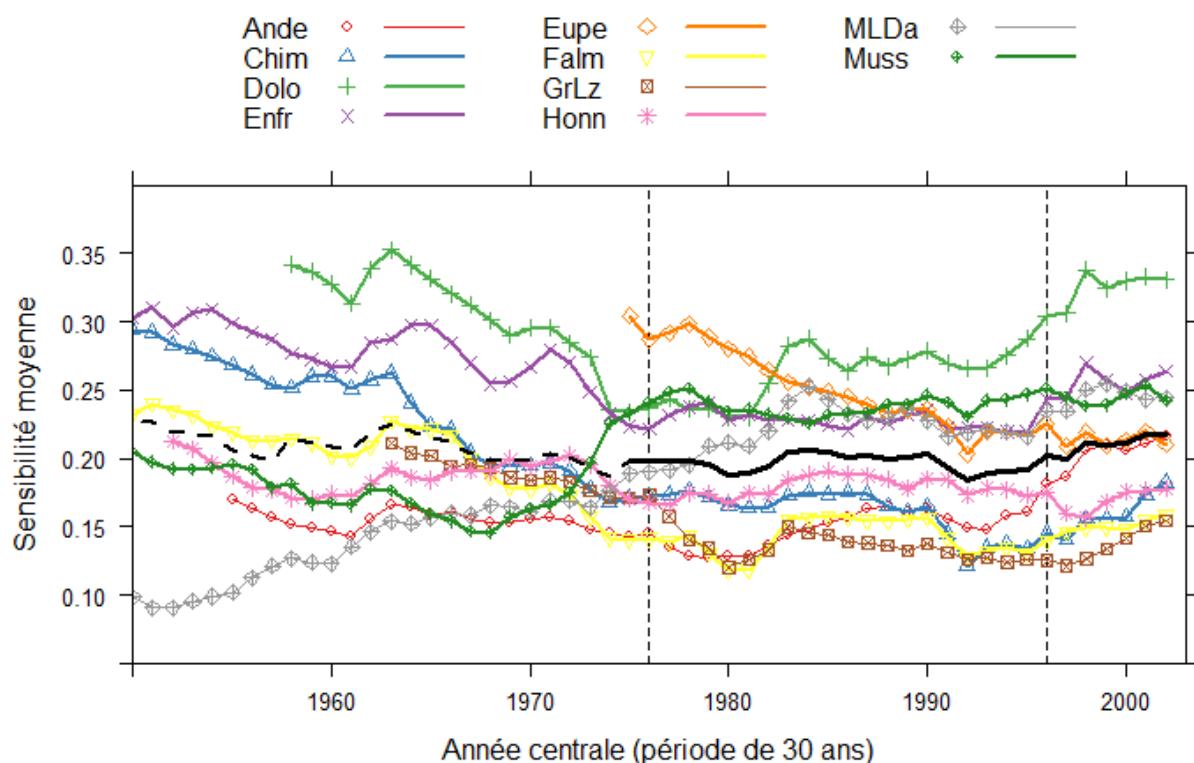


*Figure 39 : Courbe illustrant l'indice de cerne standardisé (RI) issu de la courbe maîtresse régionale*



*Figure 40 : Mise en évidence des principales années caractéristiques de *T. cordata* Mill.*

## 2.4. Sensibilité moyenne



*Figure 41 : Evolution temporelle de la sensibilité moyenne pour chaque site*

### 3. Dendroécologie – Relation « cerne-climat »

#### 3.1. Méthode PLS : « Partial Least Squares regression » et modèle de corrélation « bootstrap »

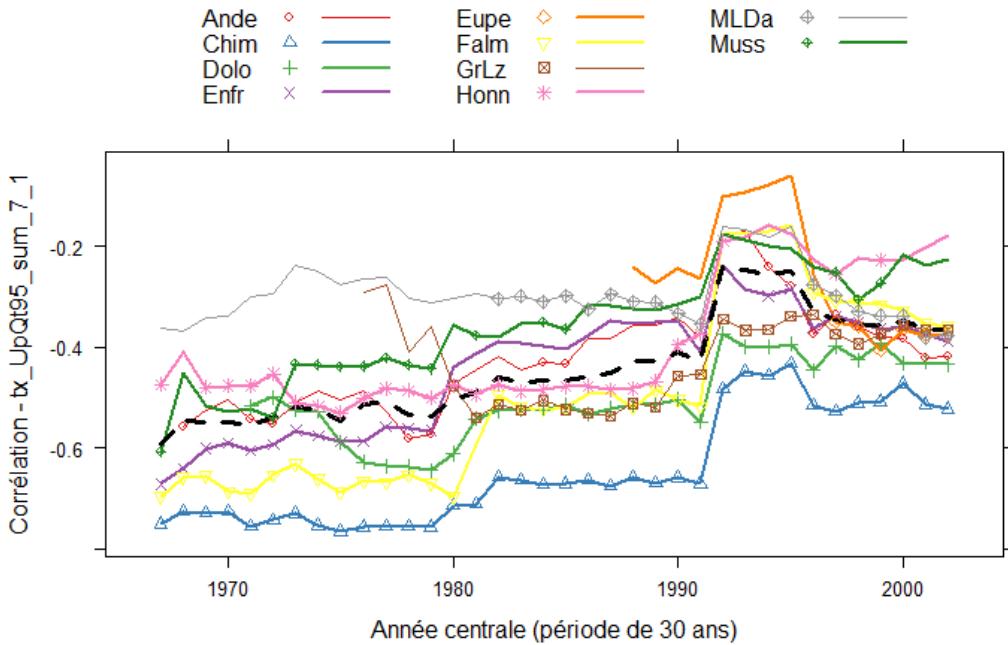
Les résultats de la régression PLS font ressortir trois variables climatiques pouvant expliquer la variation de l'indice de cerne (RI) au cours du temps. La meilleure variable explicative est la somme des températures maximales supérieures au percentile 95 pour les mois de juin et juillet (tx\_UpQt95\_sum\_7\_1). La seconde variable explicative est la moyenne des précipitations durant les mois de mars à juillet (rr\_mean\_7\_4). Une troisième variable explicative, basée uniquement sur l'analyse de la relation cerne-climat en prenant seulement les données climatiques de l'année précédente (n-1), a pu être mise en évidence. Il s'agit de la somme des températures maximales supérieures au percentile 95 pour le mois d'août de l'année précédente (tx\_UpQt95\_sum\_8\_0n-1).

Dans le but de vérifier la pertinence du choix des variables, la corrélation entre les trois variables explicatives a été testée (Tableau 5) afin d'évaluer le niveau de corrélation deux à deux. Ce dernier doit être relativement faible afin d'éviter l'utilisation de plusieurs variables pour expliquer la même part de variabilité, ce qui est vrai dans le cas présent.

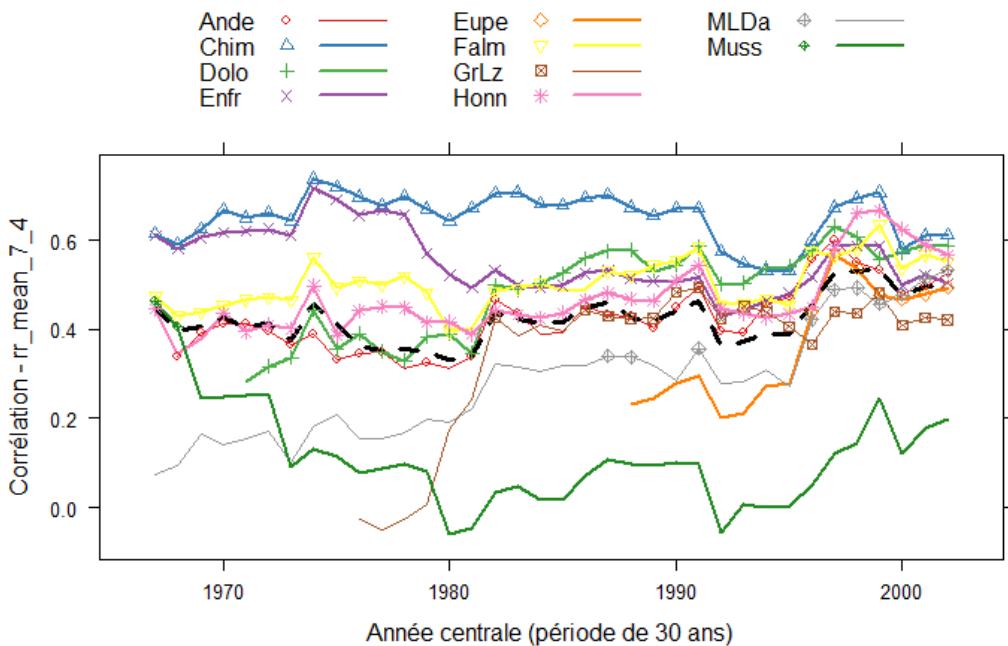
*Tableau 5 : Corrélation entre les variables explicatives sélectionnées*

	<i>tx_UpQt95_sum_7_1</i>	<i>rr_mean_7_4</i>	<i>tx_UpQt95_sum_8_0n-1</i>
<i>tx_UpQt95_sum_7_1</i>	1,00	-0,34	0,19
<i>rr_mean_7_4</i>	-0,34	1,00	-0,23
<i>tx_UpQt95_sum_8_0n-1</i>	0,19	-0,23	1,00

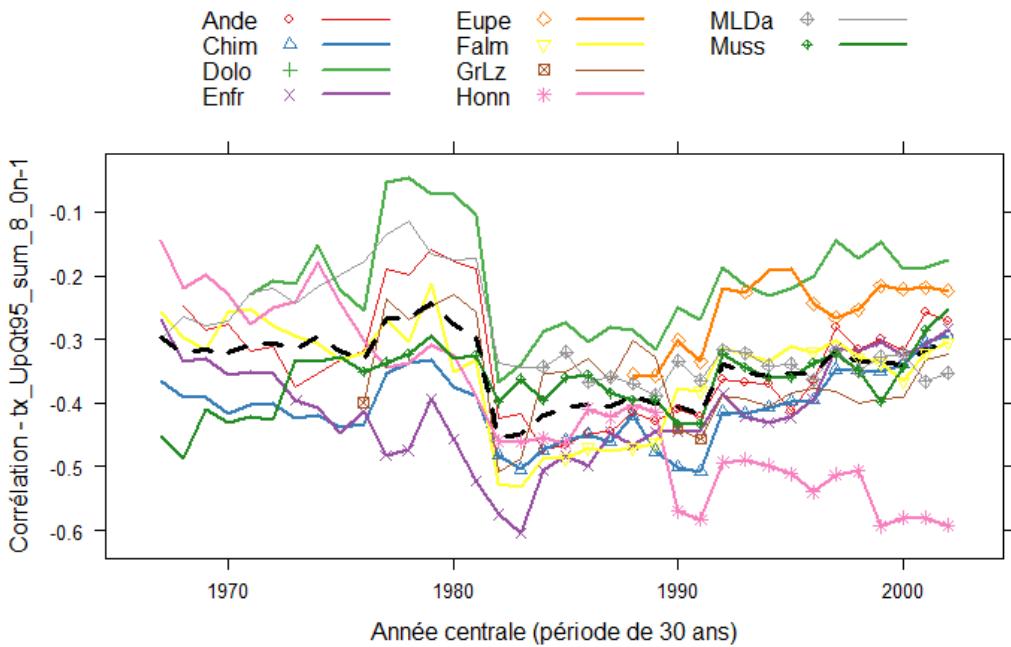
La significativité de la corrélation de chacune de ses trois variables a ensuite été testée en utilisant un modèle de corrélation « bootstrap ». Les résultats de ce modèle sont illustrés par les graphes repris aux figures 42 à 44 ci-après.



*Figure 42 : Evolution temporelle du coefficient de corrélation bootstrap, pour chacun des sites échantillonnés, pour la meilleure variable explicative « Somme des températures maximales supérieures au percentile 95 des mois de juin et juillet ». Les points associés aux courbes indiquent les corrélations « croissance - variable climatique » significatives.*



*Figure 43 : Evolution temporelle du coefficient de corrélation bootstrap, pour chacun des sites échantillonnés, de la 2<sup>ème</sup> variable la plus explicative « Moyenne des précipitations des mois de mars à juillet ». Les points associés aux courbes indiquent les corrélations « croissance - variable climatique » significatives.*



*Figure 44 : Evolution temporelle du coefficient de corrélation bootstrap, pour chacun des sites échantillonnés, de la variable explicative « Somme des température maximales supérieures au percentile 95 pour le mois d'août de l'année précédente ». Les points associés aux courbes indiquent les corrélations « croissance - variable climatique » significatives.*

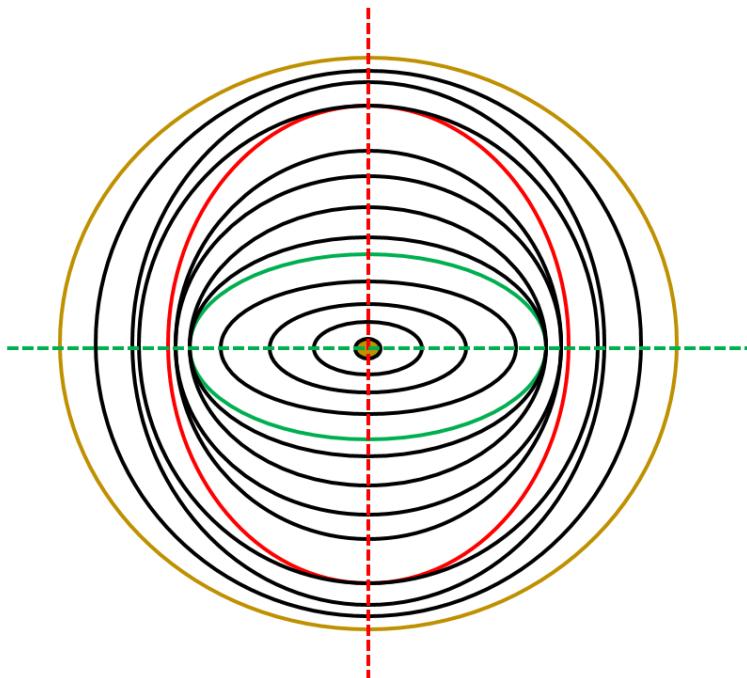
## VI. Discussion générale

### 1. Protocole de récolte, de mesure et d'analyse

L'une des principales contraintes de cette étude dendroécologique était la faible proportion de tilleuls à petites feuilles en Wallonie. Les sites échantillonnés ne répondent absolument pas aux mêmes critères de sélection que ceux sélectionnés pour la grande majorité des études dendroécologiques. En effet, il est très difficile de trouver un nombre confortable de peuplements de tilleuls en station forestière, dont les individus sont suffisamment âgés et dominants pour les analyses. De plus, les autorisations nécessaires pour abattre et/ou carotter des tilleuls sont particulièrement délicates à obtenir. Le tilleul étant une essence relativement peu présente dans nos forêts, il est aisément de comprendre l'hésitation et la méfiance des gestionnaires forestiers face à l'objectif de ce mémoire. Pourtant, les recherches de Tanguy De Jaegere pour trouver des placettes contenant du tilleul et les prospections en compagnie des agents DNF ou des propriétaires privés, agrémentées parfois d'une instance soutenue, ont porté leurs fruits. Le nombre total d'échantillon est suffisant pour ébaucher et illustrer les premières interprétations concrètes sur cette essence au potentiel encore largement sous-estimé. Le jeu de données est loin d'être exhaustif (peuplement très âgé à très jeune, peu d'échantillons pour les extrêmes altitudinaux, nombre d'échantillons par site très variable) mais les résultats sont néanmoins concordants et fournissent une tendance assez claire.

Le système de transport (Figure 16 – page 18) et de séchage (Figure 17 – page 20) fabriqué pour des échantillons de type « carottes » sont un point d'amélioration dans le déroulement du protocole de ce mémoire. Cela évite de devoir employer les anciennes boîtes de transport en bois relativement encombrantes et lourdes.

L'intermédiaire entre la carotte et la rondelle : le barreau (Latte, 2015 ; Latte, 2017) est sans aucune hésitation le meilleur compromis en matière d'échantillonnage et correspond à un rapport précision/surface optimal. Les carottes sont faciles à transporter et leur phase de préparation est réduite mais leur lisibilité, du moins dans le cas du tilleul, est souvent largement en dessous de celle du barreau. La croissance de certains individus (cf. Figure 10 – page 14) peut en effet être particulièrement difficile à étudier suite aux irrégularités qu'un cerne peut présenter selon la direction du chemin (« path ») de mesure. La plupart du temps, le tilleul développe des cernes ovales selon une direction donnée et parallèle à l'axe de la plus grande longueur de l'ellipse formée. Toutefois, il arrive occasionnellement que la direction de l'ellipse formée par les cernes change au cours du temps, ce qui explique les dessins particuliers rencontrés sur le barreau de la Figure 10. Une représentation schématique (Figure 45 – page 51) permet de mieux visualiser ce phénomène qui s'avère être assez problématique lors de l'étape d'interdatation des séries chronologiques (fusion régulière de deux ou plusieurs cernes). L'une des hypothèses probables expliquant ce défaut serait l'évolution du bois de tension en fonction de l'emplacement des branches charpentières le long du tronc au cours de la vie de l'arbre. Le barreau a une surface de lecture inférieure à celle de la rondelle mais il permet néanmoins de voyager le long du cerne afin de vérifier si un autre cerne réapparaît plus loin ou non (ce qui est impossible avec les échantillons de type carotte).



*Figure 45 : Schéma de l'accroissement supposé des tilleuls présentant un défaut interne particulièrement difficile à appréhender lors de l'étape d'interdatation*

Concernant la méthode de préparation des carottes (cf. chapitre IV point 2.2.2), il est impératif de privilégier la méthode par collage direct. Le gain de temps est flagrant (pas besoin de séchage ni de machine spécialisée) et le résultat post-numérisation est largement meilleur.

La phase d'interdatation (cf. chapitre IV point 2.4.2.2) est de très loin la plus complexe et chronophage. Le traitement préalable des échantillons à l'huile de lin et l'utilisation d'une loupe lors de cette étape permettent cependant de faciliter grandement la tâche (à condition d'être focalisé sur l'objectif et de faire preuve d'un minimum de patience).

Le script employé pour l'étape d'analyse des données dans RStudio (The R Core Team, 2017) a été spécifiquement adapté par Latte (2017) pour ce mémoire de fin d'études. Il est donc directement inspiré du script associé à sa thèse de doctorat sur la dendroécologie du hêtre. Il est clair que sans l'aide de Monsieur Latte, ce travail n'aurait jamais pu être remis dans le délai imparti.

## 2. Synthèse des résultats et discussions

Cette section synthétise les résultats et les discute. Des hypothèses sont formulées pour tenter d'expliquer la relation liant l'accroissement de *T. cordata* aux conditions climatiques de la région wallonne. Celles-ci sont basées sur les connaissances actuelles de l'autécologie de cette essence (Jaegere et al., 2016).

### 2.1. A l'échelle de la Wallonie

L'analyse dendroécologique et le modèle de corrélation font ressortir, en première approche, une tendance explicite pour la relation accroissement-climat. En effet, comme l'illustre la Figure 42 (page 48), la sensibilité du tilleul à la **somme des températures maximales (supérieures au percentile 95) des mois de juin et juillet** diminue sensiblement avec le temps (coefficient de corrélation bootstrap – « BCC » de -0,6 en 1970 à -0,4 en 2000 en passant par -0,3 en 1995). De plus, il semble que cette sensibilité ait été minimale durant la première moitié des années 90, pourtant connues pour leurs épisodes de canicules et/ou de sécheresses. Il faut néanmoins garder à l'esprit que la corrélation est calculée sur une fenêtre temporelle mobile de 30 ans pour chaque année centrale. Il faut donc nuancer cette hypothèse car la diminution marquée de la sensibilité du tilleul à partir de l'année centrale de 1992 est probablement due au fait que la fenêtre temporelle sur laquelle est appliqué le modèle [1977→2007] ne prend plus en compte les valeurs de l'année 1976, la pire année climatique pour nos forêts en termes de sécheresses et de canicules.

L'accroissement du tilleul est également corrélé positivement avec la **moyenne des précipitations des mois de mars à juillet** (Figure 43 – page 48). Néanmoins, cette corrélation reste stable au cours du temps et permet simplement d'affirmer que le développement physiologique du tilleul dépend de la disponibilité en eau de la station. En Belgique, il ne s'agit pas d'un élément limitant pour le tilleul, excepté lors d'épisodes de longues sécheresses. Cette hypothèse est confirmée par De Jaegere et al. (2016) qui expliquent que la réponse de *T. cordata* est corrélée positivement avec l'apport en eau. Si cet apport est supérieur 550-600 mm/an, ce facteur devient secondaire et la température à une influence plus significative. Or, dans notre échantillon, les précipitations totales annuelles se situent entre 800 et 1000 mm/an (IRM, 2017).

La troisième variable explicative extraite du modèle, à savoir la **somme des températures maximales (supérieures au percentile 95) pour le mois d'août de l'année précédente**, offre également une perspective intéressante (Figure 44 – page 49). En effet, il semble qu'à partir de l'année centrale de 1982, les variations de croissance soient corrélées négativement à cette variable. Toutefois, la tendance générale est relativement stable et la valeur du coefficient de corrélation des années 90 et 2000 est similaire à celle d'avant 1980. Ce brusque sursaut trouve certainement sa source dans le fait que la fenêtre temporelle centrée sur 1982 [1967→1997] prend en compte les deux principales années caractéristiques négatives pour le tilleul (1976 et 1996). Etant donné que la variable climatique concerne les valeurs de l'année précédente (n-1), il est logique de penser qu'une fois l'année 1997 atteinte par la borne supérieure de la fenêtre temporelle, la valeur de la corrélation pour l'année centrale de 1982 ait chuter. En effet, les valeurs pour les canicules et sécheresses de 1976 combinées à celles la sécheresse de 1996 (année n-1 influençant l'année 1997) ont certainement tiré l'ensemble du jeu de données, ce qui confirme l'importance de leur impact.

On distingue d'ailleurs une amélioration notable pour l'année centrale de 1992 [1977→2007] puisque les effets de l'année 1976 n'ont plus aucun poids dans le calcul du coefficient de corrélation bootstrap.

Les indices de **sensibilité moyenne** semblent confirmer les précédentes observations. Comme le montre la Figure 41 (page 46), la tendance reste globalement stable depuis les années 50, ce qui indique que le tilleul est relativement peu sensible aux événements climatiques extrêmes sur le moyen et long terme. Seul l'accroissement pour l'année en cours est visiblement impacté. C'est notamment le cas pour 1976, 1996 et 2010, trois années pour lesquelles le tilleul a connu une diminution d'accroissement ponctuelle significative depuis 1960. Le graphique de l'évolution de l'indice de cerne standardisé au cours du temps (Figure 39 – page 45) et le graphique mettant en évidence les principales années caractéristiques du tilleul (Figure 40 – page 46) confirment ces observations.

Cette étude met donc en évidence **deux périodes clés de la saison de végétation**. Malgré une hausse non-négligeable des épisodes caniculaires depuis le milieu des années 80 (Lebougeois et Mérian, 2012), les fortes températures des deux premiers mois de la saison estivale ne semblent pas impacter l'accroissement du tilleul et auraient même tendance à le favoriser. Néanmoins, les canicules du mois d'août ont un impact négatif léger sur l'accroissement de l'année suivante pour la plupart des sites. La résilience de *T. cordata* peut également être partiellement expliquée par les précipitations printanières, période pendant laquelle l'essence puise les ressources nécessaires pour faire face aux conditions plus sèches de l'été belge. La réserve hydrique de la station est donc l'un des principaux facteurs expliquant la résilience des peuplements de tilleuls.

Il faut donc considérer de manière simultanée les effets de la chaleur couplés à la quantité d'eau utile disponible pour l'arbre. En effet, des températures élevées stimulent les processus physiologiques jusqu'à ce que les apports en eau deviennent limitants. La réserve hydrique, les précipitations et l'évapotranspiration sont donc trois paramètres stationnels à évaluer et à mettre en relation avec l'accroissement, au même titre que les variables associées à la température. Il serait donc pertinent de définir les valeurs limites de ses paramètres pour savoir à partir de quel moment le tilleul peut être déclaré en stress hydrique. Cette étude n'est pas exhaustive car elle se focalise sur la part de variabilité expliquée par des variables climatiques « simples » (température et précipitation). Les prochaines analyses devront donc intégrer les variables liées à la réserve hydrique de la station au cours du temps.

## 2.2. A l'échelle des sites

Les observations et interprétations qui suivent doivent être systématiquement nuancées en fonction du signal effectif (ES) et de l'indice EPS propres à chacun des sites (cf. Tableau 4 – page 44). Certains sites ont en effet davantage de poids (nombre d'arbres important) et sont particulièrement fiables (ES et EPS élevés) pour confirmer ou infirmer une observation. Les figures 42 à 44 (pages 48 à 49) illustrant l'évolution du coefficient de corrélation bootstrap (BCC) prennent en compte le poids plus ou moins important accordé à chacun des sites. Les courbes ont volontairement été associées des largeurs de ligne différentes. Les plus épaisses correspondent aux sites fiables dont l'interdatation est de qualité suffisante et/ou présentant des indices ES et EPS élevés. A l'inverse, les courbes plus fines illustrent l'évolution des sites pour lesquels l'interdatation est moins fiable et/ou

présentant des indices ES et EPS trop bas. Cette information est disponible dans la synthèse du tableau récapitulatif utilisé pour les analyses (cf. Tableau 3 – ligne « Qualité de l'interdatation » – page 38). Les Figure 29 à 34 (pages 41 à 43) et le Tableau 4 (page 44) permettent d'avoir une idée précise de l'ensemble des informations dendrochronologiques disponibles pour chacun des sites.

L'**EPS** varie de 0,314 (Grand-Leez) à 0,902 (Chimay), soit une moyenne de 0,704 (cf. Tableau 4 – page 44). Le nombre de tilleuls est souvent insuffisant pour permettre une bonne représentativité de la population théorique ( $\text{EPS} \geq 0,800$ ). Néanmoins, la moitié des sites interdatés atteint la valeur seuil fixée (cf. chapitre IV point 3.2.2.8). Il s'agit des sites de Chimay (0,902), Eupen (0,891), Enfer (0,849), Dolomies (0,846) et Honnelles (0,801). Ces sites sont donc particulièrement fiables pour discuter les tendances observées.

L'**ES** varie de 0,140 (Grand-Leez) à 0,891 (Eupen), soit une moyenne de 0,402 (cf. Tableau 4 – page 44). Le signal effectif intra- et inter-individus est donc relativement fort, exception faite de Grand-Leez et Marche-les-Dames qui présentent un ES très faible. La cause est complexe à identifier. On peut émettre l'hypothèse que la sylviculture ou certaines micro-conditions stationnelles aient influencé le développement des individus de façon hétérogène. Il est également possible que l'âge avancé des tilleuls de Marche-les-Dames perturbe la force signal étant donné que les chronologies sur lesquelles il est calculé sont beaucoup plus étendues dans le temps (et donc plus susceptibles de varier d'un individu à l'autre). De plus, on constate également un signal relativement peu élevé (0,386) pour les vieux tilleuls de Musson.

Le coefficient autocorrélation de premier ordre (**AC**) varie quant à lui de 0,113 (Honnelle) à 0,795 (Marche-les-Dames), soit une moyenne de 0,505. Cela indique qu'il existe une forte influence de l'accroissement de l'année précédente sur l'année en cours. En d'autres termes, les facteurs locaux qui ont favorisé l'accroissement de l'année précédente influencent également celui de l'année en cours.

L'étude des **basses fréquences** respectives de chaque site (Figure 31 – page 42) renseigne sur la dynamique du tilleul. Les largeurs moyennes de cernes par site sur les 10-15 premières années semblent être très variables d'un peuplement à un autre. Cela pourrait traduire une sensibilité environnementale plus contrastée du tilleul au stade juvénile, que ce soit climatique (sécheresse, canicule), sylvicole (densité du peuplement) ou autres. Une fois ce stade dépassé, le tilleul stabilise son accroissement (dans ses conditions de sylviculture actuelles) vers 50 – 60 ans. Au-delà de cet âge, la majorité des peuplements voient leur accroissement diminuer progressivement. Les vieux tilleuls de Musson (Muss) remettent en question cette tendance. Leur accroissement annuel est en constante augmentation depuis le stade juvénile et, même si une diminution est observée aux alentours des 80 ans (que l'on pourrait attribuer aux sécheresses et canicules de 1976), la progression s'est maintenue jusqu'à aujourd'hui. En revanche, à Marche-les-Dames (MLDa), la tendance inverse est observée. Même si la qualité de l'interdatation est à discuter et que le signal effectif (intra- et inter-individus) est bas, la diminution marquée de l'accroissement au cours du temps reste évidente pour l'ensemble des individus (particulièrement âgés). On observe toutefois une diminution ou au mieux une stabilisation de l'accroissement pour tous les sites. Ces dernières années n'ont donc pas permis au tilleul d'augmenter son accroissement moyen.

La tendance globale de l'évolution de la **sensibilité moyenne** des sites échantillonnés au cours du temps (Figure 41 – page 46) est relativement stable et s'avère être similaire pour la quasi-totalité des sites. Les courbes des sites de Marche-les-Dames (MLDa) et de Musson (Muss) montrent cependant une augmentation légère de cette sensibilité moyenne depuis les années 70. Cette observation peut être expliquée par l'âge moyen de ces sites, qui est respectivement de 139 et 85 ans<sup>5</sup>. Les peuplements de tilleuls plus avancés en âge semblent donc développer une sensibilité accrue au climat. Il est également intéressant de noter que l'accroissement des peuplements plus jeunes (Eupe, Dolo, GrLz) est visiblement plus sensible au climat dans le jeune âge mais cette sensibilité diminue jusqu'à atteindre son minimum à la maturité des individus. Une fois sorti du stade juvénile, le tilleul semble donc bien armé face aux variations climatiques.

En analysant plus en détail l'évolution du coefficient de corrélation bootstrap (BCC) pour la **meilleure variable explicative** (Figure 42 – page 48). Il en ressort que certains sites se distinguent de diverses manières. L'accroissement du site de Chimay (Chim) s'avère être le plus corrélé (négativement) aux épisodes caniculaires de juin – juillet tout au long de son évolution. De plus, il s'agit d'un site que l'on pourrait qualifier de « référence » au sein du jeu de données (nombre d'échantillon très élevés, ES et EPS élevés, situation intermédiaire sur le gradient climatique de la Wallonie). Comme la plupart des autres sites, il semble réagir favorablement aux changements. Il confirme donc l'interprétation générale faite au niveau de l'ensemble de la région. Les sites dont la corrélation mobile est moins marquée pour cette variable explicative sont Marche-les-Dames (MLDa), Andenne (Ande) et Eupen (Eupe). Les deux premiers ont une interdatation de moins bonne qualité et le site d'Eupen est le plus jeune peuplement échantillonné. Ces éléments n'expliquent pas de manière exhaustive leur manque de corrélation avec la variable mais il s'agit sans doute d'un début d'explication.

L'évolution de la corrélation mobile de l'accroissement en fonction de la **seconde variable explicative** (moyenne des précipitations de mars à juillet) montre également quelques exceptions lorsque l'on se place au niveau site. L'exception la plus marquante est la réponse du peuplement situé à Musson (Muss). Bien que correctement interdaté (ES et EPS correctes), il présente une réponse tout à fait originale par rapport aux autres sites (Figure 43 – page 48). Sa croissance serait corrélée positivement aux précipitations printanières uniquement au stade juvénile et en serait indépendante au-delà, ce qui semble assez surprenant (même en sachant que ces tilleuls évoluent sur un sol riche profond). Encore cette fois, le site de Marche-les-Dames (MLDa) sort du lot et se révèle globalement moins corrélé à la variable que les autres sites (excepté Musson bien entendu). Seule l'application de la fonction de corrélation mobile bootstrap avec une fenêtre mobile de 50 ans (au lieu de 30 ans) permet de mettre en évidence des BCC significatifs avant 1980. Mais cette largeur de fenêtre (50 ans) ne met pas en évidence des instabilités temporelles basse fréquence. Elle ne permet pas de pointer clairement des phénomènes de fréquence plus élevée, tels que l'influence de l'accélération des changements globaux observés depuis le milieu des années 1980 (Lebourgeois et Mérian, 2012).

---

<sup>5</sup> L'âge moyen et la circonférence moyenne pour le site de Musson sont ici sous-estimés car la tarière de Pressler n'a pas pu atteindre la moelle de la plupart des arbres tant leurs circonférences étaient imposantes.

Concernant la **troisième variable explicative** (Figure 44 – page 49), il apparaît que les tendances individuelles des sites sont assez univoques. Seul le site d'Honnelles (Honn), situé le plus à l'ouest de la Wallonie, montre une corrélation négative progressivement plus marquée aux températures du mois d'août de l'année précédente. Le site « Enfr », situé au lieudit « Tienne d'Enfer » dans le cantonnement de Dinant fut particulièrement corrélé (négativement) à cette variable entre 1980 et 1985. Cette sensibilité à pourtant diminué progressivement (à l'image des autres sites) après cette période. Les deux sites décrits semblent répondre assez différemment à la variable. Honn est passé progressivement de « peu sensible » à « très sensible » entre 1970 et 2000. Tandis que le site Enfr est seulement passé par une période de sensibilité accrue entre 1980 et 1985, ce qui est d'ailleurs le cas pour la majorité des autres sites. Il est envisageable que la sensibilité à cette variable soit liée à la position géographique du peuplement. L'ouest de la Wallonie présente en effet une température moyenne supérieure et une pluviométrie plus faible qu'au centre et à l'est.

De manière générale, les différences plus ou moins marquées de certains sites par rapport à la tendance globale peuvent être expliquées par d'autres facteurs, indépendants des paramètres climatiques communs (Niveaux hydriques / trophiques, sylviculture appliquée pour l'ensemble du peuplement, aléas, etc.).

### 3. Les années caractéristiques de *T. cordata*

La Figure 40 met en évidence les principales années caractéristiques du tilleul à petites feuilles. Il y a deux fois plus d'années caractéristiques « positives » (1953, 1958, 1960, 1965, 1977, 1985, 1988, 1997, 2007, 2012 et 2014) que d'années « négatives » (1952, 1959, 1976, 1996 et 2010), ce qui constitue déjà un bon indicateur de la relation « cerne-climat ».

Selon l'IRM (2017), l'année 1952 fut caractérisée par d'importantes canicules dès le début du mois de mai. Celle-ci se sont poursuivies jusqu'en juillet, mois pendant lequel de très violents orages ont éclatés, accompagnés localement de chutes de grêlons (8 cm de diamètre). Le mois d'août fut également extrêmement pluvieux. L'année 1959 fut marquée par plusieurs mois de sécheresse (surtout février, juillet et septembre) et par des températures anormalement élevées. L'année 1976 fut incontestablement l'année la plus sèche du siècle en Wallonie, ainsi que l'une des plus chaudes. On la retrouve dans l'historique de cerne de la grande majorité de nos essences wallonnes. Des sécheresses marquantes ont caractérisé 1996, du début de la période de végétation jusque fin août. Les 28 et 29 août ont, à l'inverse, connu des précipitations extrêmes ayant causé d'importants dégâts. La température moyenne annuelle a cette fois été anormalement basse (TMA : 9,1°C) et la saison hivernale particulièrement froide. L'année 2010 a été également caractérisée par une température moyenne annuelle anormalement froide (TMA : 9,7°C) et un hiver froid. Le printemps fut anormalement sec avec seulement 33 jours de pluie (normale : 49). La Figure 46 et 47 ci-après permettent de situer les cinq années caractéristiques du tilleul par rapport à l'historique des températures moyennes annuelles et des précipitations totales annuelles. La Figure 9 (page 13) répartit quant à elle les années selon deux gradients : « sec – humide » et « chaud – froid »

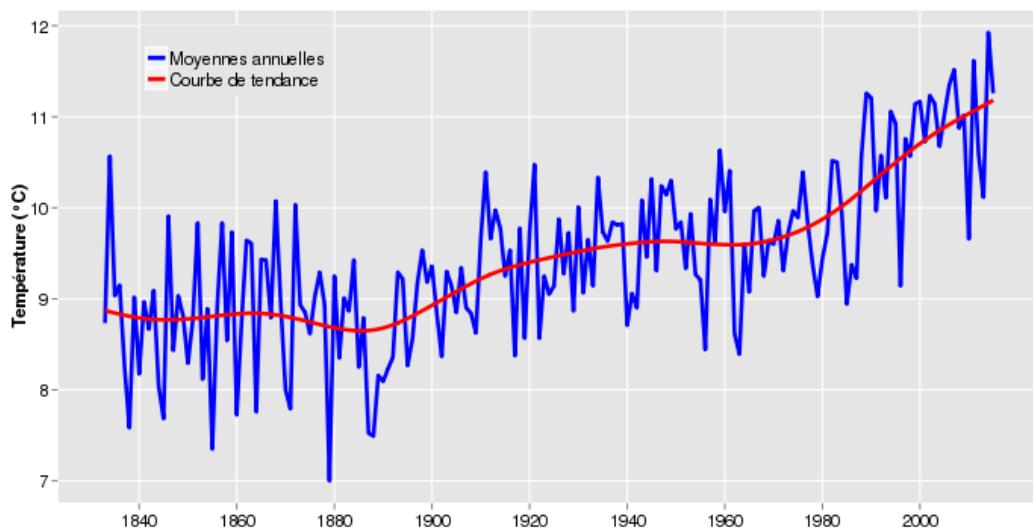


Figure 46 : Evolution de la température moyenne annuelle à Uccle de 1833 à 2015 (IRM, 2017)

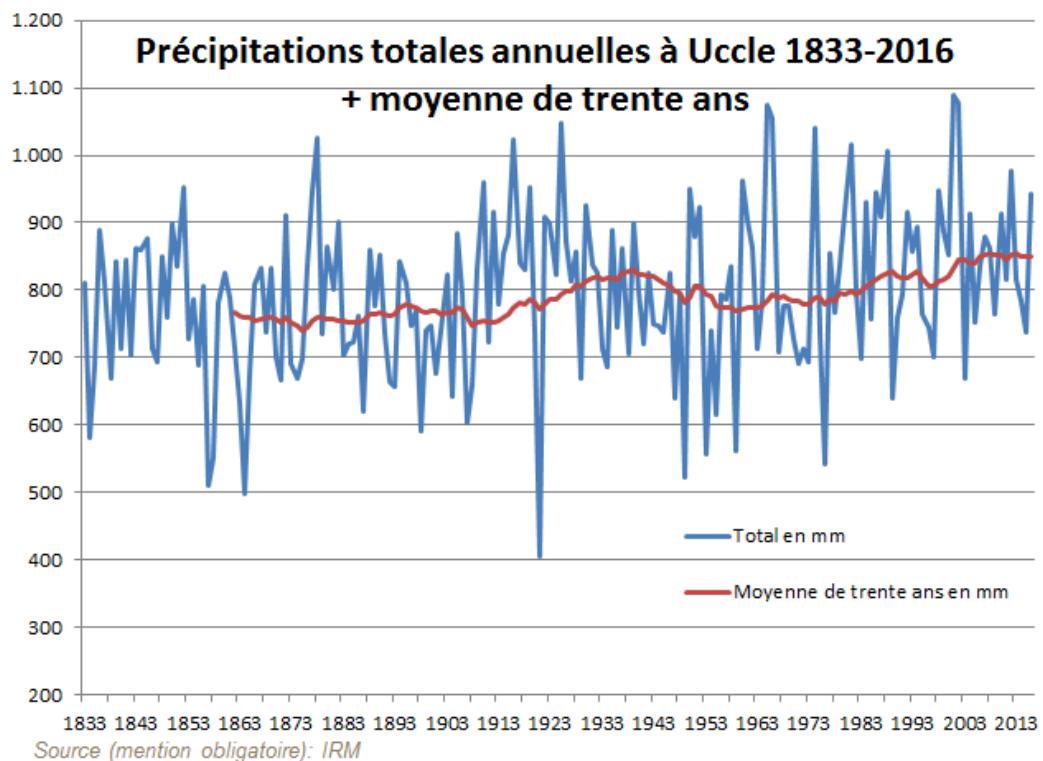


Figure 47 : Evolution des précipitations totales annuelles à Uccle de 1833 à 2015 (IRM, 2017)

Il apparaît que le point commun entre toutes les années caractéristiques du tilleul soit les périodes de canicules et les sécheresses qui en découlent. Les années 1996 et 2010 ont surtout été marquées par des périodes de sécheresses, ce qui confirme que c'est bien ce paramètre en particulière qui conditionne la réponse des tilleuls à petites feuilles.

#### 4. Comparaison avec d'autres essences

En comparant l'évolution de la sensibilité moyenne de *T. cordata* à celle des quatre principales essences commerciales en région wallonne (Figure 48), on s'aperçoit que la sensibilité du tilleul se situe entre le chêne (*Quercus sp.*) et les résineux (l'épicéa – *Picea abies* et le douglas – *Pseudotsuga menziesii*). Manise et Vincke (2014) mettent également en évidence l'année 1976, considérée comme la plus stressante au niveau hydrique pour l'ensemble de la région et pour les quatre essences concernées par leur étude. L'année 1996 est également une année caractéristique marquée par un stress hydrique important. Cette année est commune aux essences feuillues uniquement, *T. cordata* inclus. Le hêtre (*Fagus sylvatica*) est considéré comme étant l'essence la plus réactive et la plus affectée par les années caractéristiques négatives. Les travaux de Latte et al. (2015.1 et 2015.2) vont également dans ce sens et démontrent que la sensibilité climatique du hêtre augmente au cours du temps. Latte et al. (2012) pointent également les limites atteintes par les épicéas et les mélèzes du Japon (*Larix kaempferi*), tandis que douglas est quant à lui considéré comme le moins réactif au climat.

Manuise et Vincke (2014) décrivent l'apparition d'un phénomène interpellant d'uniformisation (ou synchronisme) de l'évolution de l'indice de croissance d'une espèce d'arbre donnée durant ces 25-30 dernières années. Les fortes crises de croissance observées en feuillus (hêtre et chênes) semblent être une conséquence de ce phénomène. Le facteur le plus explicatif de la sensibilité au climat avancé par l'étude de Manuise et Vincke (2014) est la réserve en eau utile maximale du sol. Malheureusement, les analyses faites dans le cadre de ce mémoire ne prennent pas en compte ce facteur de façon directe. Les précipitations automnales et hivernales semblent aussi exercer une influence marquante sur la croissance de l'année suivante pour les hêtres et les chênes. L'épicéa est quant à lui affecté par les fortes températures estivales et serait positivement corrélé aux précipitations pendant la saison de végétation (Latte et al., 2012). Dans sa conclusion, l'étude de Manuise et Vincke (2014) évoque également la capacité de récupération des feuillus une fois l'année caractéristique négative surmontée et moyennant des conditions climatiques favorables les années suivantes. La question est donc de savoir si c'est capacité perdurera et, si ce n'est pas le cas, le tilleul sera-t-il l'une des alternatives ? En l'état actuel des connaissances, les premiers résultats sont plutôt encourageants et semblent aller dans ce sens.

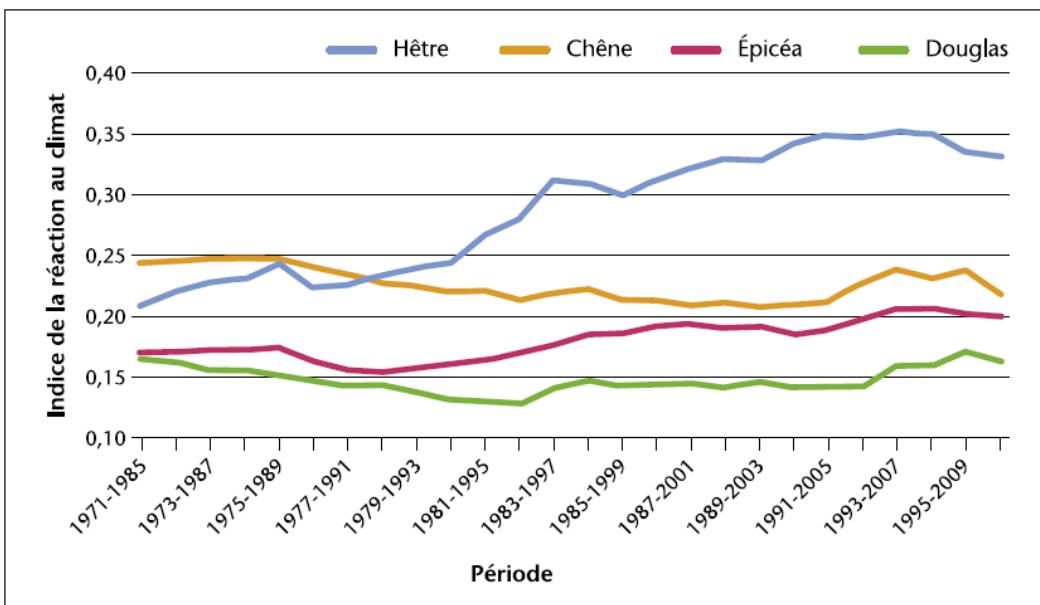


Figure 48 : Evolution de la sensibilité moyenne au climat des quatre principales essences commerciales de Wallonie (d'après Manise et Vincke, 2014)

Les récentes études pointent les faiblesses de nos principales essences de production. Le hêtre exprime ses premiers signes de faiblesse face aux changements globaux (Latte et al., 2015.1 ; Latte, 2017) et l'épicéa semble également avoir atteint sa limite (Latte et al., 2012). Les chênaies (*Quercus sp.*) subissent des déperissements inquiétants dus à des attaques biotiques répétées combinées à des années climatiques défavorables (Delahaye et al., 2016). Bien qu'avantage face aux changements climatiques, l'avenir du douglas inquiète un grand nombre de propriétaires forestiers car cette essence est actuellement confrontée à des organismes pathogènes émergents (Schmitz et al., 2016). Les frênes ont, quant à eux, connu un effondrement sans précédent de leur population suite aux ravages liés à la chalarose (Delahaye et al., 2015).

Il est plus que jamais nécessaire de se pencher sur la problématique de résilience de nos forêts. Nous savons aujourd'hui que la multi-spécificité se présente comme un atout certain face à un futur plus contraignant et nous nous devons de protéger au mieux nos écosystèmes forestiers afin de pérenniser leur bon fonctionnement et leur multifonctionnalité.

## 5. Quel avenir pour le tilleul en Wallonie ?

Dans le contexte incertain des changements globaux et, dans le cas qui nous préoccupe plus précisément, c'est-à-dire les changements liés au climat, il apparaît important de répartir les risques en misant sur un nombre d'essences plus large. Les hypothèses avancées par De Jaegere et al. (2016) mettaient en avant les potentialités du tilleul à petites feuilles, longtemps considérée comme une essence d'accompagnement en Wallonie. Ces hypothèses semblent se vérifier aujourd'hui au travers des premiers résultats concrets obtenus. *Tilia cordata* apparaît de moins en moins corrélé (négativement) à la principale variable (somme des températures maximales de juin-juillet) expliquant sa relation « accroissement-climat ». L'augmentation de la fréquence des épisodes de fortes chaleurs et des sécheresses depuis le milieu des années 80 a certainement été compensé par des apports hydriques suffisants au sein des différentes stations. Le tilleul semble donc bien armé face aux changements climatiques et mérite amplement sa place dans nos peuplements wallons.

Il faut toutefois garder à l'esprit que la dendroécologie n'est en réalité qu'une partie de l'analyse. En Wallonie, aucune étude ne renseigne sur l'évaluation des dépérissements du tilleul à petite feuille ou de sa productivité. Toutefois, aucune défoliation ni faiblesse n'ont été observées tout au long de la phase de terrain.

## VII. Conclusion générale et perspectives

La présente étude permet de vérifier et mettre en avant les hypothèses avancées par De Jaegere et al. (2016) concernant les potentialités de cette essence. Sa réaction face aux changements climatiques récents est assez surprenante. D'une part, sa sensibilité moyenne n'a pas augmenté depuis 1950 et, d'autre part, la corrélation négative de son accroissement avec les températures estivales à tendance à s'atténuer ou du moins reste stable. L'année 1976 fut, comme pour l'ensemble de la forêt wallonne, la plus marquante pour l'accroissement du tilleul. Cependant, l'accroissement des années suivantes n'a pas été impacté pour la majorité des individus. La réserve en eau utile alimentée par les précipitations de mars à juillet semble jouer un rôle important dans la stratégie de survie du tilleul. Néanmoins, cette hypothèse doit encore être vérifiée ultérieurement par l'étude de la relation « cerne - réserve hydrique ». Une sylviculture plus attentive et favorisant la réimplantation de *T. cordata* pourrait mettre en évidence ses nombreux atouts en Wallonie. Les remarquables individus mélangés aux peuplements de Marche-les-Dames, Musson, Chimay, Honnelles ou encore de Dinant devraient d'ailleurs convaincre les plus sceptiques.

## VIII. Bibliographie

- Becker M., Nieminen T. M. et Gérémia F., 1994. Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France – the role of climate and atmospheric CO<sub>2</sub>. *Annals of Forest Science*. **51**(5), 477–492.
- Bunn A., 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*. **26**(2), 115-124. ISSN 1125-7865, doi: 10.1016/j.dendro.2008.01.002 (Page consultée le 30.05.17).
- Bunn A., 2010. Statistical and visual crossdating in R using the dplR library. *Dendrochronologia*. **28**(4), 251-258. ISSN 1125-7865, doi: 10.1016/j.dendro.2009.12.001 (Page consultée le 30.05.17).
- Bunn A., Korpela M., Biondi F., Campelo F., Mérian P, Qeadan F. et Zang C., 2017. *dplR: Dendrochronology Program Library in R. R package version 1.6.6.* [En ligne]. <https://CRAN.R-project.org/package=dplR> (Page consultée le 30.05.17).
- Cook E. R., 1985. *A time series analysis approach to tree ring standardization*. Doctoral thesis: The University of Arizona (USA).
- Cybis Elektronik et Data AB, 2013. *5. Decadal files*. [En ligne]. <http://www.cybis.se/forfun/dendro/cdendro5/index.htm> (Page consultée le 26.06.17).
- De Jaegere T., Hein S. et Claessens H., 2016. A Review of the Characteristics of Small-Leaved Lime (*Tilia cordata* Mill.) and Their Implications for Silviculture in a Changing Climate. *Forests*. **7**(3), 56; doi:10.3390/f7030056 (Page consultée le 14.05.17).
- Delahaye L., Claessens H., Losseau J., Cordier S., Herman M., Lisein J., Chandelier A. et Vincke C., 2016. Entre valorisation, conservation et dépérissement : la gestion de nos chênaies à la croisée des chemins. *Forêt.Nature*. **140**, 59-68.
- Delahaye L., Herman M., Claessens H., Chandelier A. et Marchal D., 2015. Note de référence pour la gestion du frêne dans le contexte de la crise liée à la chalarose. *Forêt.Nature*. **136**, 51-58.
- DGO3, 2017. *Le Nouveau Fichier Ecologique des Essences*. [En ligne]. <https://fichierecologique.be> (Page consultée le 15.07.17).
- Efron B. et Tibshirani R., 1986. Bootstrap Methods for Standard Errors, Confidence Intervals, and Other Measures of Statistical Accuracy. *Statistical science*. **1**(1), 54-77.
- FEPA : Federation of European Producers of Abrasives, 2017. *Abrasive grains*. [En ligne]. <https://www.fepa-abrasives.com/abrasive-products/grains> (Page consultée le 07.06.17).
- Foucault A. et Raoult J.F., 2010. Dictionnaire de géologie, 7e éd. Paris : Dunod. 388p.
- Foucault A., 2009. Climatologie et paléoclimatologie, 1ère éd. Paris : Dunod. XII-307p.
- Haylock M. R., Hofstra N., Klein Tank A. M. G., Klok E. J., Jones P. D. et New M., 2008. A European daily high resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for

1950–2006. *J. Geophys. Res.* **113**, D20119. doi:10.1029/2008JD010201 (Page consultée le 27.05.17).

Hemery E. G., Clark R. J., Aldinger E., Claessens H., Malvolti E. M., O'connor E., Raftoyannis Y., Savill S.P. et Brus R., 2010. Growing scattered broadleaved tree species in Europe in a changing climate: A review of risks and opportunities. *Forestry*. **83**, 65–81.

Huntley B. et Birks H. J. B., 1983. *An Atlas of Past and Present Pollen maps for Europe: 0–13000 BP*. 1<sup>ère</sup> éd. UK : Cambridge University Press. 667 p.

IPCC : International Panel on Climate Change, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [En ligne]. [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_wcover.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf) (Page consultée le 13.07.17).

IRM : Institut Royal Météorologique, 2017. *Atlas climatique*. [En ligne]. <https://www.meteo.be/meteo/view/fr/16788784-Atlas+Climatique.html> (Page consultée le 06.07.17).

Jozsa L., 1989. *Techniques d'échantillonnage des arbres à la tarière : pour le prélèvement de carottes de bonne qualité*. Publication spéciale N° SP-30. Corporation Forintek : Canada. 36 p.

Köcher P., Horna V., Beckmeyer I. et Leuschner C., 2012. Hydraulic properties and embolism in small-diameter roots of five temperate broad-leaved tree species with contrasting drought tolerance. *Ann. For. Sci.* **69**, 693–703.

Kulagin A.Y. et Shayakhmetov I.F., 2007. Natural under-canopy regeneration and height-age structure of small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.) undergrowth in water-conservation forests around Pavlovskoe Reservoir, Ufa River. *Russ. J. Ecol.* **38**, 247–252.

Langenbruch C., Helfrich M. et Flessa H., 2012. Effects of beech (*Fagus sylvatica*), ash (*Fraxinus excelsior*) and lime (*Tilia spec.*) on soil chemical properties in a mixed deciduous forest. *Plant Soil*. **352**, 389–403.

Larousse P., 2017. *Le petit Larousse illustré*. 2017 éd. France.

Latałowa M., Pedziszewska A., Maciejewska E. et Świeta-Musznicka J., 2013. Tilia forest dynamics, Kretzschmaria deusta attack, and mire hydrology as palaeoecological proxies for mid-Holocene climate reconstruction in the Kashubian Lake District (N Poland). *Holocene*. **23**, 667–677.

Latte N., 2017. *Comment le changement climatique influence-t-il la croissance du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) le long du gradient bioclimatique de la Belgique ? Une approche dendroécologique*. Thèse de doctorat : Université de Gembloux Agro Bio-Tech (Belgique).

Latte N., Debruxelles J., Sohier C., Degré A. et Claessens H., 2012. La dendroécologie : un outil pour affiner nos connaissances sur l'autoécologie des essences forestières. *Forêt Wallonne*. **116**, 3-17.

Latte N., Kint V., Drouet T., Penninckx V., Lebourgeois F., Vanwijsberghe S. et Claessens H., 2015(1). Dendroécologie du hêtre en forêt de Soignes. Les cernes des arbres nous renseignent sur les changements récents et futurs. *Forêt.Nature*. **137**, 24-37.

Latte N., Lebourgeois F. et Claessens H., 2015(2). Increased tree-growth synchronization of beech (*Fagus sylvatica* L.) in response to climate change in northwestern Europe. *Dendrochronologia*. **33**, 69-77.

Latte N., Lebourgeois F., Kint V., Drouet T. et Claessens H., 2017. Le hêtre face au changement climatique : Le cas de la Belgique. *Revue Forestière Française*. (En attente de parution).

Lawesson J. E. et Oksanen J., 2002. Niche characteristics of Danish woody species as derived from coenoclines. *J. Veg. Sci.* **13**, 279–290.

Le Cao K. A., Rohart F., Gonzalez I., Dejean S. et al., 2017. *mixOmics: Omics Data Integration Project. R package version 6.1.3*. [En ligne]. <https://CRAN.R-project.org/package=mixOmics> (Page consultée le 30.05.17).

Lebourgeois F. et Merian P., 2011, Consequences of decreasing the number of cored trees par plot on chronology statistics and climate-growth relationships : a multispecies analysis in a temperate climate. *Can. J. For. Res.* **41**, 2413-2422. doi:10.1139/X11-149 (Page consultée le 11.07.17).

Lebourgeois F. et Merian P., 2012. *Principes et méthodes de la dendrochronologie*. Nancy : AgroParisTech-ENGREF. 88 p.

Lindner M., Maroscheck M., Netherer S., Kremer A., Barbat A., Garcia-Gonzalo J., Seidl R., Delzon S., Corona P., Kolström M. et al., 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For. Ecol. Manag.* **259**, 698–709.

Manise T. et Vincke C., 2014. Impacts du climat et des déficits hydriques stationnels sur la croissance radiale du hêtre, du chêne, de l'épicéa et du douglas en Wallonie. *Forêt Wallonne*. **139**, 48-57.

Mayer H., 1992. *Waldbau auf Soziologisch-Ökologischer Grundlage*. 4<sup>ème</sup> éd. Fischer Verlag. Stuttgart : Germany. 522 p.

Mérian P. et Lebourgeois F., 2011. Size-mediated climate-growth relationships in temperate forests: A multi-species analysis. *Forest Ecology and Management*, **261**(8), 1382–1391.

Mérian P., 2012. *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*. Biologie végétale. AgroParisTech : France. [En ligne]. <https://tel.archives>-

ouvertes.fr/file/index/docid/764526/filename/vcompatible\_cines\_MERIAN.pdf (Page consultée le 07.07.17).

Neuwirth E., 2014. *RColorBrewer: ColorBrewer Palettes. R package version 1.1-2*. [En ligne]. <https://CRAN.R-project.org/package=RColorBrewer> (Page consultée le 30.05.17).

Pearson R. G. et Dawson T. P., 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology & Biogeography*. **12**, 361–371.

Pigott C. D. et Pigott S., 1993. Water as a determinant of the distribution of trees at the boundary of the Mediterranean zone. *J. Ecol.* **81**, 557–566.

Pigott C. D., 1982. Survival of mycorrhiza formed by *Cenococcum geophilum* Fr. in dry soils. *New Phytol.* **92**, 513–517.

Pigott C. D., 1991. *Tilia cordata* Miller Biological Flora of the British Isles. *J. Ecol.* **79**, 1147–1207.

Pigott C. D., 2012. *Lime-trees and Basswoods. A biological monograph of the Genus Tilia*. 1<sup>ère</sup> éd. UK : Cambridge University Press. 405 p.

Pigott C.D., 1989. Factors controlling the distribution of *Tilia cordata* Mill. at the northern limits of its geographical range. IV. Estimated ages of the trees. *New Phytol.* **112**, 117–121.

Radoglou K., Dobrowolska D., Spyroglou G. et Nicolescu V. N., 2009. A review on the ecology and silviculture of limes (*Tilia cordata* Mill., *Tilia platyphyllos* Scop. and *Tilia tomentosa* Moench.) in Europe. *Die BodenKult.* **60**, 9–20.

Rameau J. C., Mansion D. et Dumé G., 1989. *Flore Forestière Française. Guide écologique illustré. Plaines et collines*. Institut Développement Forestier. Paris : France. 667–671.

Regent Instruments Inc., 2002. Software WinDENDRO 2002. Quebec.

Sarkar D. et Andrews F., 2016. *latticeExtra: Extra Graphical Utilities Based on Lattice. R package version 0.6-28*. [En ligne]. <https://CRAN.R-project.org/package=latticeExtra> (Page consultée le 30.05.17).

Sarkar D., 2008. *lattice: Multivariate Data Visualization with R*. Springer. New York. ISBN 978-0-387-75968-5

Schmitz S., Charlier A., Delahaye L. et Chandelier A., 2016. La santé des jeunes plantations de douglas en Wallonie : un état des lieux. *Forêt.Nature*. **138**, 56-62.

SPW : Service Publique de Wallonie, 2015. Relief de la Wallonie - Modèle Numérique de Terrain (MNT) 2013-2014. [En ligne]. <http://geoportail.wallonie.be/catalogue/6029e738-f828-438b-b10a-85e67f77af92.html> (Page consultée le 06.07.17).

Svejgaard Jensen J., 2003. *EUFORGEN Technical Guidelines for Genetic Conservation and Use for Lime (Tilia spp.)*. International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italie, 6 pages.

The R Core Team, 2017. *The R Project for Statistical Computing*. [En ligne]. <https://www.r-project.org/> (Page consultée le 08.07.17).

Thompson R. et Clark R. M., 2006. Spatio-temporal modelling and assessment of within-species phenological variability using thermal time methods. *Int. J. Biometeorol.* **50**, 312–322.

Van der Perre R., Bythell S., Bogaert P., Claessens H., Ridremont F., Tricot C., Vincke C. et Ponette Q., 2015. La carte bioclimatique de Wallonie : un nouveau découpage écologique du territoire pour le choix des essences forestières. *Forêt.nature*. **135**, 47-58.

Walther G. R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T. J. C., Fromentin J. M., Hoegh-Guldberg O. et Bairlein F., 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature*. **416**, 389-395.

Weissen F. et al., 1991. *Le Fichier Ecologique des Essences (FEE) – Tome 2*. Namur : Belgique. 190 p.

Weissen F., Bronchart L., Piret A. et Lambert D., 1994. *Guide de boisement des stations forestières de Wallonie*. Namur : Belgique. 90 p.

Wickham H., 2007. Reshaping Data with the reshape Package. *Journal of Statistical Software*. **21**(12), 1-20. [En ligne]. <http://www.jstatsoft.org/v21/i12/> (Page consultée le 30.05.17).

Zeileis A. et Grothendieck G., 2005. zoo: S3 Infrastructure for Regular and Irregular Time Series. *Journal of Statistical Software*. **14**(6), 1-27. doi:10.18637/jss.v014.i06 (Page consultée le 30.05.17).

## IX. Annexes

### Annexe 1 : Fiche descriptive du tilleul à petites feuilles (DGO3, 2017)

**Tilleul à petites feuilles**

Kleinbladige Linde<sup>DE</sup>, Winterlinde<sup>NL</sup>, Small-leaved lime<sup>EN</sup>

*Tilia cordata* MILL.

1. Résumé

1.1 Atouts

- Bonne tolérance à la sécheresse, permettant la valorisation de milieux contrignants : sols superficiels et/ou très caillouteux, versants sud, etc.
- Enracinement très puissant, particulièrement adapté aux sols rocheux et aux éboulis. Très bon fixateur de sol, recommandé pour la protection des sols sur fortes pentes.
- Peu sensible aux facteurs climatiques en général : gelées, neige, givre, canicule, sécheresse, vent.
- Peu sensible à la compacité.
- Bonne essence d'accompagnement, et rôles positifs dans l'écosystème : gainage, fane de qualité, capacité de survie en sous-bois, enracinement favorable.
- Essence présentant un bon potentiel d'avenir dans le contexte des changements climatiques.

1.2 Limites

- Gamme de valorisation du bois restreinte (bois tendre, non durable).
- Essence peu adaptée aux stations très acides.
- Croissance ralentie pour les altitudes supérieures à 400 m, du fait d'un manque de chaleur en période estivale.
- Grande sensibilité aux dégâts de faune (principalement abrutissement et écorcement).

2 Distribution naturelle et ressources en Wallonie

2.1 Distribution naturelle

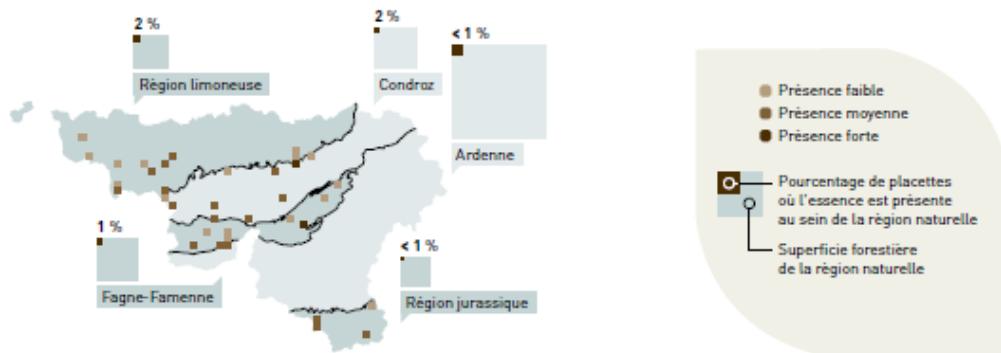
Essence indigène en Belgique. Distribution eurasiatique, à tendance continentale. L'espèce forme régulièrement des peuplements purs dans l'est de l'Europe, mais se présente de manière nettement plus disséminée à l'ouest.

Fichier écologique des essences 1

## 2. Distribution naturelle et ressources en Wallonie

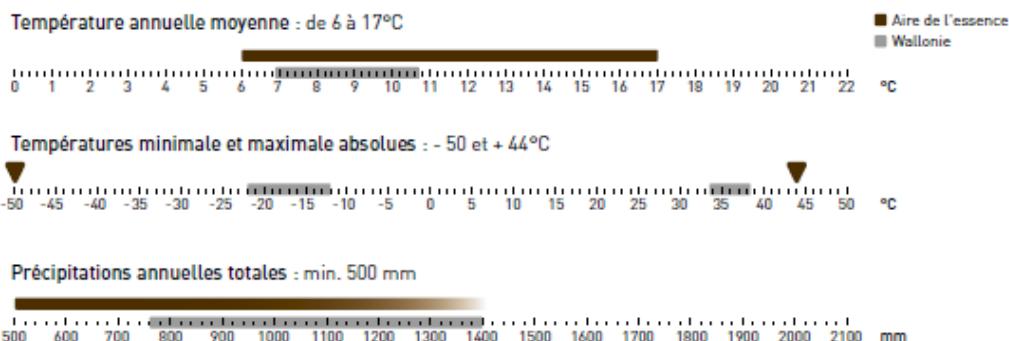
### 2.2 Distribution et ressources en forêt wallonne

Le genre *Tilia* (tilleuls à grandes feuilles et petites feuilles confondues) est présent sur moins de 1 % des surfaces forestières inventorierées de la forêt wallonne. Les espèces de ce genre se présentent de manière disséminée dans les peuplements, en mélange aux autres essences.



## 3 Facteurs bioclimatiques

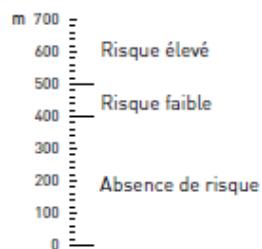
### 3.1 Compatibilité bioclimatique



### 3.2 Compatibilité altitudinale

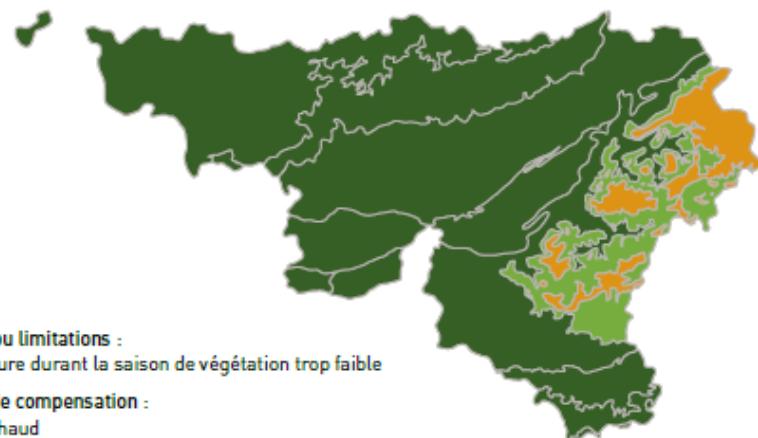
#### Altitude

Au-delà de 400 m (Moyenne Ardenne) l'espèce commence à souffrir d'un déficit de température estivale, ce qui a pour effet de compromettre la reproduction sexuée de l'essence.



## 3.3 Sensibilités climatiques particulières

Risques ou limitations :  
température durant la saison de végétation trop faible  
Facteur de compensation :  
secteur chaud



Facteur et stade	Sensibilité	Commentaire
<b>Gelée tardive</b>		
Juvénile	PS 😊	Le débourrement tardif réduit la sensibilité
Adulte	PS 😊	
<b>Gelée précoce</b>		
Juvénile	PS 😊	Le déclenchement précoce de la chute des feuilles et de la dormance réduisent la sensibilité
Adulte	PS 😊	
<b>Sécheresse</b>		
Juvénile	PS 😊	Grande résistance à la sécheresse. Faiblement affecté par de courtes périodes de sécheresse. Le tilleul régule sa transpiration.
Adulte	PS 😊	
<b>Canicule</b>		
Juvénile	PS 😊	Grande résistance au climat très chaud et sec
Adulte	PS 😊	
<b>Neige et givre</b>		
Juvénile	PS	Sensibilité des jeunes rejets de souche
Adulte	PS	
<b>Vent</b>		
Juvénile	PS	
Adulte	PS	

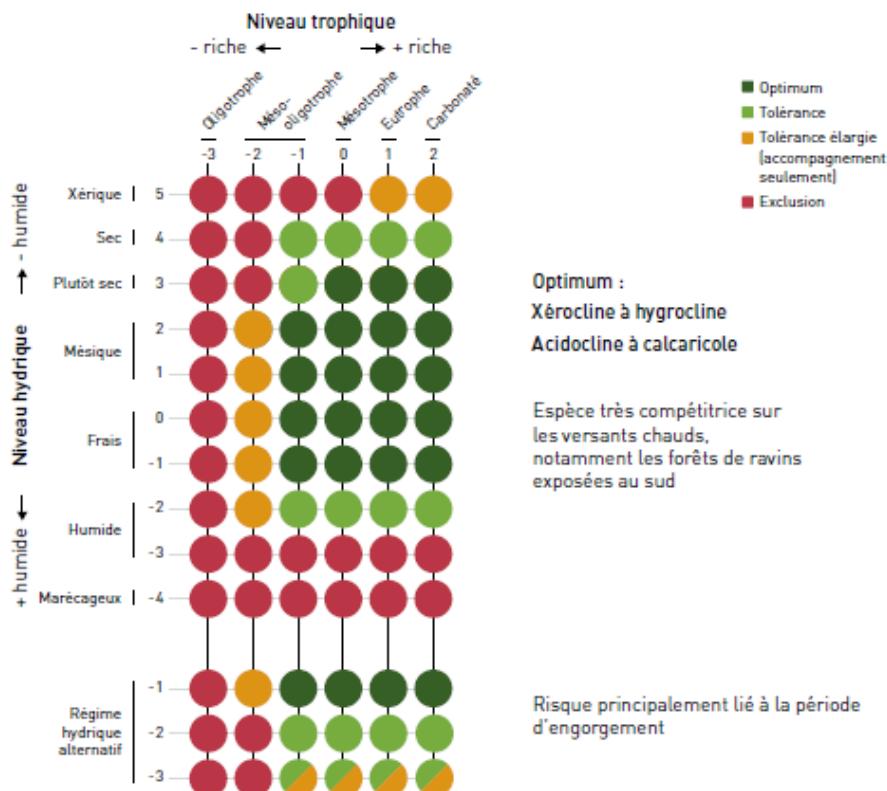
S : Sensible | TS : très sensible | PS : peu sensible

😊 : atout face aux changements climatiques .

#### 4. Définition de l'aptitude

## 4 Définition de l'aptitude

### 4.1 Écogramme d'aptitude



### 4.2 Contraintes édaphiques

#### Contraintes chimiques

Acidité : sensible

Sols carbonatisés : non sensible

Facteur de risque	NT	Facteur aggravant	Facteur atténuant	Diagnostic de terrain
● Sol oligotrophe ou podzolique pH < 3,8 ou profil g	-3		Aucun	Sondage pédologique
● Sol méso-oligotrophe ou à tendance podzolique pH [3,8 - 4,5] ou Profil f	-2	Faible volume de sol prospectable (sol peu profond, très caillouteux,etc.)	Sol plus riche en profondeur	

NT : niveau trophique

#### 4. Définition de l'aptitude

##### Contraintes hydriques

Engorgement (apport d'eau B ou C : fond de vallée, bas de versant, etc.) : sensible

Facteur de risque	NH	Facteur aggravant	Facteur atténuant	Diagnostic de terrain
● Sol tourbeux ou paratourbeux Texture V ou phase (v)	-4			Relevé floristique
Sol marécageux Drainage g		Aucun	Aucun	Régime hydrique effectif
Sol humide ● Drainage f,j	-3			
● Drainage e,h	-2	Précipitations élevées (Ardenne)	Hydromorphie non fonctionnelle  Sol meuble et/ou bien structuré	Tests de texture, de structure, et de compacité

TILLEUL À PETITES FEUILLES

Sol à régime hydrique alternatif (RHA) (apport d'eau A : plateau) : sensible 😕

Risque principalement lié à la période d'engorgement.

Facteur de risque	NH	Facteur aggravant	Facteur atténuant	Diagnostic de terrain
● Drainage i	-3 RHA	Précipitations élevées (Ardenne)	Ressuyage rapide au printemps  Sol bien structuré, principalement en contexte calcaire : marne, macigno, argile de décarbonatation, etc)	Régime hydrique effectif
● Drainage h	-2 RHA	« Argiles blanches »* (famille de sigles Gix et Ghx)  Apports d'eau locaux importants (microtopographie) : cuvette, zone de sources	Sol meuble  Hydromorphie non fonctionnelle  Sol limoneux profond	Contexte lithologique  Test de texture  Test de compacité  Test de structure (sols argileux)

(\* ) se référer à la fiche « Sols à argiles blanches », Typologie et aptitudes stationnelles (Timal et al. 2012).

Déficit hydrique : peu sensible 😊

Facteur de risque	NH	Facteur aggravant	Facteur atténuant	Diagnostic de terrain
● Sol très superficiel Phase 6	5		Aucun	
● Sol à drainage excessif Drainage a	5		Nappe d'eau en profondeur	Position topographique
● ● Sol peu profond à superficiel Phases 2*, 3, 4, 5	4-5	Précipitations faibles : hors Ardenne  Position topographique de pertes en eau  Versant chaud  Texture filtrante (Z, S, P)	Socle rocheux fissuré  Versant froid  Position topographique d'apports en eau  Précipitations élevées (Ardenne)  Contexte calcaire ou sol riche	Sondage pédologique profond
*uniquement si sols sableux (texture Z, S, P)	3-5			Test de compacité et de texture

NH : niveau hydrique

Fichier écologique des essences

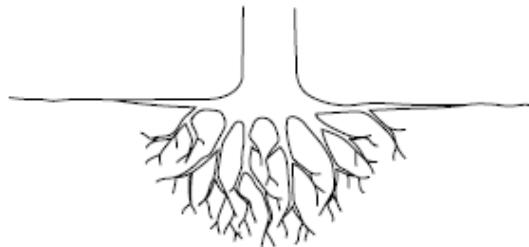
5

#### 4. Définition de l'aptitude

##### 4.3 Enracinement

###### Système racinaire potentiel

- Enracinement oblique (en coeur)
- Espèce à enracinement très puissant



###### Sensibilités aux contraintes édaphiques

- Anaérobiose : sensible mais tolère les sols à engorgement temporaire
- Compacité du sol : peu sensible

###### Bon à savoir:

L'espèce est capable de se maintenir sur des stations à très forte charge caillouteuse, avec présence d'éboulis, etc. (Tillaies de ravin).

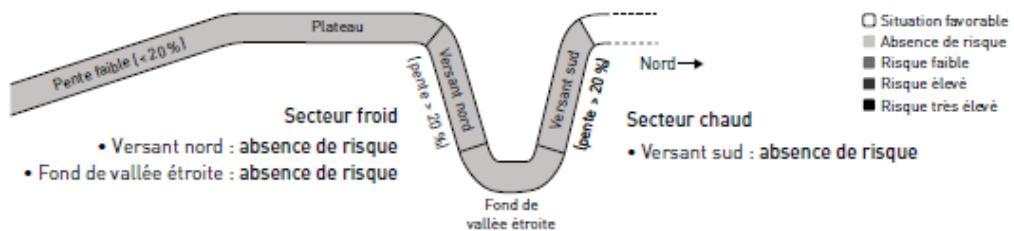
##### 4.4 Effets des microclimats topographiques

###### Topographie



###### Secteur neutre

- Plaines, plateaux et pentes faibles : absence de risque

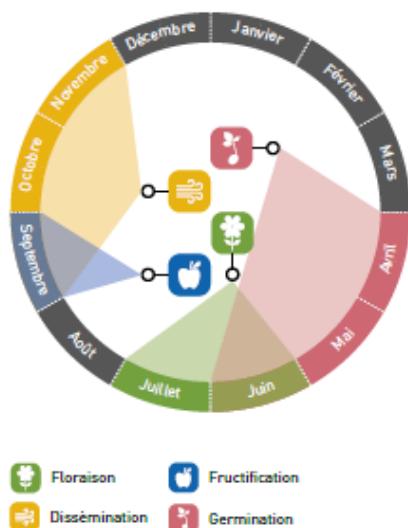


## 5 Aspects sylviculturaux

### 5.1 Phénologie et régénération

Période de foliation : Avril à octobre.

#### Régénération sexuée



Maturité sexuelle : 25 - 30 ans en peuplement, moins à l'état isolé.

Type de fleurs : hermaphrodites.

Localisation entre individus: monoïque.

Pollinisation : entomogamie.

Type de fruit : capsule avec 1 à 3 graines.

Fréquence des fructifications : 1 à 2 ans.

Mode de dissémination : anémochorie.

Les graines sont orthodoxes et elles ont une dormance très profonde et complexe. Cette dernière nécessite des phases chaudes et froides pour être levée. En conditions naturelles, les graines ne germeront qu'au deuxième printemps après la dispersion des graines. La germination difficile et la prédation rendent la régénération par graines assez aléatoire. En conditions artificielles, un traitement de près de 32 à 36 semaines (stratification chaude (20°C) puis froide (3°C) est nécessaire pour lever la dormance.

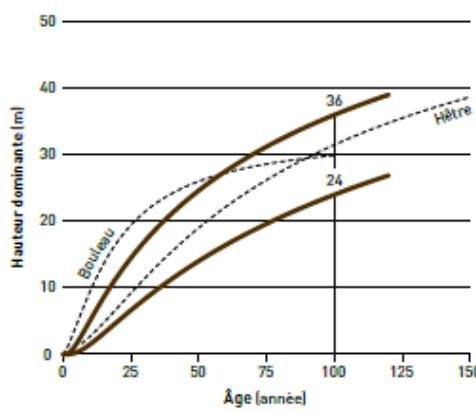
#### Régénération asexuée

En forêt, bien que le tilleul fructifie abondamment, il ne se régénère pas beaucoup par graines.

Par contre, il rejette vigoureusement de souche et la capacité à rejeter ne diminue pas avec l'âge.

Les branches en contact avec le sol peuvent marcotter. Le drageonnement peut être observé.

### 5.2 Croissance et productivité



Croissance : précoce, moyennement et soutenue.

Hauteur à maturité : environ 25 à 35 m.

Productivité (AMV) : 5 à 10 m<sup>3</sup>/ha/an vers 80 ans (productif).

Longévité : plus de 500 ans.

Exploitabilité : 60 - 80 ans  
(dimensions commerciales atteintes).

## 5. Aspects sylviculturaux

### 5.3 Tempérament (comportement vis-à-vis de la lumière)

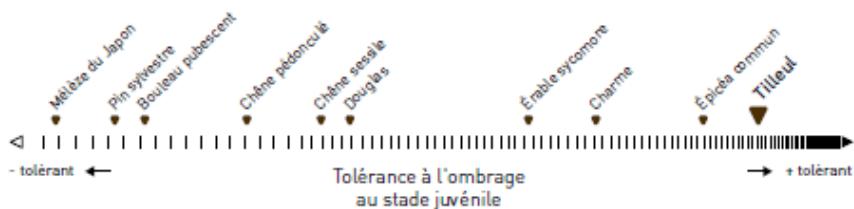
#### Tolérance à l'ombrage (survie et croissance)

##### Stade juvénile

Tolère l'ombrage. Supporte un éclairement faible mais réagit très bien à la mise en lumière en termes de croissance.

##### Stade adulte

Tolère l'ombrage. Supporte une mise en lumière brutale pour autant que le tronc soit protégé.



#### Réaction à la lumière (forme et qualité)

Niveau d'éclairement	Risque
Élevé	Absence de risque
Faible	Absence de risque
Mise en lumière brutale	Absence de risque

### 5.4 Précautions à l'installation

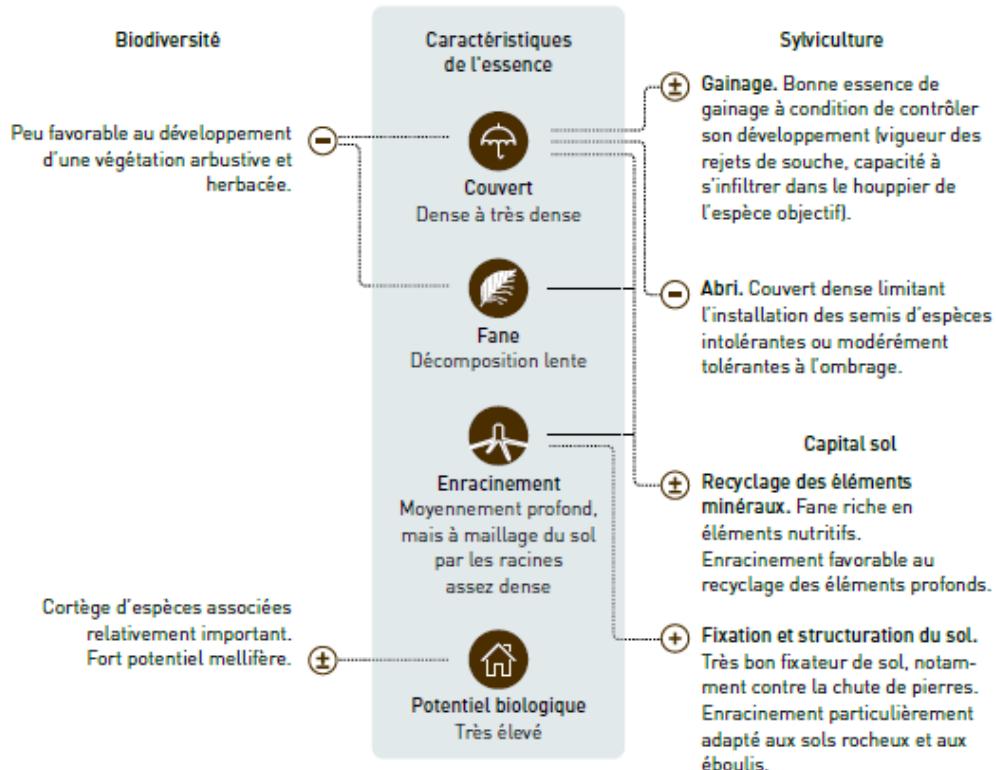
Le tilleul est particulièrement sensible à l'abrutissement et à l'écorcement par la faune sauvage.

#### Provenances recommandables

Se référer au dictionnaire des provenances recommandables publié par le Comptoir des graines forestières :  
Comptoir des graines forestières (DNF, DGARNE, SPW) • Z.I. d'Aye • Rue A. Feher 2 • B-6900 Marche-en-Famenne  
[environnement.wallonie.be/orvert](http://environnement.wallonie.be/orvert)



## 5.5 Impacts sylvicoles et écosystémiques



## 5.6 Principaux défauts de la grume et recommandations sylvicoles

Défaut	Cause probable	Recommandation
Méplat	Culture en taillis	Cultiver des individus francs de pied

## 6. Agents de dommages

### 6 Agents de dommages

#### 6.1 Sensibilité aux dégâts de la faune sauvage

Type de dégât	Attractivité	Commentaire
Abrouissement	Forte	Produit des rejets de souches
Écorcement	Forte	
Frotture	Moyenne	Les jeunes sujets affectés ont tendance à réagir en créant plusieurs tiges

#### 6.2 Ravageurs et agents pathogènes principaux

##### Pathogènes

###### La verticilliose (*Verticillium dahliae*)

**Site d'attaque :** rameaux (via outils de taille infectés) et racines (via spores dans le sol).

**Symptômes et dégâts :** flétrissement de jeunes plants ou de rameaux entiers ; en coupe transversale dans les rameaux, anneau noir au niveau des tissus conducteurs (maladie vasculaire).

**Conditions :** plants de pépinière infectés.

**Caractère :** primaire – surtout sur jeunes plants.

**Risque :** contamination du sol pour de nombreuses années, risque pour érables.

**Conséquence :** mortalité.

###### L'armillaire (pourridié racinaire) (*Armillaria spp.*)

**Site d'attaque :** racines.

**Symptômes et dégâts :** pourriture racinaire remontant dans la base du tronc, présence de palmettes blanches sous écorce, rhizomorphes, dépérissement, parfois carpophores au pied de l'arbre infecté (automne).

**Caractère :** primaire ou secondaire, fréquent.

**Risque :** propagation possible aux arbres voisins (selon espèce d'armillaire et vitalité du peuplement).

**Conséquence :** mortalité possible d'arbres adultes.

##### Insectes

###### Puceron du tilleul (*Eucalyphterus tiliae*)

**Site d'attaque :** feuilles.

**Symptômes et dégâts :** puceron jaune rayé de noir.

**Conditions :** souvent plus abondant en milieu urbain

**Caractère :** primaire, très fréquent.

**Risque :** individuel.

**Conséquences :** généralement sans impact majeur. En cas de pullulation extrême peut provoquer brunissement et chute précoce des feuilles.

*Eupulvinaria hydrangeae* et d'autres cochenilles ont pullulé à un moment sur tilleul en phase d'invasion et quelques autres essences mais principalement en milieu urbain et ces insectes ne pullulent plus du tout aujourd'hui et ne provoquent aucun dégât.

## 7 Valorisation potentielle du bois

Valorisation potentielle	Valeur	Commentaires et exemples
Structure		Peu rigide, faible résistance à la traction et au cisaillement
Utilisations extérieures		Peu durable.
Utilisations intérieures	✓	Très bonne aptitude au cintrage
Usages spécifiques		Recherché en lutherie et en sculpture. Jouets et petits objets (manches de pinceau, crayons). Très bon charbon de bois pour la confection des fusains. Écorce fibreuse, le tilleul n'est pas adapté à une utilisation de bois de papeterie

## 8 Atouts et faiblesses face aux changements climatiques

D'un point de vue abiotique, le tilleul à petites feuilles apparaît comme une essence bien armée pour faire face aux changements climatiques, son aire de culture potentielle étant susceptible de s'étendre.

Espèce à affinité continentale, elle est en effet naturellement adaptée aux périodes estivales chaudes et sèches. En Wallonie, le tilleul à petites feuilles souffre

d'ailleurs d'un manque de chaleur estivale pour les altitudes supérieures à 400 m.

L'espèce est très tolérante au manque d'eau, ce qui lui permet d'être très compétitive dans certains milieux contraignants pour d'autres espèces : versants sud, pentes fortes, sols superficiels, etc.

## 9 Références majeures

- Barengo, N., Rudow, A., Schwab, P., 2001. Projet favoriser les essences rares : Tilleul à petites feuilles (*Tilia cordata* Mill.) et Tilleul à grandes feuilles (*Tilia platyphyllos* Scop.). pp. 1-8.
- De Jaegere, T., Hein, S., Claessens, H., 2016. A Review of the Characteristics of Small-Leaved Lime (*Tilia cordata* Mill.) and Their Implications for Silviculture in a Changing Climate. *Forests* 7 (3), 56. URL <http://www.mdpi.com/1999-4907/7/3/56>
- Pigott, D., 2012. *Lime-trees and basswoods : a biological monograph of the genus *Tilia**. Cambridge University Press, New York. 405 p.

## Annexe 2 : Script d'analyse original – Rstudio

```
#####
##### TRAVAIL DE FIN D'ETUDES #####
##### Le tilleul, une essence d'avenir face aux changements climatiques ? #####
#####

rm(list=ls())
gc()
Sys.setenv(LANGUAGE='en')

#install.packages('reshape2')
#install.packages('lattice')
#install.packages('latticeExtra')
#install.packages('RColorBrewer')
#install.packages('dplR')
#install.packages('zoo')
#install.packages('mixOmics')
#____

require(reshape2)
require(lattice)
require(latticeExtra)

pourplot<-function(x){
  x<-as.data.frame(x)
  x$yr<-as.integer(rownames(x))
  x<-melt(x,"yr")
  x
}

# trellis.par.get()
require(RColorBrewer)
#line: col + lty + lwd
trellis.par.set(superpose.symbol = list(col = c(brewer.pal(9, "Set1"), "forestgreen")))
trellis.par.set(superpose.line = list(lty = 1:11))
trellis.par.set(superpose.line = list(lwd = c(1,2,2,2,2,2,1,2,1,2)))

#point: col + type
trellis.par.set(superpose.symbol = list(pch = 1:11))
trellis.par.set(superpose.line = list(col = c(brewer.pal(9, "Set1"), "forestgreen")))
#____

###récapitulatif échantillon
###work directory PC Fixe
recap<-read.csv2("F:\\OneDrive\\Gembloix\\TFE 2017\\R\\Data_TFE_Tilleul_2017.csv")
###work directory PC portable
#recap<-read.csv2("C:\\Users\\phili_000\\SkyDrive\\Gembloix\\TFE 2017\\R\\Data_TFE_Tilleul_2017.csv")
summary(recap)
##échantillon à ne pas tenir compte pour dendrochrono
no_ech<-recap$ID_ech[recap$Ech_OK != 1]
ok_ech<-recap$ID_ech[recap$Ech_OK == 1]
#____

#####
##### Importation de données dendrochrono #####
#####

require(dplR)
##dataframe vide
tm<-data.frame(year=1850:2016)

##extraction données des txt
###work directory PC Fixe
setwd("F:\\OneDrive\\Gembloix\\TFE 2017\\R\\Fichiers_Tucson")
###work directory PC portable
#setwd("C:\\Users\\phili_000\\SkyDrive\\Gembloix\\TFE 2017\\R\\Fichiers_Tucson")

nomfich<-list.files()
```

```

n<-nomfich[1]
#fichier par fichier
for (n in nomfich){
  print("_____")
  print(n)
  print("_____")
  dat<-read.rwl(n)
  #colonne par colonne
  c<-1
  for(c in 1:ncol(dat)){
    rr<-dat[c]
    rr<-na.omit(rr)
    print(paste0(" Series: ",names(rr)))
    yr<-as.integer(rownames(rr))
    #match year et yr
    wh<-match(yr,tm$year)
    #update tm
    tm[names(rr)]<-NA
    tm[wh,names(rr)]<-rr
  }
}
rownames(tm)<-tm$year
tm<-tm[-1]
tm<-tm[!apply(is.na(tm),1,all).]
names(tm)<-unlist(lapply(names(tm),function(x){
  x2<-x
  x3<-gsub("R","",x2)
  x4<-gsub("","",x3)
  # paste0(substr(x4,1,4),"-",substr(x4,5,7))
  paste0(substr(x4,1,4),"",toupper(substr(x4,5,7)))
}"))
summary(tm);print(names(tm))
#_____
#####
##### Age et diamètre #####
#####

dt<-data.frame(ech=names(tm),nbmes=apply(tm,2,function(x){length(x[!is.na(x)])}))
dt$misyrs<-NA
dt$age<-NA
for(i in 1:nrow(recap)){
  dt$age[dt$ech==as.character(recap$ID_ech[i])]<-dt$nbmes[dt$ech==as.character(recap$ID_ech[i])]+recap$Missed_years[i]
  dt$misyrs[dt$ech==as.character(recap$ID_ech[i])]<-recap$Missed_years[i]
}
dt$sumrw<-apply(tm,2,sum,na.rm=T)
dt$mismn<-NA
dt$radius<-NA
for(i in 1:nrow(recap)){
  rw<-tm[names(tm)== as.character(recap$ID_ech[i])]
  if(ncol(rw)>0){
    rw<-rw[,1]
    mn<-mean((rw[!is.na(rw)])[1:5])
    dt$mismn[dt$ech==as.character(recap$ID_ech[i])]<-mn
    dt$radius[dt$ech==as.character(recap$ID_ech[i])]<-recap$Missed_years[i]*mn+dt$sumrw[dt$ech==as.character(recap$ID_ech[i])]
  }
}
dt$diam<-dt$radius*2/10
dt$circ<-dt$radius*2*pi/10
head(dt)
summary(dt) # mismn = accroissement moy des 5 premiers cernes mesurés, appliqué aux nombres de cernes manquants pour avoir diam tot
#_____
##recap2 level ech
recap2<-merge(recap,dt,by.x="ID_ech",by.y="ech",all.x=T)
recap2$sitearb<-paste0(recap2$Abrev_site,"-",recap2$Num_arbre)
summary(recap2)

##recap3 level arbre
recap3<-aggregate(recap2,by=list(sitearb=recap2$sitearb),FUN=function(x){
  if(any(is.numeric(x))){mean(x,na.rm=T)}else{paste0(unique(x),collapse=".")}}

```

```

})
summary(recap3)

##recap4 level site
recap4<-aggregate(recap2,by=list(sitearb=recap2$Site),FUN=function(x){
  if(any(is.numeric(x))){mean(x,na.rm=T)}else{paste0(unique(x),collapse=". ")})
})
summary(recap4)
recap4b<-aggregate(recap2,by=list(sitearb=recap2$Site),FUN=function(x){
  if(any(is.numeric(x))){max(x,na.rm=T)}else{paste0(unique(x),collapse=". ")})
})
summary(recap4b)
#write.csv2(recap4,file='recap_sites.csv') ##ATTENTION : le fichier s'écrit dans le dossier tucson ==> Le déplacer avant de relancer le code !
#____

##plot age/diam level arbre
xyplot(circ~age,groups=Site,data=recap3,auto.key=list(points=T,column=3),xlab="Age",ylab="Circonférence")
histogram(~age,groups=Site,data=recap3,auto.key=F,breaks=seq(0,175,by=10),type      =      c("percent",      "count",
"density")[2],xlab="Age",ylab="Nombre d'individus")
histogram(~circ,groups=Site,data=recap3,auto.key=F,breaks=seq(0,250,by=20),type      =      c("percent",      "count",
"density")[2],xlab="Circonférence",ylab="Nombre d'individus")
#
#####
##### Dendrochrono premières analyses #####
#####

###echantillon à retirer car problème interdatation
tm<-tm[!names(tm) %in% no_ech]
##On retire les mesures des 5 premières années pour tous les échantillons
tm<-rbind(NA,tm)
tm<-apply(tm,2,function(x){
  wh<-max(which(is.na(x)))
  x[wh:(wh+5)]<-NA
  x
})
corr<-apply(tm,1,function(x){all(is.na(x)))}
tm<-as.data.frame(tm[!corr,])
#
##standardisation par la méthode "Spline"
tm2<-detrend(tm,method = "Spline",nyears=10)
#
##vecteurs pour faciliter le script
sit_tm<-unlist(lapply(names(tm),function(x) {substr(x,1,4)}))
arb_tm<-unlist(lapply(names(tm),function(x) {substr(x,5,6)}))
ech_tm<-unlist(lapply(names(tm),function(x) {substr(x,7,7)}))
sitarb_tm<-unlist(lapply(names(tm),function(x) {substr(x,1,6)}))

summary(tm)
head(tm)
#
#____

#Graphe chronologie moyenne (+ sample depth) niveau région
##RWI
plot(chron(tm),xlab="Année",ylab="Largeur de cerne (RWI)",main="")
##RI
plot(chron(tm2),xlab="Année",ylab="Indice de cerne (RI)",main="")
#
#____

#Graphe chronologie moyenne (+ sample depth) niveau site
##RWI
for (st in unique(sit_tm)){
  site<-unique(recap$Site[recap$Abrev_site == st])
  rr<-tm[sit_tm==st]
  rr<-rr[!apply(rr,1,function(x){all(is.na(x))}),]
  plot(chron(rr),main=site)
}
##RI
for (st in unique(sit_tm)){

```

```

site<-unique(recap$Site[recap$Abrev_site == st])
rr<-tm2[sit_tm==st]
rr<-rr[lapply(rr,1,function(x){all(is.na(x))}),]
plot(chron(rr),main=site,ylab='RI')
}
#
#####
##### Transformation des séries brutes au niveau site et site/arbre #####
#####

# Principe : Transformation des valeurs pour chaque combinaison éch/année
# en moyenne robuste de ces valeurs pour chaque combinaison site/année

trellis.par.set(superpose.line = list(lty = 1:1))
trellis.par.set(superpose.line = list(lwd = 1))

tms<-do.call(cbind,lapply(unique(sit_tm),function(x){
  rr<-tm[which(sit_tm==x)]
  chron(rr)[1]
}))
colnames(tms)<-unique(sit_tm)
tms[is.na(tms)]<-NA
#
xyplot(value~yr|variable,groups=variable,type="l",data=pourplot(tms),xlab="Année",ylab="Largeur de cerne (RWI)")
xyplot(value~yr,groups=variable,type="l",data=pourplot(tms),lwd=1,auto.key=list(points=F,lines=T,column=3),xlab="Année",ylab="Indice de cerne (RI)")

#####Idem mais àpd séries standardisées
tms2<-do.call(cbind,lapply(unique(sit_tm),function(x){
  rr<-tm[which(sit_tm==x)]
  rr<-detrend(rr,method = c("Spline"),nyrs=10)
  chron(rr)[1]
}))
colnames(tms2)<-unique(sit_tm)
tms2[is.na(tms2)]<-NA
#
xyplot(value~yr|variable,groups=variable,type="l",data=pourplot(tms2),xlab="Année",ylab="Largeur de cerne (RWI)")
xyplot(value~yr,groups=variable,type="l",data=pourplot(tms2),auto.key=list(points=F,lines=T,column=3),xlab="Année",ylab="Indice de cerne (RI)")
#
####Transformation des séries brutes au niveau site/arbre
tmsa<-do.call(cbind,lapply(unique(sitarb_tm),function(x){
  rr<-tm[which(sitarb_tm==x)]
  chron(rr)[1]
}))
colnames(tmsa)<-unique(sitarb_tm)
tmsa[is.na(tmsa)]<-NA
#xyplot(value~yr|variable,type="l",data=pourplot(tmsa))

#####Idem mais àpd séries standardisées
tmsa2<-do.call(cbind,lapply(unique(sitarb_tm),function(x){
  rr<-tm[which(sitarb_tm==x)]
  rr<-detrend(rr,method = c("Spline"),nyrs=10)
  chron(rr)[1]
}))
colnames(tmsa2)<-unique(sitarb_tm)
tmsa2[is.na(tmsa2)]<-NA
#xyplot(value~yr|variable,type="l",data=pourplot(tmsa2))
trellis.par.set(superpose.line = list(lwd = c(1,2,2,2,2,1,2,1,2)))
#
#####
##### Création des courbes maitresses région #####
#####

### à partir de TMSA pour donner plus de poids au site ayant davantage d'arbres échantillonnés
tmr<-chron(tmsa, prefix = "tm", biweight = TRUE)[1]
plot(tmr,xlab="Année",ylab="Largeur de cerne (RWI)",ylim=c(1,3),xlim=c(1945,2016))
tmr2<-chron(tmsa2, prefix = "tm2", biweight = TRUE)[1]

```

```

plot(tmr2,xlab="Année",ylab="Indice de cerne (RI)",xlim=c(1945,2016))
#_____
#####Création référence (convertir dans notepad++ end of line (sauts de ligne) : "CR" => "CR+LF")
#####work directory PC fixe
setwd("F:\\OneDrive\\Gembloix\\TFE 2017\\R\\")
#####work directory PC portable
#setwd("C:\\Users\\phili_000\\SkyDrive\\Gembloix\\TFE 2017\\R\\")
##niveau région
write.tucson(tmr, fname = paste("tmr_ref.txt",sep=""), header=NULL, append=FALSE, prec=0.001, mapping.fname="", mapping.append=FALSE, long.names=FALSE)
##niveau site
for (st in unique(sit_tm)){
  write.tucson(tms[names(tms) == st], fname = paste(st,"_tms_ref.txt",sep=""), header=NULL, append=FALSE, prec=0.001, mapping.fname="", mapping.append=FALSE, long.names=FALSE)
}
#_____
#####
##### Vérification interdatation #####
#####

####(pcrit max 0.1!)
#####=> modifier les fichiers TUCSON de base si nécessaire et relancer le code!
##Diagramme pour toute la RW : Ylab trop nombreux --> Illisible --> corr.rwl.seg(tm2,seg.length = 30, bin.floor = 0,pcrit = 0.1)
##site par site
for (st in unique(sit_tm)){
  #comparaison moyenne
  corr.rwl.seg(tm2[sit_tm == st],seg.length = 30, bin.floor = 0,pcrit = 0.1,main=st)
  #comparaison à la série région
  corr.rwl.seg(tm2[sit_tm == st],seg.length = 30, bin.floor = 0,pcrit = 0.1,main=paste0(st,"_2"),master=tmr2[1],master.yrs=as.integer(rownames(tmr2)))
}
#_____
#####
##### Basse et haute fréquence #####
#####

### rw = BF + MF + HF
### RWI = rw / (BF+MF)

####(nyrs = 40, 10)
plot(y=tmr[,1],x=as.integer(rownames(tmr)),type="l",ylim=c(1,3),xlim=c(1945,2016),xlab="Année",ylab="Largeur (RWI)",main="Courbe maîtresse régionale")
mf_tm<-ffcsaps(y=tmr[,1],x=as.integer(rownames(tmr)),nyrs=c(40,10)[1])
lines(y=mf_tm,x=as.integer(rownames(tmr)),col='blue')
mf_tm<-ffcsaps(y=tmr[,1],x=as.integer(rownames(tmr)),nyrs=c(40,10)[2])
lines(y=mf_tm,x=as.integer(rownames(tmr)),col='red')

rw<-tmr[,1]
mf_tm_a<-ffcsaps(y=tmr[,1],x=as.integer(rownames(tmr)),nyrs=c(40,10)[1])#basse fréquence
plot(y=mf_tm_a,x=as.integer(rownames(tmr)),type="l",ylab="RWI",xlab="Année",main="Basse fréquence",ylim=c(1.5,3),xlim=c(1945,2016),col="blue")
mf_tm_b<-ffcsaps(y=tmr[,1],x=as.integer(rownames(tmr)),nyrs=c(40,10)[2])#basse + moyenne
plot(y=mf_tm_b,x=as.integer(rownames(tmr)),type="l",ylab="RWI",xlab="Année",main="Basse fréquences",ylim=c(1.5,3),xlim=c(1945,2016),col="red")
rr2<-mf_tm_b-mf_tm_a
plot(y=rr2,x=as.integer(rownames(tmr)),type="l",ylab="RWI",xlab="Année",main="Moyenne fréquence",ylim=c(-0.6,0.6),xlim=c(1945,2016),col="orange")#moyenne fréquence
rr<-rw-mf_tm_b
plot(y=rr,x=as.integer(rownames(tmr)),type="l",ylab="RWI",xlab="Année",main="Haute fréquence",ylim=c(-1,0.6),xlim=c(1945,2016),col="purple")#haute fréquence
rr3<-mf_tm_a+rr2+rr
plot(y=rr3,x=as.integer(rownames(tmr)),type="l",ylab="RWI",xlab="Année",main="Somme des hautes, moyennes et basses fréquences",ylim=c(1,3),xlim=c(1945,2016))#BF+MF+HF
plot(y=rw,x=as.integer(rownames(tmr)),type="l",ylab="RWI",xlab="Année",main="Courbe régionale",ylim=c(1,3),xlim=c(1945,2016))#RWI
rr4<-rw/mf_tm_b
plot(y=rr4,x=as.integer(rownames(tmr)),type="l",ylab="RI",xlab="Année",main="Indice de cerne (RI)",ylim=c(0.5,1.5),xlim=c(1945,2016))#RI

```

```

rr<-apply(tms,2,function(x){
# print(x)
whna<-which(is.na(x))
rr<-ffcsaps(y=x[!is.na(x)],nrys=c(40,10)[1])
c(rep(NA,length(whna)),rr)
})
names(rr)<-names(tms)
rownames(rr)<-rownames(tms)
rr2<-pourplot(rr)
rr3<-merge(rr2,recap4b,by.x="variable",by.y="Abrev_site",all.x=T)

rr3$aage<-apply(rr3[c("age","yr")],1,function(x){
#printf((x["yr"]-2016))
round(x["age"]+(x["yr"]-2016),0)
})

trellis.par.set(superpose.line = list(lwd = 2))
a<-xyplot(value~aage,groups=variable,data=rr3,type="l",auto.key= list(lines=T,points=F,rectangles=F,columns=3),panel=function(...){
  panel.abline(v=c(0),lty=2)
  panel.xyplot(...)
},ylab="Largeur de cerne (RWI)",xlab="Age moyen",main="",xlim=c(0,160))
print(a)
trellis.par.set(superpose.line = list(lwd = c(1,2,2,2,2,2,1,2,1,2)))

# _____
#####
##### Calcul statistiques rwl et rwi #####
#####

##rwl
gen<-rwl.stats(tmsa)
gen
rwl<-rwl.stats(tms)
rwl
#write.csv2(rwl,file='rwl_sit.csv')
# _____
##rwi par site
x<-"Chim"
rwi<-do.call(rbind,lapply(unique(sit_tm),function(x){
  arb_tmb<-arb_tm[sit_tm == x]
  ech_tmb<-ech_tm[sit_tm == x]
  tm2b<-tm2[sit_tm == x]
  id_tm<-data.frame(tree=as.integer(as.factor(arb_tmb)),core=as.integer(as.factor(ech_tmb)))
  data.frame(site=x,rwi.stats(tm2b,ids=id_tm))
}))
print(rwi)
#write.csv2(rwi,file='rwi_sit.csv')
# _____
##Exemple de graphiques plus complexes

trellis.par.set(superpose.line = list(lty = 1:11))

xyplot(value~yr,groups=variable,data=pourplot(tms2),type="b",panel=function(...){
  panel.xyplot(...,lty=2)
  #panel.smoother(...,form = y ~ x,se=T,span=0.1)
  panel.average(...,horizontal=F,lwd=2,lty=1,col="black")
},ylab="Indice de cerne (RI)",xlab="Année",main="",auto.key=list(points=T,lines=T,column=3))

xyplot(value~yr,groups=variable,data=pourplot(tms2),type="b",xlim=c(1945,2016),panel=function(...){
  panel.xyplot(...,lty=2)
  #panel.smoother(...,form = y ~ x,se=T,span=0.1)
  panel.average(...,horizontal=F,lwd=2,lty=1,col="black")
},ylab="Indice de cerne (RI)",xlab="Année",main="",auto.key=list(points=T,lines=T,column=3))
# _____
#####
##### Calcul statistiques rwl et rwi #####
#####

```

```

#####
##### Calcul sensibilité moyenne #####
#####

##au départ maitresse indice de cerne entre X et Y

X<-1986
Y<-2016
chx<-tms2 #choix du data frame
apply(chx[as.integer(rownames(chx))%in% X:Y],2,sens1)

##sens1 mobile (fenêtre de 30 ans) par site

require(zoo)
sens1<-apply(tms2,2,function(x){rollapply(x,width=30,FUN=sens1)})
sens1[is.nan(sens1)]<-NA
sens1<-rbind(NA,sens1)
sens1<-apply(sens1,2,function(x){
  wh<-max(which(is.na(x)))
  x[wh:(wh+15)]<-NA
  x
})
sens1<-sens1[-1,]
yr<-rollapply(as.matrix(as.integer(rownames(tms2)))+0.5,width=30,FUN=mean)[,1]
rownames(sens1)<-yr

#graph avec légende par site

trellis.par.set(superpose.line = list(lty = 1:1))
trellis.par.set(superpose.line = list(lwd = c(1,2,2,2,2,1,2,1,2)))

a<-
xyplot(sens1~yr,groups=variable,data=pourplot(sens1),type="b",auto.key=list(lines=T,points=T,rectangles=F,columns=3),panel=function...
{
  panel.abline(v=c(1976,1996),lty=2)
  panel.xyplot(...)
  # panel.smoother(...,form = y ~ x,se=F,span=0.1,lwd=3,col="black",lty=2)
  panel.average(...,fun=function(x){mean(x,na.rm=T)},horizontal=F,lwd=2,lty=2,col="black")
  panel.average(...,fun=function(x){mean(x,na.rm=F)},horizontal=F,lwd=3,lty=1,col="black")
},ylab="Sensibilité moyenne",xlab="Année centrale (période de 30 ans)",main="",ylim=c(0.05,0.4),xlim=c(1950,2003))
print(a)
# _____
#####

#####
##### Accroissement-climat N.L. #####
#####

####Perspectives --> ETP : Droogers and Allen (2002) Droogers P., Allen R. G., 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate
data conditions. Irrigation and Drainage Systems 16: 33-45.

## Données climatiques

####Work directory PC Fixe
clim<-read.table("F:\\OneDrive\\Gembloux\\TFE 2017\\R\\climyear.csv",dec=". ",sep=";",header=T)
####Work directory PC Portable
#clim<-read.table("C:\\Users\\phili_000\\SkyDrive\\Gembloux\\TFE 2017\\R\\climyear.csv",dec=". ",sep=";",header=T)

#standardisation (moyenne = 0 et écart-type = 1)
climstd<-clim
climstd[!names(climstd) %in% c("Site","Year")]<-scale(climstd[!names(climstd) %in% c("Site","Year")], center = TRUE, scale = TRUE)

#effet année n-1
rr<-climstd[!names(climstd) %in% c("Site","Year")]
rr<-rr[,nrow(rr),];rr<-rbind(rep(NA,ncol(rr)),rr)
names(rr)<-paste0(names(rr),"n-1")
climstd<-cbind(climstd,rr)#soit toutes les données années n et n-1
# write.csv2(climstd,file="Clim_n_et_n-1.csv") #ATTENTION : Fichier CSV très lourd (75,747 Mo) mais utile pour COMPRENDRE la
transformation !!!
# climstd<-cbind(climstd[names(climstd) %in% c("Site","Year")],rr) #soit que années n-1
##subset variables? _m_m2

chx<-expand.grid(paste0("_",4:10,"_"),0:4)

```

```

chx<-paste0(chx[,1],chx[,2])
climstd2<-climstd[unlist(lapply(chx,function(x){grep(x,names(climstd))}))]
climstd<-cbind(climstd[c("Site","Year")],climstd2)

# write.csv2(climstd,file="Climstd_finale.csv") #ATTENTION : Fichier CSV lourd (31,571 Mo) mais utile pour COMPRENDRE la transformation
!!!
#_____
## PLS climat pour mettre en évidence les meilleures variables

require(mixOmics)
thresyr<-1952
y<-pourplot(tms2);y<-y[y$yr >= thresyr,]
x<-climstd[climstd$Site %in% unique(y$variable),]; x<-x[x$Year >= thresyr, ]
yx<-merge(x,y,by.x=c("Site","Year"),by.y=c("variable","yr"))
yx$Site<-factor(yx$Site,levels=unique(yx$Site))
# yx<-yx[yx$Site == "Chim",]
#attention comp=2 ou plus ici n'a pas vraiment de sens
X<-as.matrix(yx[,!names(yx) %in% c("Site","Year","value")])
Y<-as.matrix(yx[, "value"])
splsn<-spls(X,Y,ncomp=1,mode = c("regression","canonical")[1])
splsn$vip<-as.matrix(rowMeans(vip(splsn)))
vip2<-splsn$vip[order(splsn$vip[,1],decreasing=TRUE),1]
var2<-names(vip2)[vip2>=2]
print(var2)
cor(yx[,var2],yx[, "value"],method=c("pearson","spearman")[1],use="complete.obs")

##inter-cor
rr<-na.omit(climstd[c("tx_UpQt95_sum_7_1","rr_mean_7_4","tx_UpQt95_sum_8_0n-1")])
corr_int<-cor(rr)
corr_int
write.csv2(corr_int,file="Corr_int_var.csv")
#_____
## Mobile bootstrap corrélation

bcfmoi2<-function (g, p, sb=FALSE, vnames=NULL, ci = 0.05,nbboot=100)
{
  if(class(g)=="data.frame"){g<-g[,1]}
  down<-trunc(quantile(1:nbboot,ci))
  up<-round(quantile(1:nbboot,1-ci))

  if(class(p)=="numeric"){
    p<-as.data.frame(p)
  }

  n <- length(g)
  m <- dim(p)[2]

  param.matrix <- matrix(NA, nrow = m, ncol = nbboot)

  if (sb) {
    pb <- txtProgressBar(min = 1, max = nbboot, style = 3)
  }

  for (i in 1:nbboot) {
    boot.sample <- sample(1:n, n, replace = TRUE)
    boot.g <- g[boot.sample]
    boot.p <- as.data.frame(p[boot.sample, ])
    boot.g <- (boot.g - mean(boot.g))/sd(boot.g)
    if(sd(boot.p[,1])!=0){
      boot.p <- apply(boot.p, 2, function(x) {
        (x - mean(x))/sd(x)
      })
    } else {

      out <- data.frame(coef = 0, significant = FALSE,
                        ci.lower = 0, ci.upper = 0)
      rownames(out) <- colnames(p)
    }
  }
}

```

```

    return(out)
}
for (j in 1:m) {
  param.matrix[j, i] <- qr.solve(boot.p[, j], boot.g)
}
if (sb)
  setTxtProgressBar(pb, i)
}

bcf.coef <- apply(param.matrix, 1, median)

ci.lower <- apply(param.matrix, 1, function(x) {
  sort(x)[down]
})
ci.upper <- apply(param.matrix, 1, function(x) {
  sort(x)[up]
})

is.sig <- logical(m)
for (i in 1:m) {
  if (sign(ci.upper[i]) != sign(ci.lower[i])) {
    is.sig[i] <- FALSE
  }
  else {
    if (abs(bcf.coef[i]) > abs((abs(ci.upper[i]) - abs(ci.lower[i]))/2)) {
      is.sig[i] <- TRUE
    }
    else {
      is.sig[i] <- FALSE
    }
  }
}
out <- data.frame(coef = bcf.coef, significant = is.sig,
                  ci.lower = ci.lower, ci.upper = ci.upper)
rownames(out) <- colnames(p)
if (sb)
  close(pb)
attributes(out)$npar <- attributes(p)$npar
attributes(out)$vnames <- vnames
out
}

#####
##### Choix taille fenêtre mobile (années)
chx_win<-30
#####
##### BESTVAR_1 = tx_UpQt95_sum_7_1

bestvar<-var2[1]
#bestvar<-"tx_UpQt95_sum_7_1"
#bestvar<-"rr_mean_7_4"
#bestvar<-"tx_UpQt95_sum_8_On-1"
boot<-1000 #1000
bs<-do.call(rbind,lapply(unique(yx$Site),function(st){
  yxb<-subset(yx,Site==st)
  bs<-as.data.frame(rollapply(1:nrow(yxb),chx_win,function(z){
    # N<-length(z)
    # R<-1000
    # cor.orig<-cor(Xb,Yb)
    # cor.boot<-NULL
    # for (i in 1:R) {
    #   idx <- sample.int(N, N, replace = TRUE)
    #   cor.boot[i]<-cor(Xb[idx],Yb[idx])
    # }
    # c(cor.orig,quantile(cor.boot, c(0.025, 0.975)))
    an<-yxb[z,"Year"]
    rr<-bcfmoi2(yxb[z,"value"],yxb[z,bestvar],nbboot=boot)[1,]
    rr$minan<-min(an);rr$maxan<-max(an)
    rr
  }))
  bs$Site<-st
})

```

```

bs
})))
bs<-bs[!bs$coef==0,]
print(bs)
#_____
#graph avec légende
trellis.par.set(superpose.line = list(lty = 1:1))
trellis.par.set(superpose.line = list(lwd = c(1,2,2,2,2,1,2,1,2)))

bs$period<-as.factor(paste0(bs$minan, "-", bs$maxan))
bs$center<-round(bs$minan+15)
a<-xyplot(coef~center,groups=Site,data=bs,type="l",auto.key=list(lines=T,points=F,rectangles=F,columns=3),panel=function(...){
  panel.xyplot(...)
  panel.average(...,horizontal=F,lwd=3,lty=2,col="black")
},ylab=paste0("Corrélation - ",bestvar),xlab="Année centrale (période de 30 ans)",main="")
bsb<-subset(bs,significant==1)
b<-xyplot(coef~center,groups=Site,data=bsb,type="p",auto.key=list(lines=T,points=F,rectangles=F,columns=3),panel=function(...){
  panel.xyplot(...)
},ylab=paste0("Corrélation - ",bestvar),xlab="Année centrale (période de 30 ans)",main="")
print(a+b)
#_____
##### BESTVAR_2 = rr_mean_7_4

#bestvar<-var2[1]
#bestvar<-"tx_UpQt95_sum_7_1"
bestvar<"rr_mean_7_4"
#bestvar<-"tx_UpQt95_sum_8_0n-1"
boot<-1000 #1000
bs<-do.call(rbind,lapply(unique(yx$Site),function(st){
  yxb<-subset(yx,Site==st)
  bs<-as.data.frame(rollapply(1:nrow(yxb),chx_win,function(z){
    # N<-length(z)
    # R<1000
    # cor.orig<-cor(Xb,Yb)
    # cor.boot<-NULL
    # for (i in 1:R) {
    #   idx <- sample.int(N, N, replace = TRUE)
    #   cor.boot[i]<-cor(Xb[idx],Yb[idx])
    # }
    # c(cor.orig,quantile(cor.boot, c(0.025, 0.975)))
    an<-yxb[z,"Year"]
    rr<-bcfmoi2(yxb[z,"value"],yxb[z,bestvar],nbboot=boot)[1,]
    rr$minan<-min(an);rr$maxan<-max(an)
    rr
  })))
  bs$Site<-st
  bs
}))
bs<-bs[!bs$coef==0,]
print(bs)
#_____
#graph avec légende
trellis.par.set(superpose.line = list(lty = 1:1))
trellis.par.set(superpose.line = list(lwd = c(1,2,2,2,2,1,2,1,2)))

bs$period<-as.factor(paste0(bs$minan, "-", bs$maxan))
bs$center<-round(bs$minan+15)
a<-xyplot(coef~center,groups=Site,data=bs,type="l",auto.key=list(lines=T,points=F,rectangles=F,columns=3),panel=function(...){
  panel.xyplot(...)
  panel.average(...,horizontal=F,lwd=3,lty=2,col="black")
},ylab=paste0("Corrélation - ",bestvar),xlab="Année centrale (période de 30 ans)",main="")
bsb<-subset(bs,significant==1)
b<-xyplot(coef~center,groups=Site,data=bsb,type="p",auto.key=list(lines=T,points=F,rectangles=F,columns=3),panel=function(...){
  panel.xyplot(...)
},ylab=paste0("Corrélation - ",bestvar),xlab="Année centrale (période de 30 ans)",main="")
print(a+b)
#_____

```

```

#####
##### BESTVAR_3 = tx_UpQt95_sum_8_0n-1

#bestvar<-var2[1]
#bestvar<-"tx_UpQt95_sum_7_1"
#bestvar<-"rr_mean_7_4"
bestvar<-"tx_UpQt95_sum_8_0n-1"
boot<-1000 #1000
bs<-do.call(rbind,lapply(unique(yx$Site),function(st){
  yxb<-subset(yx,Site==st)
  bs<-as.data.frame(rollapply(1:nrow(yxb),chx_win,function(z){
    # N<-length(z)
    # R<-1000
    # cor.orig<-cor(Xb,Yb)
    # cor.boot<-NULL
    # for (i in 1:R) {
    #   idx <- sample.int(N, N, replace = TRUE)
    #   cor.boot[i]<-cor(Xb[idx],Yb[idx])
    # }
    # c(cor.orig,quantile(cor.boot, c(0.025, 0.975)))
    an<-yxb[z,"Year"]
    rr<-bcfmoi2(yxb[z,"value"],yxb[z,bestvar],nbboot=boot)[1,]
    rr$minan<-min(an);rr$maxan<-max(an)
    rr
  }))
  bs$Site<-st
  bs
}))
bs<-bs[!bs$coef==0]
print(bs)
#_____
#graph avec légende
trellis.par.set(superpose.line = list(lty = 1:1))
trellis.par.set(superpose.line = list(lwd = c(1,2,2,2,2,1,2,1,2)))
bs$period<-as.factor(paste0(bs$minan,"-",bs$maxan))
bs$center<-round(bs$minan+15)
a<-xyplot(coef~center,groups=Site,data=bs,type="l",auto.key=list(lines=T,points=F,rectangles=F,columns=3),panel=function(...){
  panel.xyplot(...)
  panel.average(...,horizontal=F,lwd=3,lty=2,col="black")
},ylab=paste0("Corrélation - ",bestvar),xlab="Année centrale (période de 30 ans)",main="")
bsb<-subset(bs,significant==1)
b<-xyplot(coef~center,groups=Site,data=bsb,type="p",auto.key=list(lines=T,points=F,rectangles=F,columns=3),panel=function(...){
  panel.xyplot(...)
},ylab=paste0("Corrélation - ",bestvar),xlab="Année centrale (période de 30 ans)",main="")
print(a+b)
#_____
#####
##### Années caractéristiques du tilleul à petites feuilles #####
#####

rr<-pointer(tmsa, rgv.thresh = 25, nseries.thresh = 50) #25 50
AC<-rr$Nature
names(AC)<-rr$Year
print(AC)
xyplot(AC~rr$Year)
write.csv2(AC,file="AC_tilleul.csv")
read.csv2("AC_tilleul.csv")
#_____
#####
##### _____ The End _____ #####
#####

```

### Annexe 3 : Chronologies moyennes et les indices de cerne moyens par site

