Le Hêtre face au changement climatique : le cas de la Belgique

Nicolas Latte[*] – François Lebourgeois[**] – Vincent Kint[***] – Thomas Drouet[****] – Hugues Claessens[*]

CONTEXTE DE LA RECHERCHE

Présent sur plus de 12 millions d'hectares, le Hêtre (*Fagus sylvatica* L.) est l'une des principales essences feuillues d'Europe moyenne. On le retrouve sous des climats variés (figure 1, p. 206) aussi bien en montagne (principalement dans la moitié sud de son aire) qu'en plaine (dans la moitié nord de son aire), pour autant que ses principales exigences écologiques soient satisfaites : un approvisionnement en eau bien réparti au cours de la saison de végétation, sans excès ni déficit, ainsi qu'une humidité de l'air élevée (Armand, 2002). Dans ces conditions, il constitue le fond floristique des forêts médio-européennes et submontagnardes (Teissier du Cros, 1981).

Cependant, par sa sensibilité à la sécheresse du sol et de l'atmosphère, ainsi qu'aux vagues de chaleur (Lebourgeois *et al.*, 2005), il est considéré comme l'une des essences les plus exposées au changement climatique (Landmann *et al.*, 2007). Le parallèle entre les pertes de vitalité, observées un peu partout en Europe, et le réchauffement climatique a rapidement été évoqué mais le lien de cause à effet est difficile à démontrer car ces observations sont à considérer dans le contexte plus large des changements globaux (Allen *et al.*, 2010 ; Augustaitis *et al.*, 2012 ; Niu *et al.*, 2014). Ceux-ci comprennent les modifications de l'environnement ayant eu lieu à partir de la fin du XIX^{e} siècle, essentiellement liées à l'activité humaine, dont le changement climatique mais aussi l'évolution des pratiques sylvicoles, les pollutions et retombées atmosphériques, etc. (EEA, 2017). Récemment, des travaux menés à travers l'Europe ont mis en évidence des modifications de la productivité des peuplements (Aertsen *et al.*, 2014 ; Bontemps *et al.*, 2012 ; Bontemps *et al.*, 2010 ; Charru *et al.*, 2010) et de la réponse des arbres au climat (Lebourgeois et Mérian, 2011 ; Weber *et al.*, 2013).

En Belgique, depuis le début du XX^{e} siècle, la température moyenne annuelle a augmenté d'environ 2 °C (IRM, 2015). Les années les plus chaudes sont toutes concentrées lors des dernières décennies durant lesquelles la fréquence et l'intensité des sécheresses et des canicules ont nettement augmenté. Selon les prévisions du GIEC (IPCC, 2014 ; moyennes des principaux modèles et scénarios), la température moyenne annuelle continuera d'augmenter de 2 à 4 °C d'ici la fin du XXI^{e} siècle, avec jusqu'à + 3 à + 4 °C en été. La variabilité de la température continuera aussi

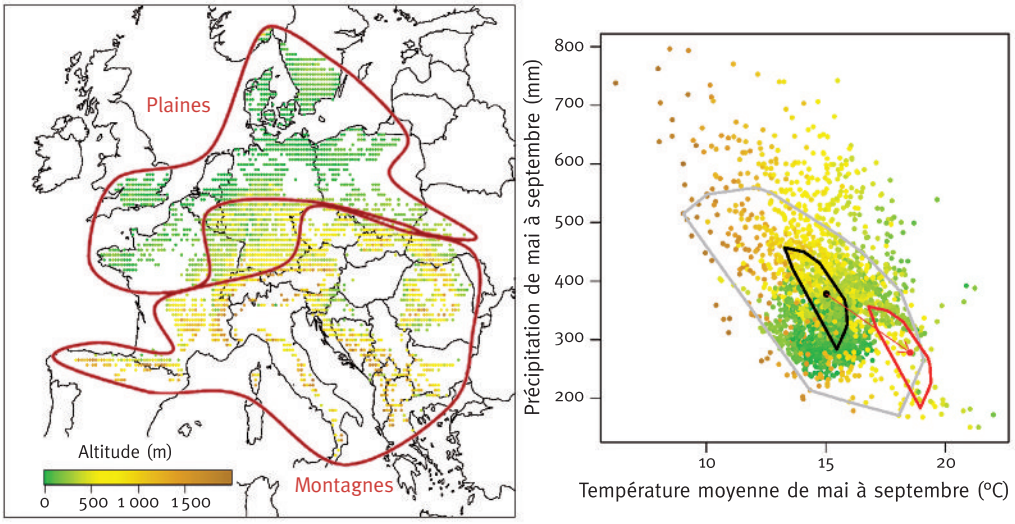
* Liège Université - Gembloux Agro-Bio Tech, Biose, Gestion des Ressources forestières
** Université de Lorraine, AgroParisTech, INRA, UMR Silva, 54000 Nancy, France
*** KU Leuven, Department of Earth and Environmental Sciences
**** Université libre de Bruxelles, Écologie végétale et Biogéochimie

d'augmenter ; les extrêmes seront donc plus marqués et plus fréquents. Concernant les précipitations, les projections sont moins fiables. La précipitation annuelle totale devrait rester relativement stable mais avec une répartition saisonnière plus contrastée : précipitations plus fortes en hiver et plus faibles en été. En conséquence, lors de la saison de végétation, l'effet cumulé des vagues de chaleur et des faibles précipitations aura indéniablement des répercussions négatives sur la réserve en eau du sol et sur l'hygrométrie de l'air, alors que la demande en eau augmentera par l'évapotranspiration accrue.

Ainsi, au moment de la révision du fichier écologique des essences (Petit *et al.*, 2017 ; Weissen, 1991), outil d'aide à la décision pour le choix des essences en Wallonie, une recherche doctorale spécifique au Hêtre (Latte, 2017) a été menée à l'échelle de la Wallonie et de la Région bruxelloise, ensuite étendue à la Belgique entière grâce à un complément de données (Aertsen *et al.*, 2014 ; Kint *et al.*, 2012 ; Penninckx *et al.*, 1999). La croissance radiale a été considérée comme un indicateur pertinent de la vitalité des arbres (Lebourgeois *et al.*, 2015 ; Vanoni *et al.*, 2016) et de leur adéquation avec l'environnement (Lebourgeois et Mérian, 2011). La dendroécologie (Fritts et Swetnam, 1989), discipline qui étudie la croissance radiale des arbres en relation avec les facteurs de l'environnement (climat, sol, etc.) (Latte *et al.*, 2012), a permis de retracer la dynamique de la croissance des hêtraies belges et d'analyser l'influence des changements globaux depuis le début du XX^{e} siècle.

Figure 1 GAUCHE : AIRE DE DISTRIBUTION NATURELLE DU HÊTRE (*FAGUS SYLVATICA* L.) EN EUROPE
avec distinction d'une zone de plaines et d'une zone où le Hêtre est plutôt inféodé aux montagnes, autour d'une zone optimale de collines au centre de l'Europe.
Source : www.euforgen.org

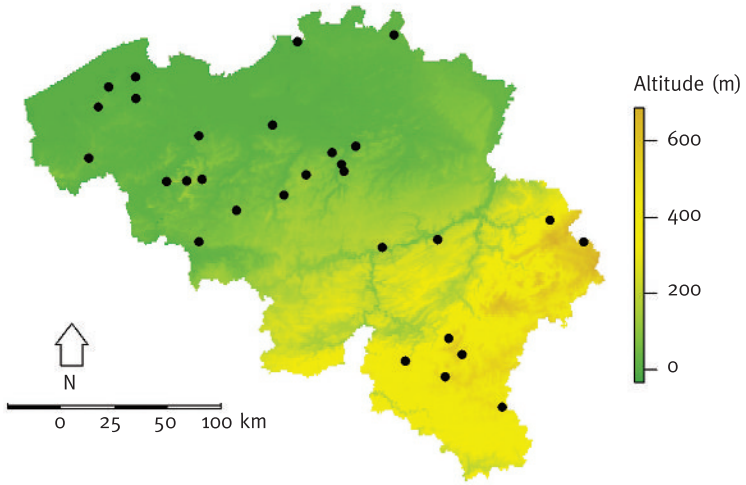
DROITE : DISTRIBUTION DES HÊTRAIES DANS UN DIAGRAMME CLIMATIQUE
Source des données climatiques : www.ecad.eu, moyennes 1982-2011.
Les points du graphique correspondent aux points de la grille sur la carte.
La couleur des points renseigne l'altitude.
Le polygone noir indique l'enveloppe du climat belge, de la plaine maritime au plateau ardennais.
La flèche rouge indique grossièrement la translation de cette enveloppe selon le changement climatique prédit par le GIEC pour la fin du XXI^{e} siècle (IPCC, 2014 ; moyennes des principaux modèles et scénarios).
Le polygone gris indique l'enveloppe du climat français actuel.



ZONE D'ÉTUDE ET DONNÉES D'ACCROISSEMENT

Cette étude a été réalisée à partir des mesures de l'accroissement radial de 329 hêtres : âge moyen de 110 ans (15-215 ans) et diamètre moyen de 55 cm (7-94 cm). Ces arbres proviennent de 36 sites répartis le long du gradient bioclimatique et altitudinal (de 7 à 590 m) de la Belgique (figure 2, ci-dessous). Sur ce petit territoire, le Hêtre rencontre une forte variabilité climatique (figure 1, droite p. 206). D'ouest en est, le climat maritime devient progressivement subcontinental : la température moyenne annuelle diminue de 10,3 à 6,5 °C et la somme des précipitations augmente de 674 à 1275 mm/an [(http://www.ecad.eu), moyennes 1982-2011]. Les conditions pédologiques varient aussi avec l'altitude : sols profonds, limoneux ou sableux et généralement riches dans le nord-ouest, et sols moins profonds, limono-caillouteux et plus pauvres dans le sud-est en Ardenne. Les besoins en eau du Hêtre semblent cependant satisfaits : en Ardenne, les fortes précipitations compensent la faible réserve en eau du sol et à basse altitude, en Flandre et en Région bruxelloise, c'est l'inverse.

Figure 2 **RÉPARTITION DES 36 SITES D'ÉTUDE COUVRANT L'ENSEMBLE DU GRADIENT BIOCLIMATIQUE DE LA BELGIQUE**
Certains points regroupent plusieurs sites.



L'objectif de ce travail étant d'analyser la réponse des hêtres au climat, les sites et les arbres ont été sélectionnés de manière à minimiser l'influence des conditions de croissance locales et maximiser le signal climatique (Fritts, 1976). Ainsi, les stations forestières sélectionnées sont propices au bon développement du Hêtre : sols suffisamment épais et de pentes faibles (< 3 %) avec des niveaux hydrique et trophique correspondant aux exigences écologiques de cette essence (Dagnélie, 1956a, 1956b ; Weissen, 1991). De plus, les arbres sélectionnés, issus de hêtraies régulières, étaient sains et dominants (ou codominants) afin de limiter les effets de la compétition. Les peuplements échantillonnés sont parmi les plus productifs d'Europe (entre 19 et 30 m de hauteur à l'âge de 80 ans, indiquant des productivités annuelles moyennes de 5 à 10 m^3/ha/an). Ils semblent donc, *a priori,* les mieux lotis pour faire face au changement climatique. Ces critères de sélection se démarquent de ceux des études dendroécologiques précédentes qui, dans la plupart des cas, se sont focalisées sur les stations où le Hêtre est

régulièrement en situation de stress (sud de l'aire de distribution, sols contraignants, etc.) (Dittmar *et al.*, 2003 ; Friedrichs *et al.*, 2009 ; Jump *et al.*, 2006 ; Piovesan *et al.*, 2008 ; Scharnweber *et al.*, 2011 ; Weber *et al.*, 2013).

Les échantillons de bois ont été prélevés sous forme de carottes (Aertsen *et al.*, 2014 ; Kint *et al.*, 2012 ; Penninckx *et al.*, 1999), de rondelles (Latte *et al.*, 2016a) ou encore de barreaux (Latte *et al.*, 2015a). Le barreau est l'intermédiaire entre la carotte et la rondelle. Sa dimension facilite grandement le transport et la manutention tout en conservant une surface de lecture de cerne optimale incluant systématiquement la moelle (Latte *et al.*, 2015b). La mesure de la largeur de cerne a été opérée au centième de millimètre sur des échantillons de bois préalablement séchés et poncés. Après la mesure, la validation des données a été assurée par les procédures classiques d'interdatation de la dendrochronologie (Lebourgeois et Mérian, 2012 ; Speer, 2010).

Diverses analyses statistiques ont permis de caractériser l'évolution de l'accroissement du Hêtre dans le temps et la relation accroissement-climat le long du gradient bioclimatique (Latte *et al.*, 2015a, 2016a, 2016b, 2015c). Les paragraphes qui suivent ont pour but de décrire et d'interpréter les principaux résultats, sans insister sur les fondements scientifiques des méthodes. Les données utilisées pour les analyses et l'illustration des résultats varient d'une thématique à l'autre en raison des contraintes statistiques propres à chaque méthode.

ÉVOLUTION DE LA CROISSANCE MOYENNE

Afin d'analyser en profondeur l'évolution de la croissance des arbres à l'échelle de la Belgique (figure 3, haut p. 209), deux signaux ont été distingués (Fritts, 1976) :

— Le signal basse fréquence (figure 3, milieu) correspond à la variation à long terme de l'accroissement, essentiellement influencée par des processus lents et graduels tels que le vieillissement des arbres, les pollutions et retombées atmosphériques, et l'évolution de la sylviculture.

— Le signal haute fréquence (figure 3, bas), obtenu par standardisation de la largeur de cerne, aussi appelé « indice de cerne », correspond à la variation interannuelle de l'accroissement, essentiellement influencée par le climat de l'année en cours voire de l'année précédente.

Le signal basse fréquence (figure 3, milieu) a progressivement augmenté durant un demi-siècle jusqu'aux années 1960 et a diminué régulièrement depuis. Cette diminution est toujours en cours et a mené à des valeurs d'accroissement nettement inférieures à celles du début du XX^{e} siècle. La phase d'augmentation de l'accroissement sur le long terme est bien connue des chercheurs pour de nombreuses essences à l'échelle européenne. Elle a été attribuée à une sylviculture plus dynamique (éclaircies plus fréquentes) et aux effets positifs du réchauffement (notamment l'allongement de la saison de végétation) et des retombées azotées (fertilisation du sol) (Kahle, 2008). La phase de décroissance n'a été décrite que récemment (Bontemps *et al.*, 2010) et comme nous le verrons plus bas, plusieurs facteurs, dont le changement climatique, y ont contribué.

La variabilité du signal haute fréquence (figure 3, bas) est quant à elle restée relativement stable jusqu'à la fin des années 1980 et a fortement augmenté depuis. Cette augmentation suggère que le Hêtre est devenu plus sensible vis-à-vis du climat qu'auparavant.

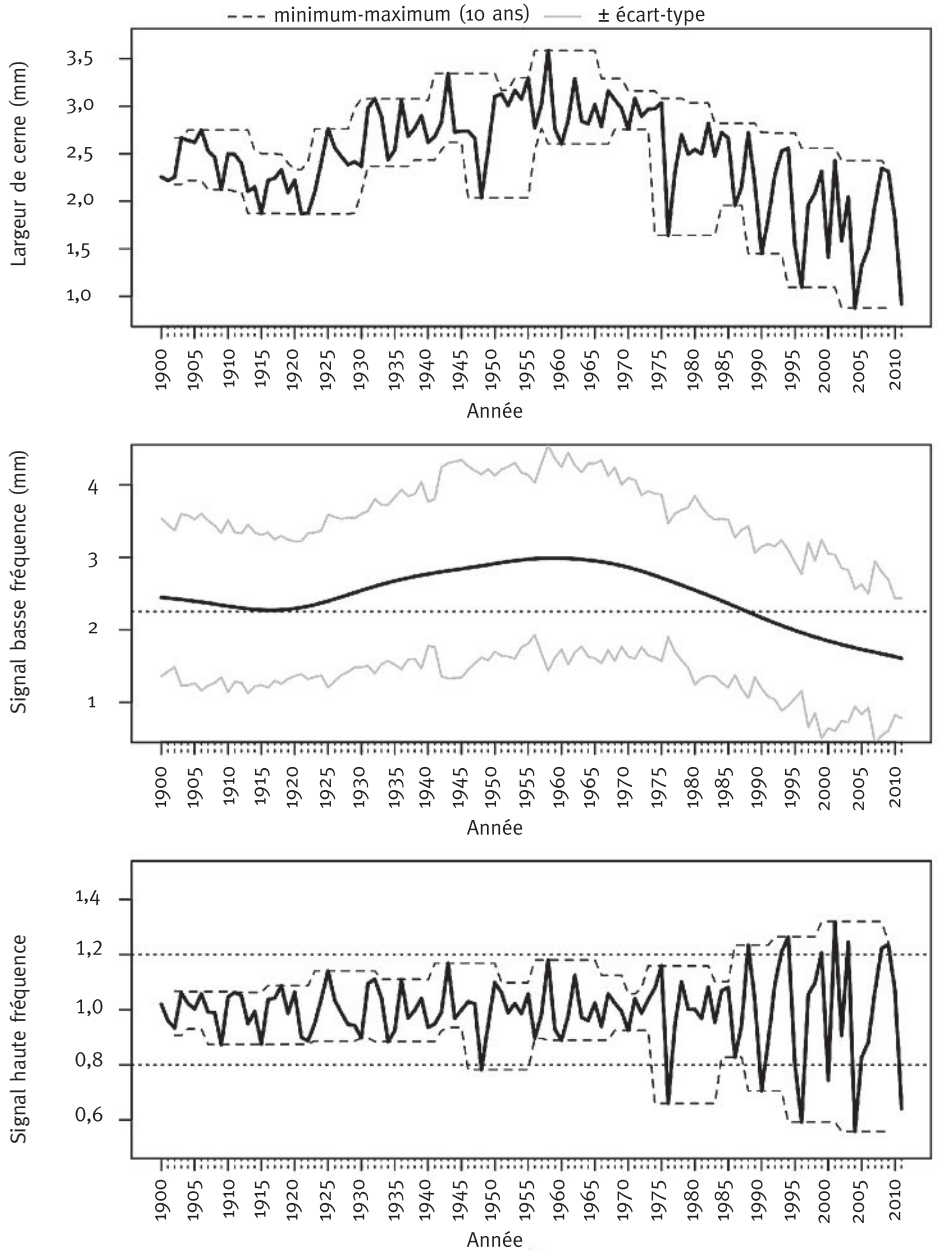
Figure 3 **DÉCOMPOSITION DE LA LARGEUR DE CERNE EN DEUX SIGNAUX DISTINCTS**

Haut : Évolution de la moyenne des largeurs de cerne des 149 arbres matures (87-186 ans) entre 1900 et 2011.

Milieu : Signal basse fréquence (en noir) plus ou moins l'écart-type annuel (en gris) mettant en évidence la tendance à long terme.

Bas : Signal haute fréquence mettant en évidence les variations annuelles.

Les traits discontinus indiquent les minima et maxima calculés sur une fenêtre mobile de 10 ans. L'écart entre ces deux traits illustre grossièrement l'évolution de la variabilité de l'accroissement au cours du temps.



SYNCHRONISATION DE LA CROISSANCE

D'une façon tout à fait remarquable, il apparaît que la diminution de l'accroissement sur le long terme et l'augmentation de sa variabilité sont communes à la majorité des sites et des arbres,

Figure 4 **ÉVOLUTION DES SIGNAUX BASSE ET HAUTE FRÉQUENCES DE 9 SITES RÉPARTIS LE LONG DU GRADIENT BIOCLIMATIQUE (31-590 m) DE BELGIQUE COUVRANT UNE LARGE GAMME D'ÂGES (79-179 ans)**

Gauche : Signal basse fréquence en fonction de l'âge moyen des arbres.
Droite : Signal haute fréquence en fonction du temps.

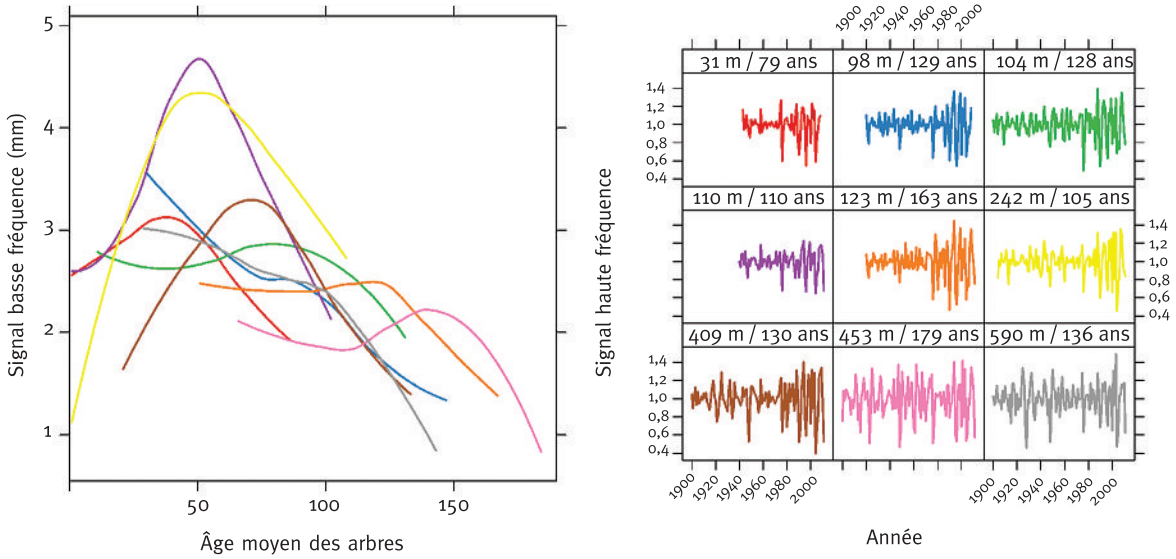
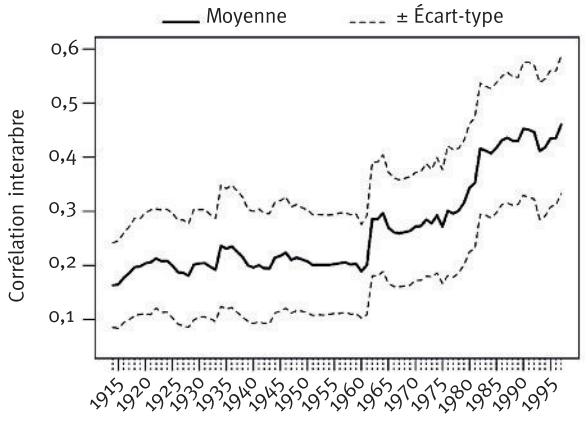


Figure 5 **ÉVOLUTION DE LA CORRÉLATION INTERARBRE MOYENNE (trait plein) PLUS OU MOINS L'ÉCART-TYPE (traits discontinus) À L'ÉCHELLE DE LA BELGIQUE ENTRE 1900 ET 2011**

Cette corrélation est calculée au départ du signal haute fréquence de tous les arbres du jeu de données sur une fenêtre mobile de 30 ans. Généralement, la corrélation interarbre d'une hêtraie régulière mature est de l'ordre de 0,6.



quels que soient leurs âges et les contextes stationnels dans lesquels ils poussent (figure 4, p. 210). Ainsi, depuis les dernières décennies, tout se passe comme si l'ensemble des hêtres répondait aux mêmes facteurs environnementaux à l'échelle de la Belgique (Latte *et al.*, 2015a). Les effets des conditions stationnelles ont en quelque sorte été masqués. La synchronisation de la croissance des arbres à l'échelle de la Belgique est illustrée sur la figure 5 (p. 210) par la corrélation interarbre. Le signal commun des arbres le long du gradient bioclimatique est si marqué que l'on pourrait penser que les arbres sont tous issus d'une même hêtraie.

La diminution de l'accroissement et l'augmentation de la variabilité sont toutefois plus marquées à basse altitude (Flandre et Région bruxelloise) où, par rapport à l'Ardenne, la sensibilité était au départ plus faible et l'accroissement plus élevé (Latte *et al.*, 2015a).

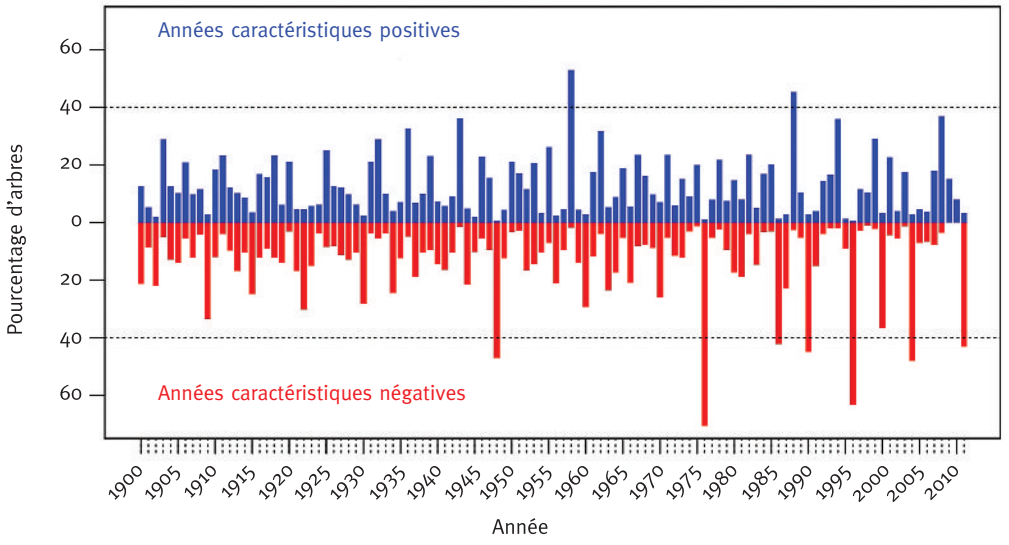
RELATION ENTRE LE CLIMAT ET L'ACCROISSEMENT ANNUEL

Dans un premier temps, l'influence du climat sur la variabilité interannuelle de l'accroissement a été analysée par le biais des « années caractéristiques » (Latte *et al.*, 2015a, 2016a). Ces dernières correspondent à des années durant lesquelles la croissance a été extrême (soit très faible, soit très forte) pour la majorité des arbres (Becker, 1989 ; Neuwirth *et al.*, 2007). Ces années témoignent de conditions de croissance remarquables, le plus souvent liées à des événements climatiques particulièrement limitants (sécheresse, canicule ou froid extrêmes, etc.) ou stimulants (pluies régulières, fraîcheur, etc.).

À l'échelle de la Belgique, nous avons identifié 1948, 1976, 1986, 1990, 1996, 2004 et 2011 comme années caractéristiques négatives (figure 6, ci-dessous). Ces dernières sont en lien direct avec un climat exceptionnel : sécheresse printanière l'année en cours (1990 et 2011), canicule estivale

Figure 6 **POURCENTAGE D'ARBRES PRÉSENTANT DES ACCROISSEMENTS PARTICULIÈREMENT FORTS (années caractéristiques positives, en bleu) OU FAIBLES (années caractéristiques négatives, en rouge) ENTRE 1900 ET 2011**

Ces années caractéristiques ont été mises en évidence pour chaque arbre du jeu de données au complet selon la méthode de Neuwirth *et al.* (2007)

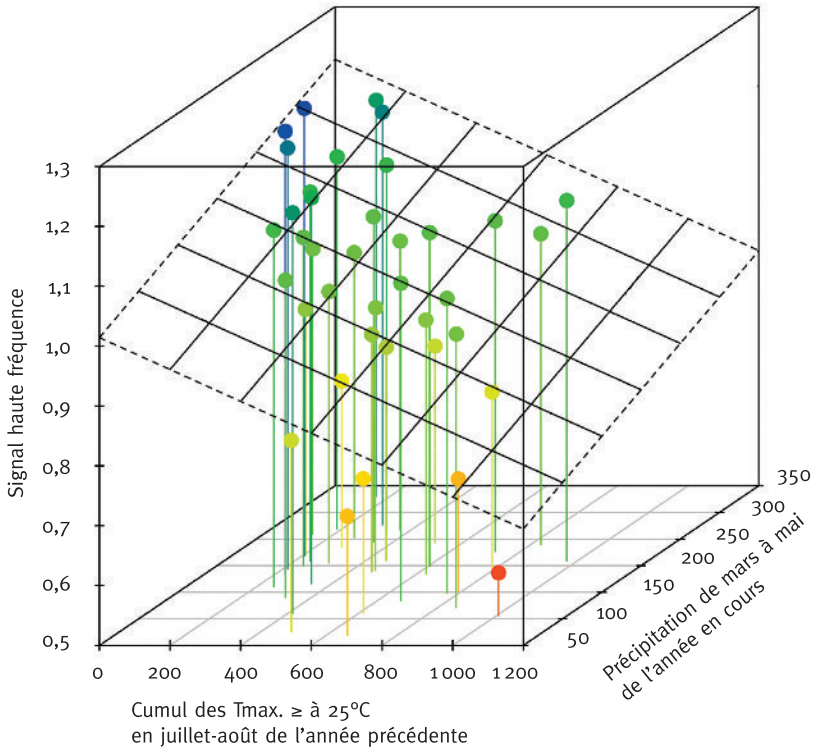


l'année précédente (1948 et 2004) et le pire scénario, la combinaison des deux (1976 et 1996). En 1976, année la plus sèche et caniculaire du vingtième siècle, une nette réduction de l'accroissement a été observée sur plus de deux tiers des arbres de Belgique (figure 6, p. 211). Contrairement aux années caractéristiques positives, la fréquence des années caractéristiques négatives augmente fortement au cours du temps, en particulier à partir de la fin des années 1980.

Dans un deuxième temps, les conditions climatiques qui influencent le plus l'accroissement ont été mises en évidence (Latte *et al.*, 2015a, 2016a). De nombreuses variables climatiques, exprimant notamment les extrêmes de température, les précipitations et la disponibilité climatique en eau (bilan hydrique), ont été calculées pour des fenêtres temporelles variant de 1 à 7 mois au cours des saisons de végétation de l'année en cours et de l'année précédente. Elles ont ensuite été mises en relation avec l'accroissement à l'aide de la régression par les moindres carrés partiels (méthode « PLS »). Cette méthode maximise la covariance de la fonction : Y = f(X) avec Y étant les accroissements et X, la matrice des variables climatiques (Mevik et Wehrens, 2007). L'avantage de cette méthode, par rapport aux autres méthodes classiquement utilisées en dendrochronologie (telles que les fonctions de réponse ou de corrélation), est qu'elle gère la multicolinéarité (c'est-à-dire l'intercorrélation des variables au sein de chaque matrice) et accepte un nombre de variables climatiques supérieur au nombre de mesures.

Figure 7 **MOYENNE DU SIGNAL HAUTE FRÉQUENCE DES ARBRES DE LA FORÊT DE SOIGNES (BRUXELLES) EN FONCTION DES DEUX VARIABLES CLIMATIQUES LES PLUS EXPLICATIVES MISES EN ÉVIDENCE PAR MODÉLISATION (LATTE *et al.*, 2015c) POUR LA PÉRIODE 1976-2011**

La couleur des points souligne la valeur du signal haute fréquence.



Deux variables particulièrement explicatives et corrélées avec l'accroissement ont été mises en évidence :

— l'accumulation de températures élevées en été (juillet-août) de l'année précédente ;
— la somme des précipitations au printemps (de mars à mai) de l'année en cours (figure 7, p. 212).

Ensemble, ces deux variables expliquent une part importante de la variabilité interannuelle de l'accroissement radial, et ce, de manière de plus en plus marquée au cours du temps. Depuis 1976, elles expliquent, à elles seules, presque un tiers de la variabilité de l'accroissement, alors que leur influence était à peine significative au milieu du XX^{e} siècle. L'influence du climat sur l'accroissement s'est donc accentuée ces dernières décennies sous l'influence grandissante des sécheresses et canicules, devenues plus intenses et fréquentes sur l'ensemble du territoire belge (IRM, 2015).

INFLUENCE DU CLIMAT SUR LA PHYSIOLOGIE DU HÊTRE

L'ensemble des analyses accroissement-climat ont permis de mettre en évidence deux périodes clés durant la saison de végétation en lien avec l'écophysiologie du Hêtre :

— Durant le printemps, le Hêtre réalise jusqu'à 80 % de son accroissement annuel. La photosynthèse fonctionne à plein régime et le besoin en eau est important. La recharge de la nappe durant l'hiver et, surtout, des précipitations suffisantes au début du printemps sont primordiales. Dans ces conditions, l'accroissement sera d'autant plus élevé que le mois de juin a été clément, c'est-à-dire humide et pas trop chaud. Les conditions climatiques du printemps de l'année en cours influencent donc l'accroissement lors de cette même année.

— Au début de l'été, l'accroissement ralentit suite aux conditions moins favorables. Il fait plus chaud, l'air est moins humide et l'eau disponible dans le sol vient à manquer. À partir d'août et de septembre, le Hêtre termine son accroissement et commence à stocker des réserves qui seront utilisées pour le démarrage de l'accroissement lors du printemps suivant. Ainsi, les conditions climatiques de l'été et du début de l'automne produiront leur effet l'année suivante par l'intermédiaire des réserves.

Les vagues de chaleur, canicules et sécheresses réduisent la photosynthèse (fermeture stomatique, cavitation, etc.) et les réserves, mais provoquent aussi des dégâts variés (morts racinaires, chute de feuilles, etc.) qui doivent être réparés en puisant dans les réserves ou la photosynthèse. De plus, les canicules en été peuvent déclencher chez le Hêtre des fructifications massives l'année suivante, réduisant davantage la partie de la réserve allouée aux bourgeons et aux feuilles (Hacket-Pain *et al.*, 2015).

EFFETS DU STADE DE DÉVELOPPEMENT

Bien que le rôle du changement climatique soit primordial, nous avons également évalué les effets du stade de développement des arbres, c'est-à-dire l'influence de leur âge et de leur taille sur les changements observés. En effet, pour un Hêtre donné, hors stade juvénile, le signal basse fréquence diminue tandis que la variabilité du signal haute fréquence augmente naturellement avec le stade de développement (Latte *et al.*, 2016b).

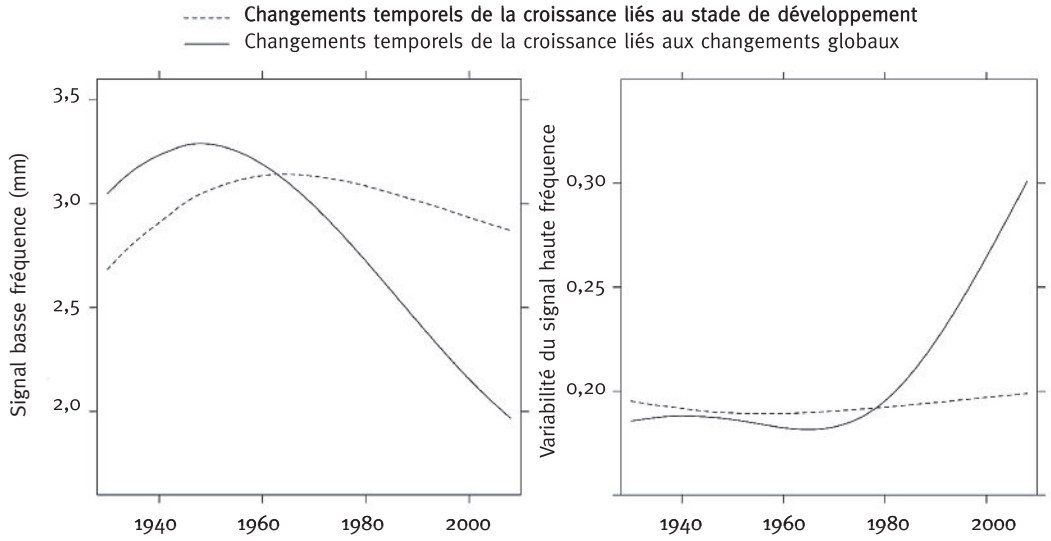
Puisque les échantillons de bois ont été collectés sur une courte période (2008-2013), l'âge moyen des arbres du jeu de données augmente en même temps que les années. Les effets du stade de développement sur la croissance du Hêtre et ceux des changements globaux sont donc intimement liés. Il a cependant été possible de les dissocier avec une approche particulière basée sur la modélisation non linéaire mixte (Latte *et al.*, 2016b). Il apparaît clairement que les effets

du stade de développement sur la variabilité de l'accroissement sont négligeables par rapport à ceux des changements globaux, majoritairement climatiques (figure 8, gauche). Concernant l'accroissement sur le long terme, les effets du stade de développement sont minimes par rapport à ceux des changements globaux, majoritairement non climatiques (évolution de la sylviculture, pollutions, etc.) avant la fin des années 1980 (figure 8, droite).

Figure 8 **DISTINCTION DES EFFETS DES CHANGEMENTS GLOBAUX (traits pleins) ET DU STADE DE DÉVELOPPEMENT (traits discontinus) SUR L'ACCROISSEMENT MOYEN DU HÊTRE DE BELGIQUE**

Gauche : Changements temporels de la basse fréquence (croissance sur le long terme).

Droite : Changements temporels de la variabilité du signal haute fréquence (sensibilité moyenne).



QUEL EST L'AVENIR DE LA HÊTRAIE BELGE ?

Les résultats des analyses dendroécologiques montrent clairement qu'au cours du temps, le climat est devenu de plus en plus contraignant pour le Hêtre, en particulier par ses épisodes caniculaires et ses périodes de sécheresse de plus en plus marqués et fréquents. Ces stress climatiques répétés au cours des dernières décennies sont largement responsables des trois changements majeurs mis en évidence :

1. l'augmentation de la variabilité interannuelle de l'accroissement, ou autrement dit, de la sensibilité climatique du Hêtre ;

2. la synchronisation exceptionnelle de l'accroissement à l'échelle du pays, à des niveaux encore jamais observés auparavant, sous l'effet des années climatiques stressantes ;

3. la diminution de l'accroissement sur le long terme due à de fréquentes réductions de croissance, probablement combinées à l'épuisement progressif des réserves des arbres.

Certains ont mis en évidence le rôle des retombées atmosphériques, notamment azotées (Zhu *et al.*, 2015), et de la compaction des sols par l'exploitation forestière mécanisée (Cambi *et al.*, 2015) dans les changements observés. Cependant, ces processus sont graduels et ne varient pas significativement et en tous sens d'une année à l'autre. Contrairement au changement climatique,

ils n'opèrent pas uniformément à l'échelle de la Belgique. Ils ne peuvent donc pas expliquer l'augmentation de la variabilité de l'accroissement ni la synchronisation. Tout au plus ont-ils pu jouer un rôle en sensibilisant davantage les arbres aux événements climatiques.

Jusqu'à aujourd'hui, en Belgique, on peut considérer que le Hêtre a résisté à son environnement changeant. En effet, malgré les changements majeurs observés, les mortalités de ces dernières années ont été peu fréquentes. De plus, aucun dépérissement soudain et à large échelle n'a été identifié jusqu'à présent. À ce titre, la diminution de l'accroissement sur le long terme et l'augmentation de sa variabilité pourraient être considérées comme le résultat d'une adaptation écophysiologique, à la recherche d'un nouvel équilibre entre l'arbre et son environnement. Mais pour combien de temps ? Selon les projections du GIEC (IPCC, 2014), le changement climatique à venir sera d'une telle ampleur que le Hêtre sera exposé en Belgique à des stress climatiques d'une intensité encore jamais rencontrée. Les pertes de vitalité en cours pourraient aboutir à des dépérissements lents voire à la mortalité d'individus, isolés ou non (Gillner *et al.*, 2013). On peut d'ailleurs se demander si l'augmentation, depuis une décennie, de la défoliation du Hêtre ne trouve pas les stress climatiques parmi ses causes multiples (Claessens *et al.*, 2017). Le cycle de développement des hêtraies étant long en regard de la rapidité des changements majeurs en cours, les gestionnaires forestiers doivent dès aujourd'hui intégrer ce risque dans leurs aménagements. D'une manière générale, les hêtraies devraient idéalement être confinées aux stations forestières les moins exposées à la sécheresse du sol et de l'air (Latte *et al.*, 2015c).

Nicolas LATTE
Dr, Ingénieur de recherche
Liège Université - Gembloux Agro-Bio Tech
BIOSE, Gestion des ressources forestières
Passage des Déportés 2
B-5030 GEMBLOUX (BELGIQUE)
(Nicolas.Latte@uliege.be)

François LEBOURGEOIS
Université de Lorraine, AgroParisTech, INRA
UMR Silva
Équipe Écologie forestière
14 rue Girardet
F-54042 NANCY CEDEX
(francois.lebourgeois@agroparistech.fr)

Vincent KINT
Professeur
KU Leuven
Department of Earth and Environmental Sciences
Celestijnenlaan 200E
B-3001 LEUVEN (BELGIQUE)
(Vincent.Kint@kuleuven.be)

Thomas DROUET
Professeur
Université Libre de Bruxelles
Écologie végétale et Biogéochimie
Boulevard du Triomphe CP244
B-1050 BRUXELLES (BELGIQUE)
(Thomas.Drouet@ulb.ac.be)

Hugues CLAESSENS
Professeur
Liège Université - Gembloux Agro-Bio Tech
BIOSE, Gestion des ressources forestières
Passage des Déportés 2
B-5030 GEMBLOUX (BELGIQUE)
(Hugues.Claessens@uliege.be)

Remerciements

Cette recherche a été menée grâce aux financements du SPW-DGO3-DNF (accord-cadre de recherche et vulgarisation forestières) et de Bruxelles Environnement (IBGE). Nous remercions les agents forestiers de ces institutions pour leur appui sur le terrain et l'autorisation de l'abattage d'arbres et de prélèvements de rondelles.

BIBLIOGRAPHIE

AERTSEN W., JANSSEN E., KINT V., BONTEMPS J.-D., VAN ORSHOVEN J., MUYS B., 2014. Long-term growth changes of common beech (*Fagus sylvatica* L.) are less pronounced on highly productive sites. *Forest Ecology and Management*, vol. 312, pp. 252-259.

ALLEN C.D., MACALADY A.K., CHENCHOUNI H., BACHELET D., MCDOWELL N., VENNETIER M., KITZBERGER T., RIGLING A., BRESHEARS D.D., HOGG E.H., GONZALEZ P., FENSHAM R., ZHANG Z., CASTRO J., DEMIDOVA N., LIM J.-H., ALLARD G., RUNNING S.W., SEMERCI A., COBB N., 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, vol. 259, n° 4, pp. 660-684.

ARMAND G., 2002. *Le Hêtre Autrement*. Paris, France : Institut pour le développement forestier. 263 p.

AUGUSTAITIS A., JASINEVICIENE D., GIRGZDIENE R., KLIUCIUS A., MAROZAS V., 2012. Sensitivity of beech trees to global environmental changes at most north-eastern latitude of their occurrence in Europe. *The Scientific World Journal*, vol. 2012, article ID 743926, 12 p.

BECKER M., 1989. The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of northeastern France. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 19, n° 9, pp. 1110-1117.

BONTEMPS J.D., HERVÉ J.C., DHÔTE J.F., 2010. Dominant radial and height growth reveal comparable historical variations for common beech in north-eastern France. *Forest Ecology and Management*, vol. 259, n° 8, pp. 1455-1463.

BONTEMPS J.-D., HERVÉ J.-C., DUPLAT P., DHÔTE J.-F., 2012. Shifts in the height-related competitiveness of tree species following recent climate warming and implications for tree community composition: the case of common beech and sessile oak as predominant broadleaved species in Europe. *Oikos*, vol. 121, n° 8, pp. 1287-1299.

CAMBI M., CERTINI G., NERI F., MARCHI E., 2015. The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management*, vol. 338, pp. 124-138.

CHARRU M., SEYNAVE I., MORNEAU F., BONTEMPS J.D., 2010. Recent changes in forest productivity: An analysis of national forest inventory data for common beech (*Fagus sylvatica* L.) in north-eastern France. *Forest Ecology and Management*, vol. 260, n° 5, pp. 864-874.

CLAESSENS H., CLAESSENS L., LONGRÉE C., NIVELLE L., TAHIR B., LISEIN J., LECOMTE H., 2017. Près de 20 ans après sa grave crise sanitaire, où en est la hêtraie ardennaise ? *Forêt.Nature*, vol. 142, n° 1, pp. 30-36.

DAGNÉLIE P., 1956a. Recherches sur la productivité des hêtraies d'Ardenne en relation avec les types phytosociologiques et les facteurs écologiques. Deuxième partie. Utilisation d'un critère de station dans les hêtraies d'Ardenne. *Bulletin de l'Institut agronomique et des stations de recherches de Gembloux*, vol. 24, n° 4, pp. 369-410.

DAGNÉLIE P., 1956b. Recherches sur la productivité des hêtraies d'Ardenne en relation avec les types phytosociologiques et les facteurs écologiques. Première partie. Recherche d'un critère de station utilisable dans les hêtraies d'Ardenne. *Bulletin de l'Institut agronomique et des stations de recherches de Gembloux*, vol. 24, n° 3, pp. 249-284.

DITTMAR C., ZECH W., ELLING W., 2003. Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe - A dendroecological study. *Forest Ecology and Management*, vol. 173, n° 1-3, pp. 63-78.

EEA., 2017. *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report. Scientific Report*. European Environment Agency. 419 p.

FRIEDRICHS D.A., TROUET V., BÜNTGEN U., FRANK D.C., ESPER J., NEUWIRTH B., LÖFFLER J., 2009. Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany. *Trees - Structure and Function*, vol. 23, n° 4, pp. 729-739.

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

FRITTS H.C., SWETNAM T.W., 1989. Dendroecology: A tool for evaluating variations in past and present forest environments. *Advances in Ecological Research*, vol. 19, pp. 111-188.

GILLNER S., RÜGER N., ROLOFF A., BERGER U., 2013. Low relative growth rates predict future mortality of common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Forest Ecology and Management*, vol. 302, pp. 372-378.

HACKET-PAIN A.J., FRIEND A.D., LAGEARD J.G.A., THOMAS P.A., 2015. The influence of masting phenomenon on growth–climate relationships in trees: explaining the influence of previous summers' climate on ring width. *Tree Physiology*, vol. 35, n° 3, pp. 319-330.

IPCC, 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.

IRM, 2015. *Vigilance climatique 2015*. Institut royal météorologique de Belgique. 87 p.

JUMP A.S., HUNT J.M., PEN UELAS J., 2006. Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology*, vol. 12, n° 11, pp. 2163-2174.

KAHLE H.P., 2008. *Causes and Consequences of Forest Growth trends in Europe*. Brill: European Forest Institute Research Report 21. 261 p.

KINT V., AERTSEN W., CAMPIOLI M., VANSTEENKISTE D., DELCLOO A., MUYS B., 2012. Radial growth change of temperate tree species in response to altered regional climate and air quality in the period 1901-2008. *Climatic Change*, vol. 115, n° 2, pp. 343-363.

LANDMANN G., DUPOUEY J.-L., LEFÈVRE Y., BRÉDA N., NAGELEISEN L.-M., CHUINE I., LEBOURGEOIS F., 2007. Le Hêtre face au changement climatique. *Rendez-Vous techniques*, n° 2, pp. 29-38.

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*. Université de Liège, Belgique. 131 p. (Thèse de doctorat).

LATTE N., BEECKMAN H., BAUWENS S., BONNET S., LEJEUNE P., 2015b. A novel procedure to measure shrinkage-free tree-rings from very large wood samples combining photogrammetry, high-resolution image processing, and GIS tools. *Dendrochronologia*, vol. 34, pp. 24-28.

LATTE N., DEBRUXELLES J., SOHIER C., DEGRÉ A., CLAESSENS H., 2012. La Dendroécologie : un outil pour affiner nos connaissances sur l'autoécologie des essences forestières. *Forêt wallonne*, vol. 116, 2012, pp. 3-17.

LATTE N., KINT V., DROUET T., PENNINCKX V., LEBOURGEOIS F., VANWIJNSBERGHE S., CLAESSENS H., 2015c. Dendroécologie du Hêtre en Forêt de Soignes. Les cernes des arbres nous renseignent sur les changements récents et futurs. *Forêt.Nature*, vol. 137, n° 4, pp. 24-37.

LATTE N., LEBOURGEOIS F., CLAESSENS H., 2015a. Increased tree-growth synchronization of beech *(Fagus sylvatica* L.) in response to climate change in northwestern Europe. *Dendrochronologia*, vol. 33, pp. 69-77.

LATTE N., LEBOURGEOIS F., CLAESSENS H., 2016a. Growth partitioning within beech trees (*Fagus sylvatica* L.) varies in response to summer heat waves and related droughts. *Trees - Structure and Function*, vol. 30, n° 1, pp. 189-201.

LATTE N., PERIN J., KINT V., LEBOURGEOIS F., CLAESSENS H., 2016b. Major changes in growth rate and growth variability of beech (*Fagus sylvatica* L.) related to soil alteration and climate change in Belgium. *Forests*, vol. 7, n° 8, p. 174.

LEBOURGEOIS F., BRÉDA N., ULRICH E., GRANIER A., 2005. Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees - Structure and Function*, vol. 19, n° 4, pp. 385-401.

LEBOURGEOIS F., DRÉNOU C., BOUVIER M., LEMAIRE J., 2015. Caractérisation de la croissance des chênaies pédonculées atlantiques dépérissantes : effets des sécheresses et relation avec l'architecture des houppiers. *Revue forestière française*, vol. LXIV, n° 4, pp. 333-351.

LEBOURGEOIS F., MÉRIAN P., 2011. La Sensibilité au climat des arbres forestiers a-t-elle changé au cours du XX^{e} siècle ? *Revue forestière française*, vol. LXIII, n° 1, pp. 17-32.

LEBOURGEOIS F., MÉRIAN P., 2012. *Principes et méthodes de la dendrochronologie*. Nancy : Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois (LERFOB), Unité mixte de Recherches INRA-ENGREF 1092, équipe Écologie forestière. 85 p.

MEVIK B.H., WEHRENS R., 2007. The pls package: Principal component and partial least squares regression in R. *Journal of Statistical Software*, vol. 18, n° 2, pp. 1-23.

NEUWIRTH B., SCHWEINGRUBER F.H., WINIGER M., 2007. Spatial patterns of central European pointer years from 1901 to 1971. *Dendrochronologia*, vol. 24, n° 2-3, pp. 79-89.

NIU S., LUO Y., LI D., CAO S., XIA J., LI J., SMITH M.D., 2014. Plant growth and mortality under climatic extremes: An overview. *Environmental and Experimental Botany*, vol. 98, pp. 13-19.

PENNINCKX V., MEERTS P., HERBAUTS J., GRUBER W., 1999. Ring width and element concentrations in beech (*Fagus sylvatica* L.) from a periurban forest in central Belgium. *Forest Ecology and Management*, vol. 113, n° 1, pp. 23-33.

PETIT S., CLAESSENS H., PONETTE Q., MARCHAL D., 2017. Le Fichier écologique des essences version 2.0. *Forêt. Nature*, vol. 143, pp. 12-19.

PIOVESAN G., BIONDI F., DI FILIPPO A., ALESSANDRINI A., MAUGERI M., 2008. Drought-driven growth reduction in old beech (*Fagus sylvatica* L.) forests of the central Apennines, Italy. *Global Change Biology*, vol. 14, n° 6, pp. 1265-1281.

SCHARNWEBER T., MANTHEY M., CRIEGEE C., BAUWE A., SCHRÖDER C., WILMKING M. Drought matters - Declining precipitation influences growth of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in north-eastern Germany, 2011. *Forest Ecology and Management*, vol. 262, n° 6, pp. 947-961.

SPEER J.H., 2010. *Fundamentals of tree-ring research*. Tucson : University of Arizona Press. 368 p.

TEISSIER DU CROS E., 1981. *Le Hêtre*. Versailles : Institut national de la recherche agronomique (INRA). 614 p.

VANONI M., BUGMANN H., NÖTZLI M., BIGLER C., 2016. Drought and frost contribute to abrupt growth decreases before tree mortality in nine temperate tree species. *Forest Ecology and Management*, vol. 382, pp. 51-63.

WEBER P., BUGMANN H., PLUESS A.R., WALTHERT L., RIGLING A., 2013. Drought response and changing mean sensitivity of European beech close to the dry distribution limit. *Trees - Structure and Function*, vol. 27, n° 1, pp. 171-181.

WEISSEN F., 1991. *Le Fichier écologique des essences*. Namur : Ministère de la Région wallonne. DGRNE. 2 volumes : 190 + 145 p.

ZHU X., ZHANG W., CHEN H., MO J., 2015. Impacts of nitrogen deposition on soil nitrogen cycle in forest ecosystems: A review. *Acta Ecologica Sinica*, vol. 35, n° 3, pp. 35-43.

LE HÊTRE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : LE CAS DE LA BELGIQUE (Résumé)

Cet article s'intéresse à la relation entre le Hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et son environnement à l'échelle de la Belgique. L'accroissement radial a été utilisé pour évaluer l'effet des changements globaux, et plus particulièrement du changement climatique, sur le développement et la vitalité du Hêtre depuis le début du XX^{e} siècle. L'accroissement moyen du Hêtre à l'échelle de la Belgique a diminué et sa variabilité a augmenté. Le climat a eu une influence grandissante sur l'accroissement, devenue prépondérante à partir du début des années 1990. Les accroissements de l'ensemble des arbres se sont synchronisés, principalement sous l'effet de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des canicules estivales et des sécheresses printanières. Les résultats sont interprétés sur la base des connaissances sur l'écophysiologie du Hêtre et les conséquences du changement climatique en cours et futur sont discutées.

BEECH CONFRONTED WITH CLIMATE CHANGE – THE CASE OF BELGIUM (Abstract)

This article explores the relationship between beech (*Fagus sylvatica* L.) and its environment on the scale of Belgium. Radial increment is used to assess the effects of global change, particularly climate change, on the development and vitality of beech since the beginning of the 20th century. The average radial increment of beech on the scale of Belgium has decreased while its variability has increased. Climate has had a growing influence on growth and has become the predominant factor since the beginning of the 1990's. The increments of all trees have become synchronised mainly due to the increase in frequency and intensity of summer heat waves and spring droughts. The results are interpreted on the basis of knowledge about the ecophysiology of beech and the consequences of current and future climate change are discussed.