

# Tiré à part article Forêt.Nature

Merci pour votre participation à ce numéro de Forêt.Nature.

La version électronique de votre article est fournie uniquement à usage personnel et ne peut être diffusé largement sans l'autorisation préalable de la rédaction.

En cas d'archivage sur serveur informatique, merci d'indiquer la source originale de la publication comme ceci : « Article paru dans Forêt.Nature : [www.foretwallonne.be](http://www.foretwallonne.be) ».

Abonnez-vous gratuitement au **Forêt-MAIL** sur notre site  
[www.foretwallonne.be](http://www.foretwallonne.be)

Bénéficiez de votre premier abonnement à **Forêt.Nature**  
à moitié prix pour la première année

et abonnez vos **étudiants** au tarif spécial qui leur est réservé :  
16 €/an (4 numéros)

# Dendroécologie du hêtre en forêt de Soignes

Les cernes des arbres nous renseignent sur les changements récents et futurs

Nicolas Latte<sup>1</sup> | Vincent Kint<sup>2</sup> | Thomas Drouet<sup>3</sup> | Valérie Penninckx<sup>3</sup>  
François Lebourgeois<sup>4</sup> | Stéphane Vanwijnsberghe<sup>5</sup> | Hugues Claessens<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Gestion des Ressources Forestières (ULg, GxABT)

<sup>2</sup> Department of Earth and Environmental Sciences (KU Leuven)

<sup>3</sup> Université Libre de Bruxelles (ULB)

<sup>4</sup> AgroParisTech, INRA

<sup>5</sup> Bruxelles Environnement

La dendroécologie apporte un éclairage ciblé sur l'évolution de la délicate relation entre les arbres et leur environnement changeant. Les cernes des hêtres de la forêt de Soignes sont analysés et placés dans le contexte plus large des hêtraies belges.

## RÉSUMÉ

La dendroécologie combine la dendrochronologie et l'écologie forestière. Elle a permis d'analyser les cernes des hêtres de la forêt de Soignes et de comparer les tendances dans le contexte plus large des hêtraies de Belgique.

Depuis la fin des années '70, le hêtre devient de plus en plus sensible au climat, surtout en Soignes. L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses printanières et des canicules ont affecté négativement la croissance annuelle des hêtres. Les prévisions climatiques pour le 21<sup>e</sup> siècle présage une rapide aggravaation.

Les risques encourus par l'essence aboutissent à de nouvelles réflexions sur la gestion de la hêtraie de Soignes. Pour les peuplements existants : une sylviculture dynamique avec des éclaircies fortes et fréquentes afin de limiter la concurrence pour les ressources et favoriser la croissance individuelle des arbres. Pour la régénération des vieilles hêtraies : les remplacer par d'autres essences plus tolérantes ou favoriser le mélange et confiner le hêtre aux surfaces limitées des stations les plus fraîches. Un risque mesuré pourrait être pris en regard du rôle patrimonial des hêtraies cathédrales en Soignes. Toutefois, ce faciès peut être obtenu avec d'autres essences.



## Le contexte de la forêt de Soignes et de son environnement changeant

La forêt de Soignes, fruit de la restauration entreprise à l'époque autrichienne (deuxième moitié du 18<sup>e</sup> siècle), a produit un paysage unique de haute futaie. D'une productivité exceptionnelle, elle est qualifiée de « Hêtraie cathédrale » et est devenue emblématique du patrimoine bruxellois. Cependant, cette forêt est fragile en raison du vieillissement des arbres et de leur hauteur particulièrement importante (jusqu'à 50 mètres pour les plus grands arbres) conjugués à des sols qui ne permettent pas un enracinement optimal (encart 1).

Mais si l'image de la cathédrale qu'évoque la forêt de Soignes est bien en phase avec l'impression grandiose qu'offrent les majestueux piliers qui soutiennent la haute canopée de hêtre, le concept de stabilité intemporelle que l'on associe aux cathédrales ne s'applique pas. La forêt est un être vivant, un écosystème en constante évolution. Tout au long de la vie des hêtraies que l'on connaît aujourd'hui, les changements ont été nombreux et variés :

- les retombées atmosphériques (notamment azotées) liées aux activités humaines ont participé à modifier les propriétés des sols ;
- le climat s'est réchauffé, ce qui s'est traduit, depuis le dernier quart du 20<sup>e</sup> siècle, par la multiplication d'épisodes caniculaires et de sécheresses (encart 2) ;
- les arbres ont grandi jusqu'au déséquilibre, devenant de plus en plus sensibles aux tempêtes (risque de chablis) ;
- les futaies ont vieilli s'approchant de l'âge critique de leur sénescence et de leur effondrement\* ;
- la sylviculture très conservatrice, qui a tenu les hêtraies excessivement denses et sombres au cours du 20<sup>e</sup> siècle, est devenue plus dynamique dans les jeunes peuplements.

Au cours du 21<sup>e</sup> siècle, des changements vont encore survenir. Parmi ceux-ci, le changement climatique, qui est déjà en cours (encart 2), aura, selon toutes les prévisions, un des impacts les plus importants. Pour synthétiser les évolutions les plus probables, on peut retenir des travaux du GIEC quelques tendances manifestes pour la Belgique<sup>2,13</sup> dont les conséquences exactes sur les écosystèmes forestiers restent encore floues :

- une augmentation de la température moyenne annuelle de 2 à 4 °C impliquant un allongement de la période de végétation ;

- une augmentation de la température moyenne estivale de 3 à 4 °C, avec des extrêmes plus accentués se traduisant par une nette augmentation de la fréquence et de l'intensité des canicules ;
- une très légère augmentation des précipitations annuelles, mais avec une répartition saisonnière plus contrastée, plus élevées en hiver (de l'ordre de + 20 %) et plus faibles en été (de l'ordre de - 16 %) ;
- des précipitations plus intenses et violentes, et donc espacées par des épisodes de sécheresse plus marqués ;
- une plus grande fréquence d'accidents climatiques comme les orages violents et les tempêtes.

Parmi ces paramètres, c'est surtout l'augmentation de la température associée au changement du régime des précipitations en période de végétation qui devraient avoir un impact significatif sur le hêtre. En effet, durant la plus grande partie du 20<sup>e</sup> siècle, la hêtraie de Soignes a poussé dans des conditions de température (douce) et d'humidité (constante) favorables. Cependant, une augmentation de la température moyenne en période de végétation de l'ordre de 3 °C placerait le hêtre de Soignes en dehors de sa zone de tolérance à la chaleur et à la sécheresse (figure 1). Dès lors, comment la hêtraie de Soignes va-t-elle réagir à ces nouvelles conditions climatiques ? Quelle adaptation de la gestion doit-on envisager ?


## La sensibilité du hêtre au climat abordée par les largeurs de cernes

Plusieurs indicateurs permettent d'analyser la relation entre l'arbre et son environnement, notamment : (1) la présence/absence de l'espèce, qui se conçoit à l'échelle de grands territoires, par exemple sous la forme de modèles de niche ; (2) la productivité des peuplements, en relation avec les caractéristiques écologiques plus locales (topographie, sol, etc.) ; (3) la croissance annuelle, que l'on peut estimer par la largeur de cerne (dendrochronologie) ; ou encore (4) l'état de santé des arbres, que l'on évalue classiquement à partir de l'état du houppier (défoliation, perte de branches, etc.). Avec une échelle de temps et d'espace qui lui est propre, chaque indicateur apporte une information spécifique quant à l'impact des changements environnementaux sur la dynamique des écosystèmes forestiers.

Dans cette étude, nous avons abordé l'effet de ces changements sur la croissance du hêtre via l'approche dendroécologique, qui combine la dendrochronologie (mesure et datation des largeurs de cernes annuels) à l'écologie forestière<sup>10,14</sup>. La forêt de Soignes a été placée dans le contexte écologique

\* Lorsque les arbres approchent leur limite de longévité, les vieilles hêtraies entrent dans une phase de sénescence qui aboutit en quelques décennies à l'effondrement du peuplement.

## Encart 1. Problématique de la forêt de Soignes en bref

Plus de détails dans l'article de CLAESSENS *et al.* « Quel avenir pour la « hêtraie cathédrale » de Soignes ? Bases de réflexion pour une prise de décision » paru dans Forêt Wallonne n° 120<sup>4</sup>. 



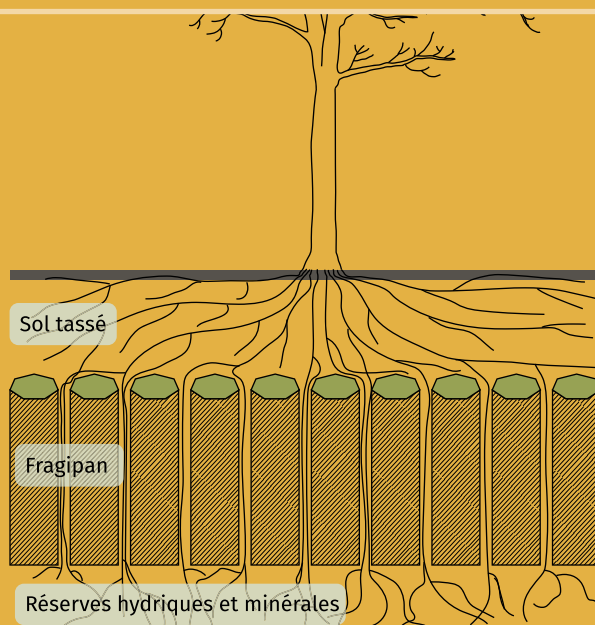
### Productivité exceptionnelle mais risque de chablis

La forêt de Soignes est une hêtraie d'une productivité et d'une hauteur exceptionnelles (10 m<sup>3</sup>/ha/an et 40 à 50 mètres à maturité). Elle est constituée en parcelles de haute futaie, faite d'arbres élancés au fût majestueux. Mais la hauteur atteinte par les arbres les prédispose aux chablis<sup>19,20</sup>.

### Sol riche mais difficilement accessible

Dans leur grande majorité, les sols de Soignes comportent un obstacle à l'enracinement vers 40 à 80 cm de profondeur : le fragipan<sup>9</sup>. Ce limon tassé et compact d'origine périglaciaire agit à la manière d'une dalle imperméable d'une épaisseur d'environ 1 mètre, comportant néanmoins quelques fissures qui permettent aux racines de rejoindre les horizons les plus profonds.

En surface, au dessus de ce fragipan, les sols sont tassés par les anciennes pratiques d'exploitation forestière et la divagation du public dans les sous-bois<sup>9</sup>. Le hêtre est particulièrement sensible au tassement mais si son enracinement surmonte ces difficultés et arrive à pénétrer sous le fragipan (au delà de 1,5 mètre), il a accès à des horizons comportant de grandes réserves hydriques et minérales<sup>6</sup>.



### Une hêtraie vieillissante

Les faciès les plus majestueux de la hêtraie cathédrale sont constitués de très vieux arbres (160 à 220 ans) fragilisés face aux attaques biotiques (champignons, maladies et ravageurs) et abiotiques, notamment les

tempêtes et canicules. Ces aléas peuvent être à l'origine de chablis et de pertes de vitalité, voire de dépérissements, et conduire à l'effondrement progressif des peuplements les plus vieux.



Si les arbres de la forêt de Soignes sont si majestueux, c'est en grande partie grâce à des conditions climatiques favorables au hêtre. Cependant, par rapport aux tolérances écologiques de l'espèce, ces conditions sont aussi limites, proches de l'excès de chaleur et du manque d'eau (figure 1). Ces effets néfastes ont pu jusqu'à un certain point être compensés par l'importante réserve hydrique du sol.

de l'ensemble des hêtraies belges, depuis la Flandre jusqu'au plateau ardennais. Un important jeu de données comportant les séries dendrochronologiques de 286 hêtres (encart 3) issues de recherches réalisées par la KU Leuven<sup>1,8</sup>, l'ULB<sup>17,18</sup> et l'ULg - Gembloux Agro-Bio Tech<sup>11,12</sup> a été rassemblé. Les arbres ont été distribués en deux zones bioclimatiques\* et trois groupes d'arbres. La zone atlantique comprend deux groupes : les hêtres de la forêt de Soignes (99 arbres, dont 15 issus du bois de Hal, sur sol limoneux mais sans fragipan) et les autres hêtres du Nord du sillon Sambre et Meuse (100 arbres, en majorité sur des sols sablonneux ou sableux moins fertiles). La zone submontagnarde est représentée par un seul groupe qui comporte 87 arbres d'Ardenne et d'Ardenne condruzienne. Toutes ces données ont été récoltées selon les standards de l'analyse dendrochronologique<sup>10</sup>.

Au départ des largeurs de cerne de ces hêtres, nous avons analysé :

- la tendance générale de la croissance annuelle au cours du temps, principalement influencée par des changements temporels opérant sur les moyen et long termes (réchauffement climatique, évolution des pratiques sylvicoles, retombées atmosphériques, etc.) ;
- la variabilité interannuelle de la croissance en identifiant les années marquant (« années caractéristiques »). Excepté dans le cas d'événements particuliers (faînée importante, forte éclaircie, etc.), cette variabilité est largement dépendante des

conditions climatiques de l'année en cours, voire de l'année précédente ;

- l'évolution de la sensibilité de l'accroissement avec l'âge (vieillesse des arbres) et au cours du temps (essentiellement causée par le changement climatique) ;
- les paramètres climatiques qui influencent le plus la largeur de cerne.

À partir des résultats de ces analyses, nous avons émis quelques considérations sur la manière d'adapter la gestion de la hêtraie de Soignes au défi climatique.

## Résultats

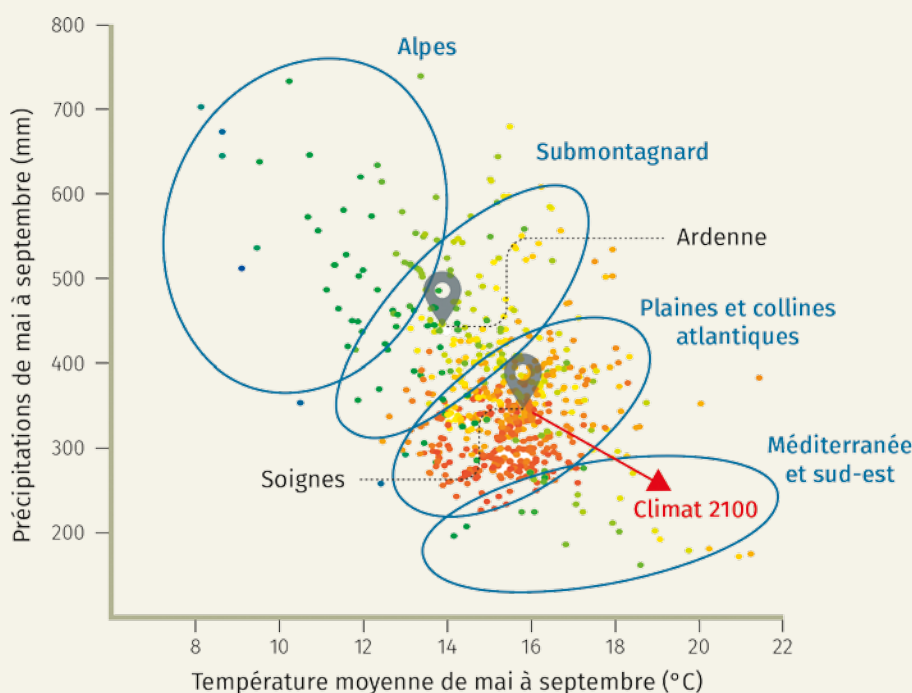
### Tendance générale de la croissance des hêtres au cours du 20<sup>e</sup> siècle

Globalement, la tendance générale de l'accroissement du hêtre, toutes stations confondues, montre une augmentation au cours du milieu du 20<sup>e</sup> siècle, puis une diminution récente depuis l'année 1976, qui constitue une année charnière (figure 2).

À l'échelle de l'Europe, la phase d'augmentation a été attribuée aux effets positifs du réchauffement climatique (températures plus douces et allongement de la période de végétation), des retombées atmosphé-

\* Les valeurs climatiques moyennes de ces deux zones bioclimatiques sont illustrées à la figure 1.

**Figure 1.** Aire bioclimatique du hêtre en Europe et localisation du climat en Soignes (zone atlantique) et à Libramont (Ardenne, zone submontagnarde). La flèche rouge indique la probable évolution du climat en Soignes au cours du 21<sup>e</sup> siècle. La couleur des points indique une altitude croissante du rouge au bleu.



riques azotées (fertilisation) et d'une sylviculture plus dynamique. La phase de diminution n'a été mise en évidence que récemment. Elle résulterait en grande partie de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur et des épisodes de sécheresse<sup>11,12</sup>. En provoquant un déséquilibre édaphique, l'excès de dépôts azotés aurait pu aussi contribuer à cette diminution<sup>8</sup>.

Ensuite, une analyse plus fine, qui distingue les trois groupes, a été menée. Puisque pour un arbre donné, l'accroissement diminue naturellement avec l'âge (encart 3.2) et la circonférence, une difficulté majeure apparaît lorsque l'on souhaite isoler et caractériser les effets des changements environnementaux au cours du temps. Dans ce cas, l'accroissement peut être transformé par une technique particulière (*Regional Curve Standardisation* ou *RCS*) qui a pour finalité de créer une courbe régionale représentant l'accroissement de l'arbre moyen ayant une circonférence constante durant la période de temps considérée (1900-2008). Pour chaque groupe, cet accroissement moyen est ensuite exprimé en pourcentage de la situation moyenne en 1900, de manière à pouvoir comparer les tendances des trois groupes (figure 3).

Pour les groupes « Submontagnard » et « Hors Soignes », on observe une phase d'augmentation de croissance à partir des années '20 suivie d'une phase de diminution à partir des années '60-'70. Pour le groupe de Soignes, l'augmentation est nettement moins marquée, mais la diminution est plus tardive (à partir des années '90).

Le comportement particulier en forêt de Soignes peut probablement s'expliquer par un niveau de fertilité plus élevé<sup>1</sup> qui amortit l'effet des changements, combiné à une sylviculture plus conservatrice qu'ailleurs en zone atlantique.

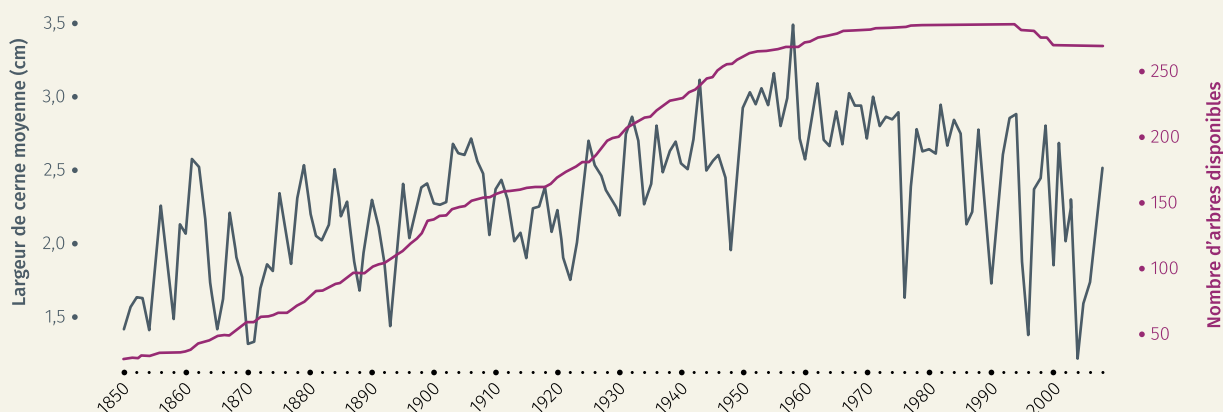
### Variabilité interannuelle de la croissance des hêtres

Les courbes *RCS* permettent de caractériser les changements à moyen et long termes mais ne nous renseignent pas sur la variation interannuelle de l'accroissement, qui, dans le cas du hêtre, est essentiellement guidée par les variations interannuelles du climat. Au départ des indices de cerne (encart 3.2), l'approche des « années caractéristiques » a permis de mettre en évidence les années pour lesquelles l'accroissement a été remarquable pour une majorité des arbres considérés ( $\geq 50\%$ ). Une année caractéristique est négative si l'accroissement est particulièrement faible et positive s'il est particulièrement fort (par rapport à la moyenne sur 5 années, l'année considérée étant centrale).

Pour Soignes, nous avons identifié 1936, 1958 et 1988 comme années de forte croissance, et 1922, 1948, 1976, 1986, 1990, 1996 et 2004 comme années de croissance réduite (figure 4). Ces dernières sont toutes en lien direct avec un climat exceptionnel lors de l'année en cours ou de l'année précédente : canicule, sécheresse, tempête, etc.<sup>7,11,12</sup> Elles sont aussi largement concentrées dans le dernier tiers de la période 1900-2008, de telle sorte qu'elles peuvent être tenues responsables, au moins pour partie, de la phase de diminution globale de croissance observée lors des dernières décennies (figure 3). Le signal est identique quelles que soient les classes d'âge considérées.

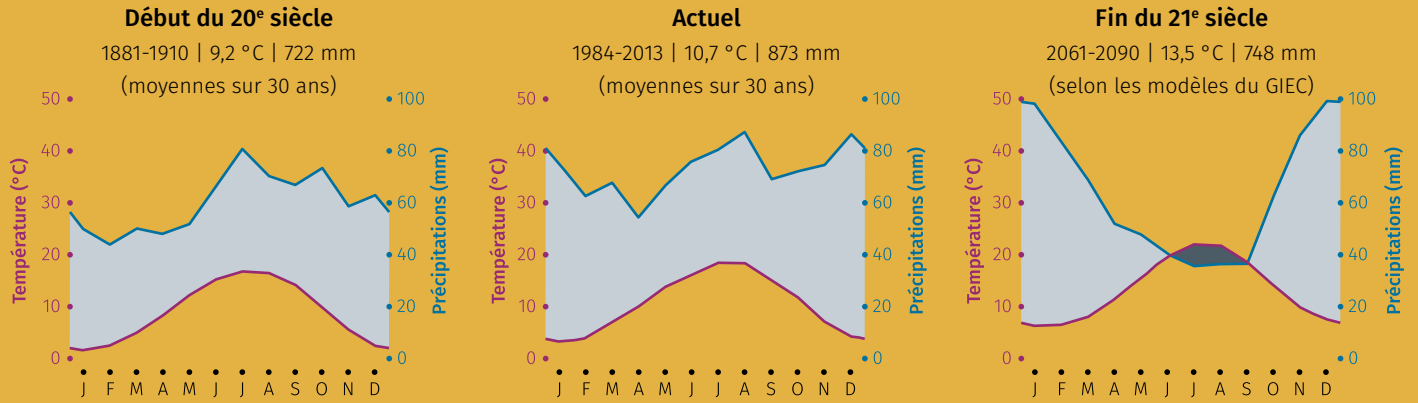
En comparant les indices de cernes des trois groupes, on remarque que, depuis la fin des années '70, la variabilité interannuelle a fortement augmenté et s'est synchronisée à l'échelle de la Belgique, traduisant un comportement de plus en plus semblable des hêtres des différents sites sous l'influence accrue des aléas climatiques.

**Figure 2.** Accroissement radial moyen des 286 arbres du jeu de données.



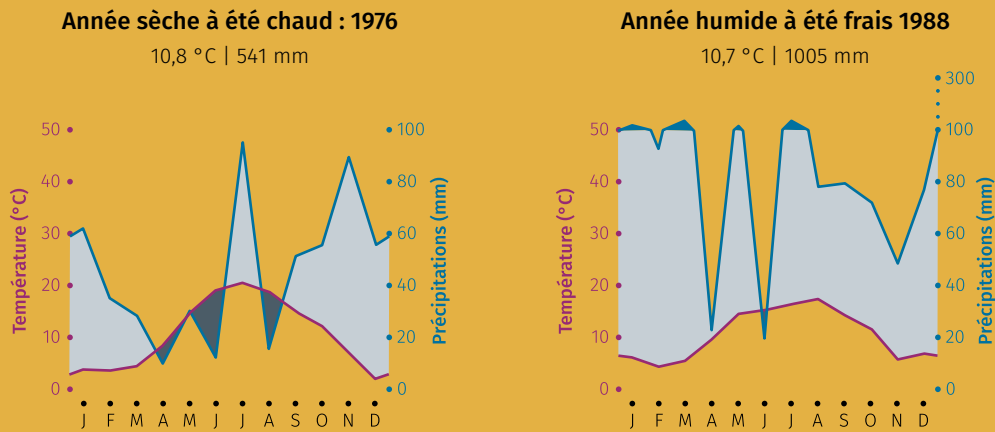
## Encart 2. Le climat de Soignes, ses variations et son évolution au cours du temps

### Évolution du climat moyen en forêt de Soignes durant les 20<sup>e</sup> et 21<sup>e</sup> siècles Altitude : 128 m

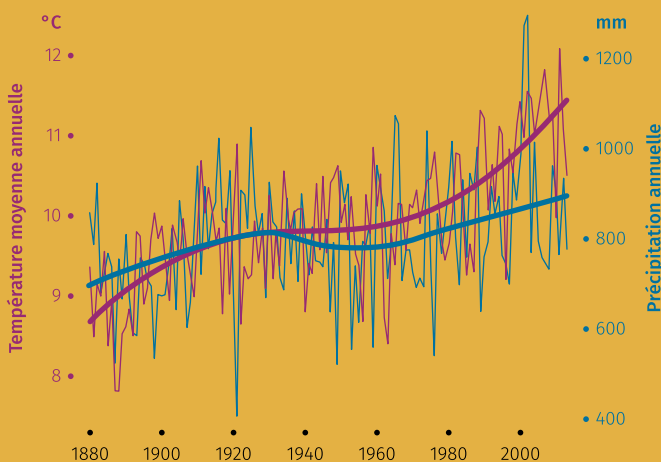


### Variations interannuelles

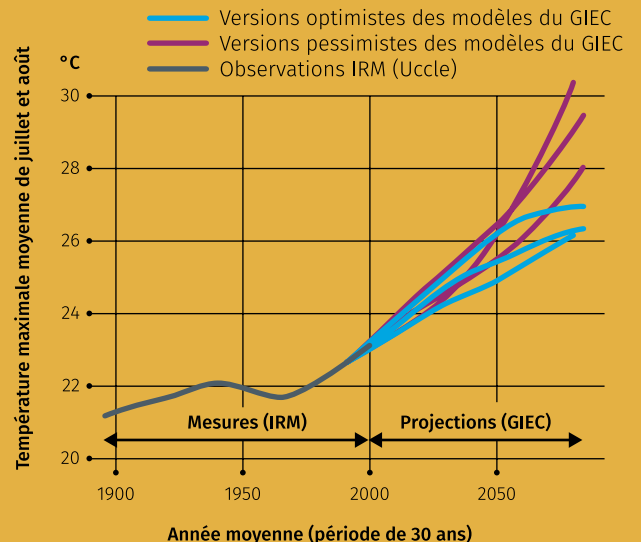
Deux exemples d'années extrêmes qui se sont marquées dans la largeur de cerne des arbres



### Évolution de la température moyenne annuelle et de la précipitation annuelle à Uccle de 1880 à 2013 (période de vie des arbres adultes)






### Évolution future des maxima estivaux (juillet et août) selon les prévisions du GIEC (moyennes sur 30 ans)



## Encart 3. Description du jeu de données dendrochronologiques

### 1. Carte des sites où les hêtres ont été prélevés

-  Sites de la zone atlantique (Soignes non compris)
-  Sites de Soignes
-  Sites submontagnards



35 sites

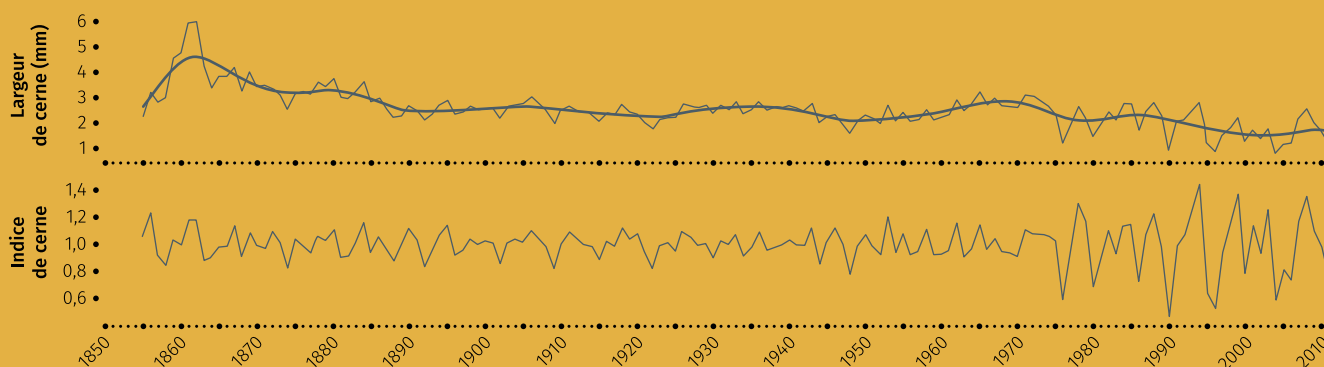
286 arbres

121 ans en moyenne (36 à 212 ans)

### 2. Exemple d'une série dendrochronologique

En haut : **évolution de la largeur** de cerne au cours de la vie d'un arbre du site de Willerieken (forêt de Soignes) depuis 1855 jusqu'à 2011 avec surimposition d'une courbe de tendance. En bas : **indice de cerne** de ce même arbre obtenu par standardisation (rapport entre la largeur de cerne et la

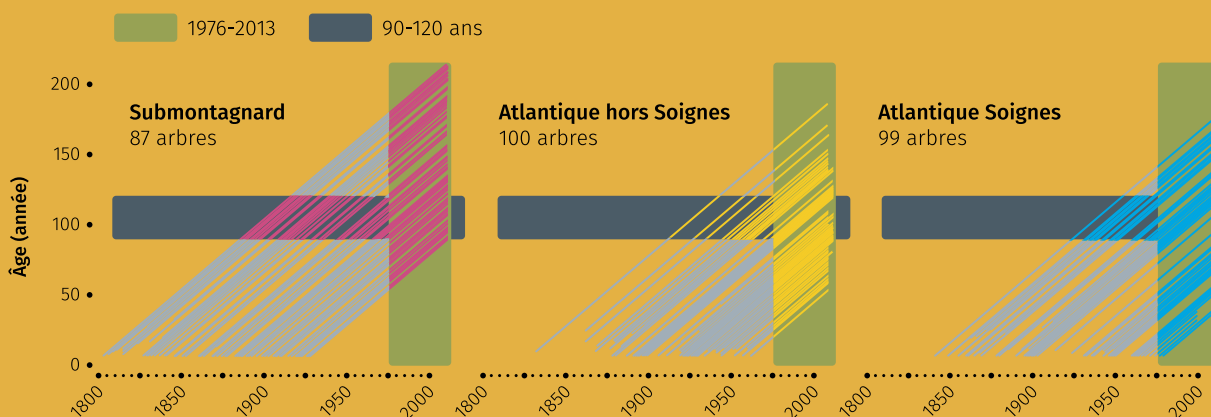
courbe de tendance). La standardisation permet d'extraire des données brutes **la variation annuelle**, souvent considérée comme le « signal climatique ». Notre jeu de données est composé de 286 séries élémentaires de ce type, d'une longueur variant de 25 à 205 ans.



### 3. Représentation schématique du jeu de données et sa répartition en trois groupes

Chaque ligne représente l'évolution de l'âge d'un arbre au cours du temps. Le rectangle vert illustre la période de temps sélectionnée pour l'analyse de la sensibilité des arbres selon

leur âge. Le rectangle gris illustre la classe d'âge sélectionnée (arbres adultes) pour l'analyse de l'évolution de la sensibilité au cours du temps.





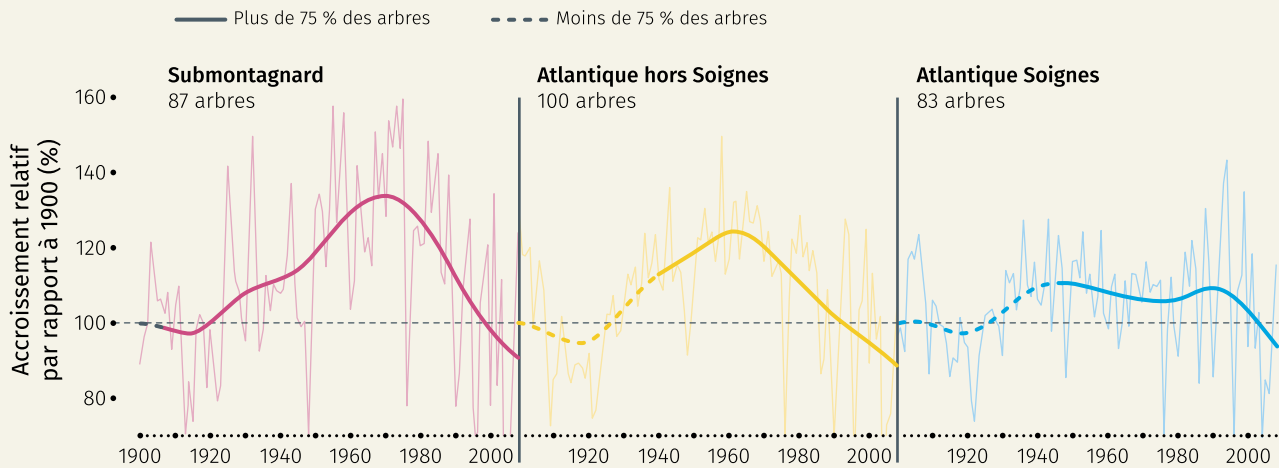


Figure 3. Tendence générale de la croissance radiale des hêtres de 1900 à 2008 (courbes RCS).

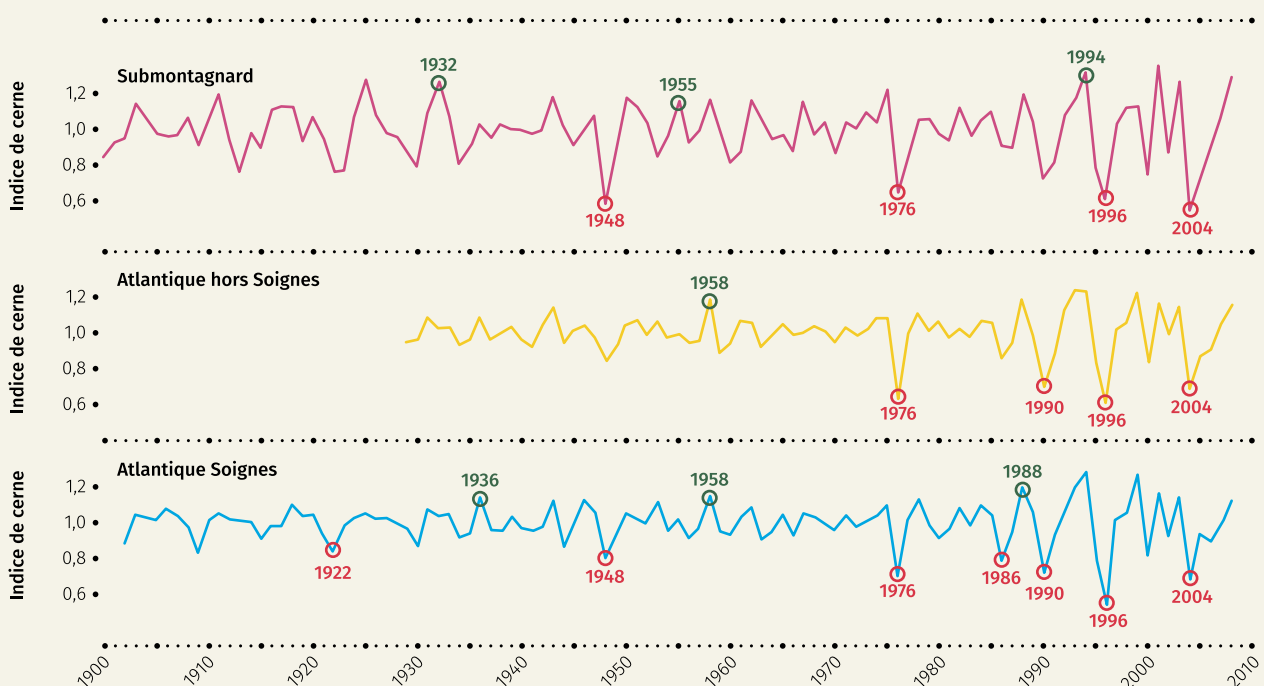
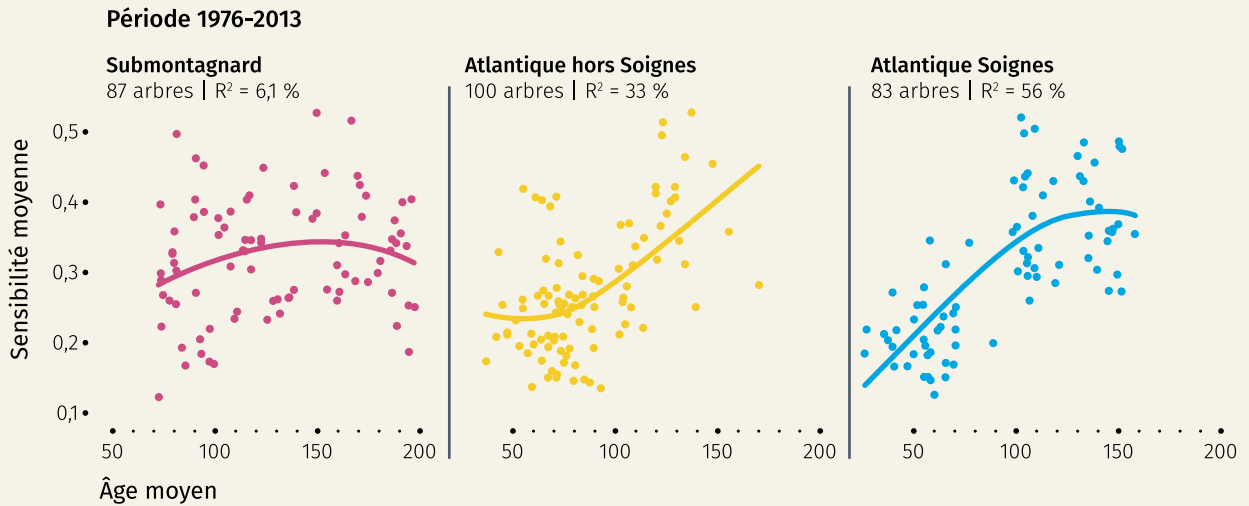


Figure 4. Indices de cerne et années caractéristiques pour les trois groupes de hêtres (en vert : années positives ; en rouge : années négatives).

La variation interannuelle peut aussi être étudiée par l'intermédiaire de la sensibilité moyenne, qui mesure le taux de variation entre deux accroissements consécutifs. Cette sensibilité a été calculée au départ des indices de cerne, afin de maximiser l'expression du signal climatique, sur une fenêtre mobile de 30 ans pour chaque arbre. Afin de dissocier les effets de l'âge et des changements environnementaux (au cours du temps) sur la sensibilité, nous avons sous-échantillonné le jeu de données. L'effet de l'âge a été mis en évidence à partir d'un sous-échantillon basé sur la période de temps 1976-2013 (encart 3.3 : cadre vert), et l'effet des changements environnementaux a été mis en évidence à partir d'un

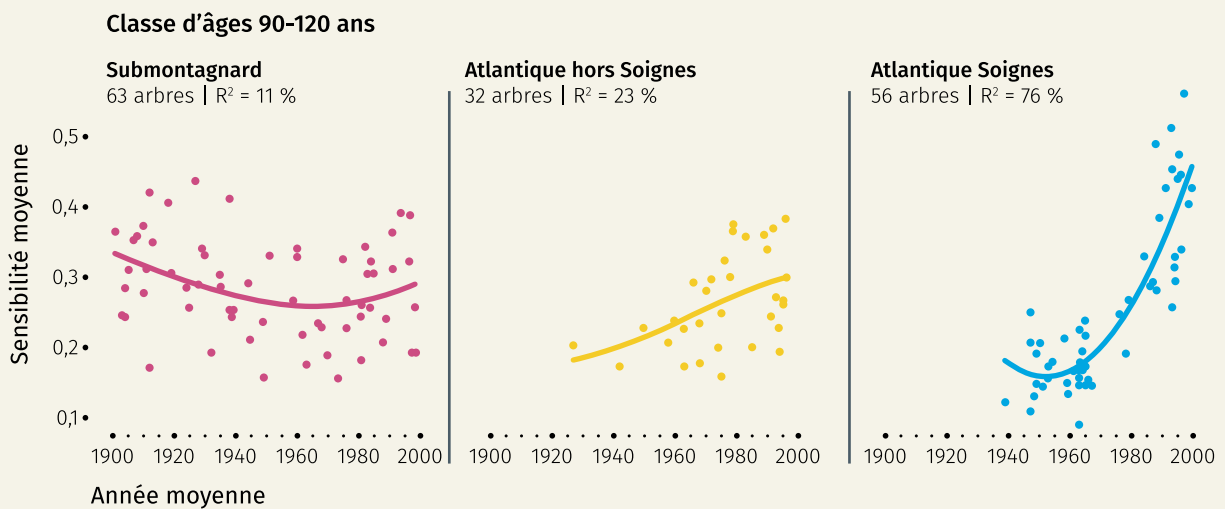
sous-échantillon basé sur la classe d'âge 90-120 ans (arbres adultes ; encart 3.3 : cadre gris). Ces deux sous-échantillonnages ont été définis de manière à englober le plus grand nombre d'arbres possible tout en étant représentatif de la variabilité au sein des trois groupes d'arbres.

Pour les trois groupes, la sensibilité des arbres augmente avec l'âge (figure 5). En Ardenne, la sensibilité culmine vers 150 ans et diminue ensuite. L'augmentation de la sensibilité avec l'âge est un phénomène connu. Par contre, la diminution de la sensibilité des plus vieux arbres peut être associée à une perte de vitalité qui se traduirait par

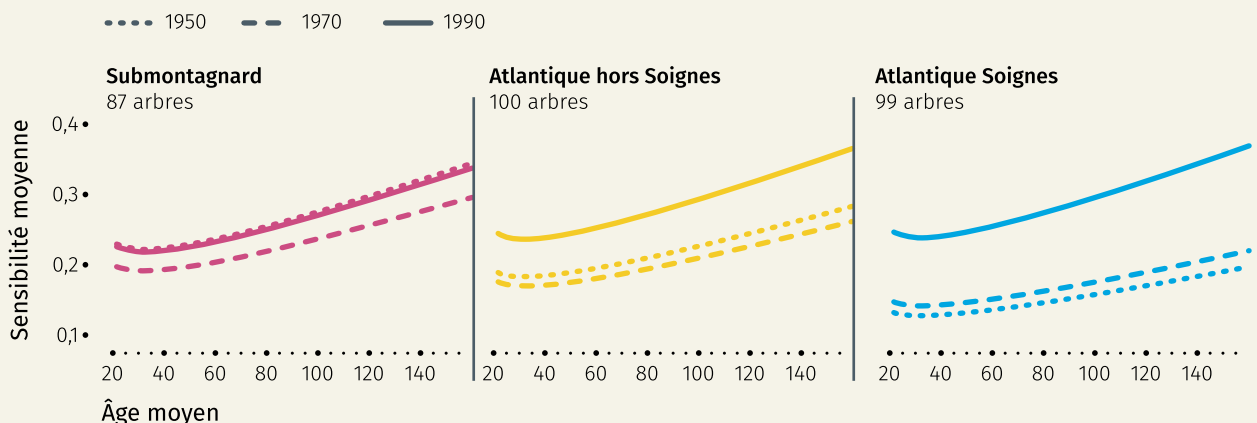


**Figure 5.** Évolution de la sensibilité des arbres en fonction de leur âge (période 1976-2013).

**Figure 6.** Évolution de la sensibilité moyenne des arbres adultes (90-120 ans) au cours du 20<sup>e</sup> siècle. En forêt de Soignes, la sensibilité a fortement augmenté à partir des années '70.



**Figure 7.** Illustration par modélisation des effets combinés de l'âge et des changements environnementaux sur la sensibilité moyenne. En forêt de Soignes, la sensibilité est davantage liée aux changements environnementaux qu'au vieillissement.



un accroissement moins réactif aux variations des conditions de milieu. Dans la zone atlantique, cette hypothèse peut sans doute aussi s'appliquer, mais le nombre d'arbres de plus de 150 ans est insuffisant pour le vérifier.

La sensibilité des arbres adultes (90-120 ans) de la forêt de Soignes a très fortement augmenté depuis la fin des années '70 (figure 6). Par contre, en Ardenne, la sensibilité, plus élevée dès le départ, est restée relativement stable.

Une approche par modélisation permet de distinguer l'effet de l'âge et de celui des changements environnementaux au départ de l'ensemble du jeu de données et pour les trois groupes (figure 7). Ce modèle montre qu'en forêt de Soignes, l'augmentation de la sensibilité due au vieillissement est inférieure à celle causée par les changements environnementaux.

### Impact du climat en forêt de Soignes

La mise en relation des indices de cerne avec les données météorologiques\* de la station de Uccle (cumuls des précipitations, températures minimales et maximales) disponibles depuis 1880 a permis d'identifier les paramètres climatiques, mensuels et pluri-mensuels, qui expliquent le mieux les variations interannuelles de la croissance des arbres de la forêt de Soignes.

On a pu constater que le pouvoir prédictif du climat a fortement augmenté au cours du 20<sup>e</sup> siècle. Globalement, avant 1976, l'accroissement a été essentiellement influencé par le climat de l'année en cours,

en particulier par le manque d'eau au printemps et l'excès de chaleur en juin. Après 1976, l'influence de ces paramètres climatiques a fortement augmenté, et celui des canicules durant l'été de l'année précédente est devenu prépondérant.

Les précipitations printanières (de mars à mai) assurent une bonne humidité du sol et de l'air, favorisant la croissance à un moment crucial. En effet, jusqu'à 80 % de l'accroissement annuel du hêtre est réalisé entre avril et juin. L'effet négatif des canicules en été (cumul des températures supérieures à 25 °C en juillet et août) s'exprime l'année suivante. Durant l'été, lorsque la croissance faiblit, les arbres commencent à accumuler les réserves. En cas de stress marqué, le manque de réserves, utilisées pour le débourrement et l'expansion des feuilles, pénalise l'accroissement au printemps suivant. De plus, les fortes chaleurs en été peuvent induire des faînées qui, lorsqu'elles sont massives, accentuent d'avantage l'épuisement des réserves<sup>11,12</sup>. Les effets physiologiques des stress hydriques et thermiques sont plus amplement décrits à l'encart 4.

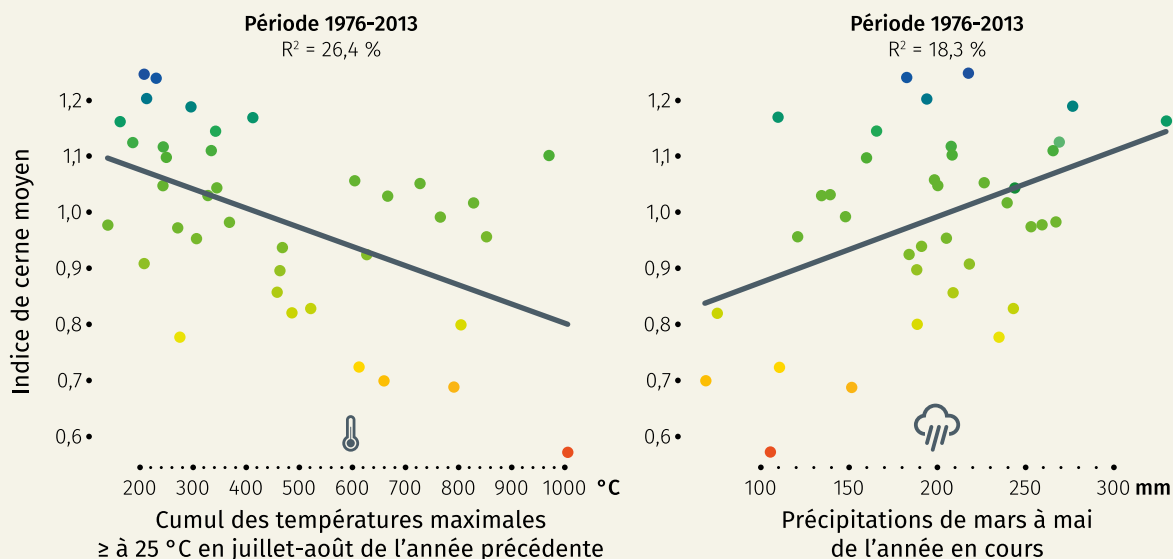
Pour la période 1976-2013, les précipitations printanières et les canicules en été de l'année précédente expliquent à elles seules presque un tiers de la variation de l'indice de cerne (figure 8) et jusqu'à 50 % à partir de 1990, début de la diminution de croissance en Soignes (figure 3). Ces mêmes paramètres climatiques ont déjà été identifiés en Wallonie<sup>11,12</sup> et en Flandre<sup>8</sup>.

### Synthèse

En Belgique, jusqu'à la fin des années '70, le réchauffement progressif du climat général et les retombées atmosphériques azotées ont progressivement favorisé la croissance des hêtres, mais d'une manière moins

\* Méthode « Partial Least Square » (PLS)<sup>11,12</sup>.

**Figure 8.** Variation de l'indice de cerne selon la chaleur estivale de l'année précédente (à gauche) et les précipitations du printemps (à droite). La couleur des points souligne la valeur de l'indice de cerne (période 1976-2013).



importante en Soignes en raison de particularités stationnelles et sylvicoles. Cependant, depuis quelques décennies, l'accroissement du hêtre devient de plus en plus sensible au climat, particulièrement en zone atlantique et surtout en Soignes. L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses printanières et des canicules affecte négativement la croissance annuelle des arbres. De surcroît, ces stress répétés finissent à moyen terme par réduire la croissance globale des arbres.

Jusqu'à présent, aucun seuil critique mettant directement les arbres en danger n'a été atteint, de telle sorte qu'on a toujours pu observer un rétablissement de la croissance lors des années favorables, plus humides et moins chaudes. Malheureusement, pour le 21<sup>e</sup> siècle, les prévisions climatiques ne sont pas à l'avantage du hêtre. L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des canicules va manifestement multiplier les années difficiles (figure 9), tandis que des déficits hydriques extrêmes, jamais atteints dans l'histoire de la hêtraie de Soignes, vont se manifester tôt ou tard (encart 2). Atteindront-ils des valeurs létales ?

En regard de ce risque, l'augmentation naturelle de la sensibilité des arbres au cours de leur vieillissement n'est qu'anecdotique. Les jeunes arbres actuels de la forêt de Soignes sont déjà plus sensibles au climat actuel que les vieux arbres ne l'étaient durant le milieu du siècle passé. On observe donc que la croissance du hêtre de Soignes répond à de nouvelles contraintes climatiques et qu'un déséquilibre s'opère progressivement.

Par contre, en Ardenne, le niveau de productivité des hêtraies a toujours été moindre (de l'ordre de 5 m<sup>3</sup>/ha/an au lieu de 10 m<sup>3</sup>/ha/an en forêt de Soignes), notamment du fait d'une période de végétation plus courte, et de 2 °C moins chaude, et de sols moins profonds et plus pauvres. Malgré un climat moins stressant, la sensibilité des arbres y a toujours été plus élevée, probablement en raison de la plus faible réserve en eau du sol qui s'épuise plus rapidement au cours du printemps. L'Ardenne est donc un contexte sylvicole et écologique différent qui conduit à un autre équilibre entre la hêtraie et son environnement, mais les hêtres y manifestent tout de même globalement les mêmes changements.

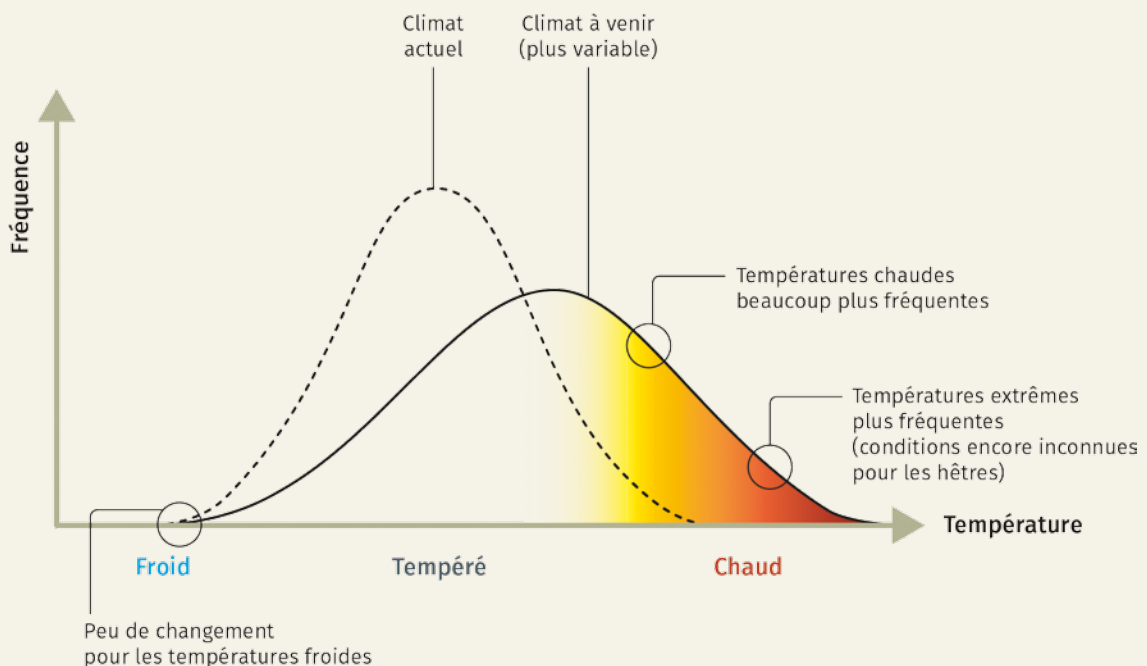
### Qu'en retenir pour la gestion de la forêt de Soignes ?

À l'heure où des pans entiers de la hêtraie cathédrale se rapprochent dangereusement d'un âge critique et doivent être régénérés, il y a lieu de se poser la question du bien fondé de continuer à cultiver le hêtre de manière aussi généralisée en futaies pures. Les résultats de l'étude dendroécologique aboutissent à de nouvelles réflexions sur la gestion de la hêtraie de Soignes.

#### Pour les peuplements existants

Bien qu'ils soient de plus en plus sensibles au climat et qu'en moyenne leur croissance tend à diminuer, les peuplements actuels retrouvent rapidement un bon niveau de croissance après les épisodes clima-

**Figure 9.** Augmentation de la fréquence et de l'intensité des stress induits par le changement climatique (exemple de la chaleur estivale) (d'après MEYN *et al.*<sup>15</sup>).



## Encart 4. Comportement du hêtre face aux stress hydriques et thermiques

Le fonctionnement de l'arbre, en particulier de la photosynthèse, est fondé sur le prélèvement d'eau par les racines, aspirée par la transpiration des feuilles. Ce phénomène produit une colonne d'eau continue depuis les racines jusqu'aux feuilles, qui approvisionne en eau le fonctionnement cellulaire et la photosynthèse. Dans un peuplement forestier, de 20 à 50 m<sup>3</sup> d'eau par hectare transitent ainsi quotidiennement par ces colonnes pour se retrouver dans l'atmosphère.

Ce mécanisme fonctionne bien tant que la demande climatique (estimée à travers l'évapotranspiration potentielle, ETP) n'est pas trop forte et que la disponibilité en eau du sol est suffisante. Mais en cas de température très élevée, l'ETP augmente fortement et met la pression sur l'absorption racinaire. Par ailleurs, en cas de sécheresse, l'apport d'eau insuffisant n'arrive pas à compenser la transpiration des feuilles. La tension est maximale en été lorsqu'il fait chaud et que les arbres ont déjà consommé l'essentiel des réserves en eau du sol au cours du printemps.

Dans les deux cas, un mécanisme de régulation se met en place pour éviter que, suite à ce déséquilibre entre approvisionnement et transpiration, la colonne d'eau ne soit brisée par des bulles d'air (phénomène de cavita-

tion). De petits orifices à ouverture réglable, présents sur les feuilles (les stomates), se ferment et limitent la perte d'eau. Mais en bloquant par la même occasion l'entrée de CO<sub>2</sub>, la fermeture des stomates stoppe la photosynthèse et donc la croissance de l'arbre, tandis que la température de la surface des feuilles s'élève puisqu'elle n'est plus refroidie par la transpiration. Ainsi, des températures caniculaires peuvent induire d'importants dégâts foliaires. Si les conditions de sécheresse ou de fortes chaleurs persistent, les stomates ne pouvant empêcher toute perte d'eau, de la cavitation apparaît dans les vaisseaux conducteurs. Des feuilles flétrissent et se dessèchent, des rameaux peuvent mourir. Si le problème se généralise, cela peut aller jusqu'à la mort de l'arbre.

Le hêtre, qui est une espèce typique des climats tempérés frais et submontagnards normalement bien arrosés, contrôle moins strictement l'ouverture de ses stomates que des espèces plus méridionales, et se situe parmi les espèces sensibles à la cavitation. Les fortes températures et les sécheresses ont donc un effet sur la largeur du cerne, de manière directe par une limitation de la photosynthèse, mais aussi de manière indirecte, en limitant la production des réserves, utilisées notamment au printemps suivant pour la formation des feuilles.

tiques stressants. Ils ne semblent donc pas particulièrement menacés dans l'immédiat, même si, selon les données de l'Observatoire Wallon de la Santé des Forêts, le niveau de défoliation augmente légèrement depuis une décennie

Il convient toutefois d'offrir à ces arbres les meilleures conditions de croissance possible pour qu'ils surmontent au mieux les périodes de stress à venir, que l'on sait incisifs. Une sylviculture dynamique, faite d'éclaircies fortes et fréquentes correspond le mieux à cet objectif. En effet, elle permet de :

- limiter la concurrence entre arbres, chacun disposant dès lors de plus grandes ressources en eau, nutriments et lumière pour se développer en pleine vigueur et mieux résister aux stress de tout genre ;
- dynamiser la croissance individuelle des arbres, menant à une exploitation plus hâtive d'arbres moins hauts, ce qui limite la durée d'exposition des arbres aux risques en général (durée de vie plus courte), et en particulier au risque de chablis lors des tempêtes (arbres moins hauts) (figure 10).

En parallèle, les arbres les plus vigoureux ne présentant pas de défoliation sont à favoriser car il est pro-

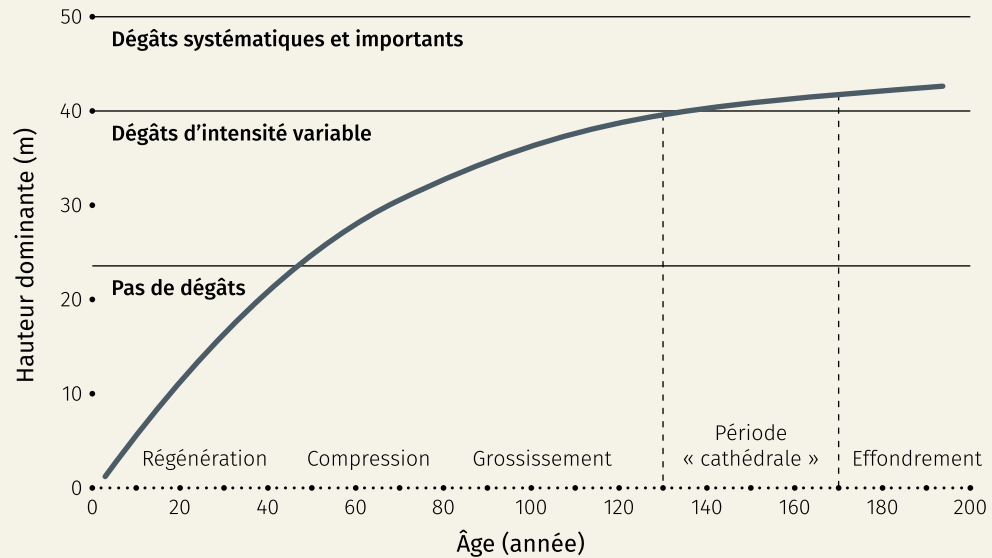
bable qu'ils possèdent des prédispositions génétiques à mieux surmonter les stress<sup>16</sup>. Leur descendance pourrait donc être d'un grand intérêt.

### Régénération des vieilles hêtraies cathédrales de Soignes : avec ou sans hêtre ?

Par contre, la régénération des vieilles « hêtraies cathédrales » doit s'envisager dans une réflexion à plus long terme. En effet, les hêtres que l'on planterait aujourd'hui seraient adultes vers 2115, et si l'on reproduisait les « cathédrales » à l'identique, elles ne se reformeraient qu'à partir de 2150 ! Dès la fin du 21<sup>e</sup> siècle, on peut prévoir que des événements de sécheresse et de canicule d'intensité encore jamais rencontrée se manifesteront. Sur base des projections disponibles, le climat deviendra probablement incompatible avec le bon développement du hêtre, d'autant plus, s'il est cultivé sous la forme d'une « hêtraie cathédrale ». Lors des nouvelles plantations, il n'est donc pas prudent d'encre miser exclusivement sur le hêtre en forêt de Soignes. C'est la notion de « recul raisonné »<sup>3</sup>. Dans un premier temps, une série d'autres espèces plus tolérantes, comme par exemple le chêne sessile et le tilleul à petites feuilles<sup>5</sup>, pourraient le remplacer, voire le soutenir en mélange. En effet, favoriser le mélange



120 km/h



**Figure 10.** Évolution du risque de chablis selon l'âge et le stade sylvicole de la hêtraie de Soignes en cas de vents dépassant 120 km/h (d'après TIMAL et VANWIJNSBERGHE<sup>19</sup>).

est une des recommandations majeures de l'adaptation de la gestion forestière au changement climatique qui permet à la fois de diluer les risques, qui sont différents d'une essence à l'autre, et de profiter des interactions bénéfiques entre essences en matière d'accès aux ressources, de dynamique de régénération et de biodiversité et, dans le cas qui nous occupe, en matière de santé des forêts. Dans une forêt mélangée, le hêtre devrait alors être confiné aux stations qui lui conviennent le mieux, comme les vallons ou les versants frais<sup>5</sup>. La recherche de la meilleure adéquation essence-station est aussi l'un des piliers de l'adaptation des forêts au changement climatique.

## Conclusion

Si l'on revient au cas de l'emblématique « hêtraie cathédrale », à la lumière des résultats de la recherche, il faut donc bien se résoudre à ne plus l'envisager qu'à partir des hêtraies en place. Et cette option comporte aussi, malgré tout, des risques non négligeables, en particulier concernant les chablis. Les prévisions climatiques laissent en effet supposer une augmentation de la fréquence des tempêtes au cours du siècle.

En raison de considérations patrimoniales, un risque raisonné pourrait néanmoins être pris pour tenter de la reproduire à partir de nouvelles plantations, sur des surfaces limitées et seulement dans les stations les plus adéquates. Ce majestueux faciès peut toutefois être obtenu avec d'autres essences mieux adaptées au climat futur. Ainsi, même si le passé

nous a offert un patrimoine exceptionnel, c'est dès à présent qu'il faut innover, faire des choix de politique forestière, en réponse aux évidents changements qui sont en train de s'opérer, tout en tenant compte du contexte socio-économique si particulier de la forêt de Soignes. ■

## Bibliographie

- <sup>1</sup> 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* 312 : 252-259.
- <sup>2</sup> Agence Wallonne de l'air et du climat (2011). *L'adaptation au changement climatique en Région wallonne*. Rapport final, 170 p.
- <sup>3</sup> Badeau V., Breda N., Leadley P. (2012). Regards croisés sur l'avenir des forêts françaises face au changement climatique. *Symbiose* 4 : 10-11.
- <sup>4</sup> Claessens H., Langhor R., Drouet T., La Spina S., Jonard M., Vincke C., Ponette Q., Vanwijnsberghe S. (2012). Quel avenir pour la « hêtraie cathédrale » de Soignes ? Bases de réflexion pour une prise de décision. *Forêt Wallonne* 120 : 3-21.
- <sup>5</sup> Daise J., Vanwijnsberghe S., Claessens H. (2011). Analyse de l'adéquation actuelle et future des arbres à leurs stations en forêt de Soignes bruxelloise. *Forêt Wallonne* 110 : 3-21.
- <sup>6</sup> Drouet T., Herbauts J., Demaiffe D. (2015). Influence of deep soil horizons on Ca nutrition of forest stands along a loessic soil sequence. *Plant and Soil* 394(1-2) : 373-389.

- <sup>7</sup> Institut Royal Météorologique (2000). Les événements météorologiques marquants depuis le début du 20<sup>e</sup> siècle. [www.meteo.be/meteo/view/fr/1078912-Evenements+marquants+depuis+1901.html](http://www.meteo.be/meteo/view/fr/1078912-Evenements+marquants+depuis+1901.html) (consulté le 01/01/2015). 
- <sup>8</sup> 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* 115(2) : 343-363.
- <sup>9</sup> Langohr R. (2010). Quelques facteurs édaphiques dans l'écosystème forêt de Soignes. *Forêt Wallonne* 105 : 3-14. 
- <sup>10</sup> Latte N., Debruxelles J., Sohier C., Degré A., Claessens H. (2012). La dendroécologie : un outil pour affiner nos connaissances sur l'autécologie des essences forestières. *Forêt Wallonne* 116 : 3-17. 
- <sup>11</sup> Latte N., Lebourgeois F., Claessens H. (2015). Increased tree-growth synchronization of beech (*Fagus sylvatica* L.) in response to climate change in northwestern Europe. *Dendrochronologia* 33 : 69-77.
- <sup>12</sup> Latte N., Lebourgeois F., Claessens H. (2015). Growth partitioning within beech trees (*Fagus sylvatica* L.) varies in response to summer heat waves and related droughts. *Trees* : 1-13 (doi:10.1007/s00468-015-1288-y).
- <sup>13</sup> Laurent C., Perrin D., Bemelmans D., Carnol M., Claessens H., de Cannière C., François L., Gérard É., Grégoire J.-C., Herman M., Marbaix P., Ponette Q., Quévy B., Sérusiaux É., Vincke C. (2009). *Le changement climatique et ses impacts sur les forêts wallonnes. Recommandations aux décideurs et aux propriétaires et gestionnaires*. Rapport de recherche externe, Ministre de l'Agriculture, de la ruralité, de l'environnement et du tourisme, 44 p.
- <sup>14</sup> Lebourgeois F., Merian P. (2012). *Principes et méthodes de la dendrochronologie*. Lefob Inra-Engref, 85 p. 
- <sup>15</sup> Meyn A., Buhk C., White P.S., Jentsch A. (2007). Environmental drivers of large, infrequent wildfires : the emerging conceptual model. *Progress in Physical Geography* 31(3) : 287-312.
- <sup>16</sup> Nanson A. (2012). Le hêtre : génétique et capacités d'adaptation. *Silva Belgica* 119 : 30-38.
- <sup>17</sup> Penninckx V. (2001). *Utilisation du hêtre (Fagus sylvatica L.) et du chêne pédonculé (Quercus robur L.) en tant que bioindicateurs de l'évolution de l'environnement forestier. Approche dendroécologique et dendrochimique*. Thèse de doctorat, ULB, 285 p.
- <sup>18</sup> Penninckx V., Meerts P., Herbauts J., Gruber W. (1999). Ring width and element concentrations in beech (*Fagus sylvatica* L.) from a periurbanforest in central Belgium. *Forest Ecology and Management* 13(1) : 23-33.
- <sup>19</sup> Timal G., Vanwijnsberghe S. (2009). La sylviculture de la forêt de Soignes. In : *La forêt de Soignes, Connaissances nouvelles pour un patrimoine d'avenir*. Mardaga, Wavre, 105-114.
- <sup>20</sup> Timal G., Vanwijnsberghe S. (2015). Développement d'une stratégie de régénération en futaie régulière tenant compte de la stabilité, de l'état sanitaire et de l'âge des peuplements : le cas de la hêtraie sonienne bruxelloise. *Forêt Wallonne* 134 : 3-22. 

## POINTS-CLEFS

- ▶ L'analyse des cernes de 286 hêtres répartis dans 35 sites en Belgique permet de comparer l'évolution de la croissance et de la sensibilité climatique en Soignes avec les autres régions.
- ▶ À partir des années '70, des changements marqués ont eu lieu, principalement sous l'influence accrue du climat.
- ▶ Vu l'évolution du climat, une sylviculture dynamique est préconisée pour les peuplements en place. À terme la transformation est nécessaire.
- ▶ Le faciès « cathédrale » peut être maintenu avec un risque mesuré et sur des surfaces limitées, ou obtenu avec d'autres essences.

Cette recherche a été menée grâce aux financements de Bruxelles Environnement-IBGE et de l'Accord-cadre de recherches et de vulgarisation forestières (SPW, DGO3, DNF). Elle a bénéficié de l'appui des gestionnaires forestiers des différents sites d'étude qui ont mis à disposition les arbres pour y prélever les échantillons nécessaires.

**Crédits photos.** Forêt Wallonne asbl (p. 24), S. Vanwijnsberghe (p. 26 haut), UGent (p. 26 bas gauche), N. Latte (p. 26 bas droite).

**Nicolas Latte**<sup>1</sup>

**Vincent Kint**<sup>2</sup>

**Thomas Drouet**<sup>3</sup>

**Valérie Penninckx**<sup>3</sup>

**François Lebourgeois**<sup>4</sup>

**Stéphane Vanwijnsberghe**<sup>5</sup>

**Hugues Claessens**<sup>1</sup>

[nicolas.latte@ulg.ac.be](mailto:nicolas.latte@ulg.ac.be)

<sup>1</sup> Gestion des Ressources forestières (ULg, GxABT)  
Passage des Déportés 2 | B-5030 Gembloux

<sup>2</sup> Department of Earth and Environmental Sciences  
(KU Leuven)

Celestijnenlaan 200E - bus 2411 | B-3001 Leuven

<sup>3</sup> Écologie végétale et Biogéochimie (ULB)  
Boulevard du Triomphe - CP244 | B-1050 Bruxelles

<sup>4</sup> Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois  
(AgroParisTech, INRA)

14 rue Girardet | F-54042 Nancy

<sup>5</sup> Bruxelles Environnement

Avenue du Port 86C - 3000 | B-1000 Bruxelles