



Déployer des réseaux de dendromètres pour évaluer la résilience des forêts face aux changements climatiques

Violette Van Keymeulen | Lorna Zeoli | Arthur Gilles | Marie-Pierre Tasseroul | Alexandre Ernst de Bunswyck
Marjane Kaddouri | Gauthier Ligot | Hugues Claessens | Tom De Mil
Gestion des ressources forestières (Gembloux Agro-Bio Tech, ULiège)

Plusieurs recherches menées par Gembloux Agro-Bio Tech reposent sur l'utilisation de dendromètres à point automatiques. Comment fonctionnent-ils et quelles sont les possibilités offertes par cette technologie ?



Dans le contexte des changements climatiques, identifier les essences forestières à privilégier pour assurer la pérennité des services écosystémiques et conserver le couvert forestier impose des choix cornéliens face auxquels les forestiers sont de plus en plus démunis. Fort de ce constat, il est crucial d'approfondir nos connaissances sur le comportement des essences forestières face aux aléas climatiques. Par exemple, comment s'adaptent-elles aux modifications de la saisonnalité ? Comment supportent-elles les sécheresses et les canicules ? Pour y répondre, la croissance radiale des arbres est un des angles d'analyse pertinents. À cette fin, les dendromètres automatiques permettent justement de disposer de données de croissance avec une très haute précision, de l'ordre du micron (soit un millième de mm) et avec une haute résolution temporelle pouvant aller jusqu'à la minute. Ils permettent dès lors d'étudier de manière fine l'impact de la météo journalière ou d'évènements climatiques stressants, de différentes pratiques sylvicoles ou encore de mélanges d'essences sur la croissance des arbres. Cette technologie est prometteuse pour mieux comprendre le comportement des différentes essences forestières face aux aléas climatiques et à partir de là, mieux guider les choix d'essences à favoriser.

Les dendromètres automatiques

Du grec ancien δένδρον, *déndron* (arbre) et μέτρον (*métron*), les dendromètres désignent l'ensemble des instruments de mesure permettant d'évaluer la grosseur et la hauteur des arbres. Dans le sens commun, les dendromètres désignent donc tant les *Suntoo* et les *Blume Leiss* que les compas forestiers ou les relascopes de Bitterlich. Avec l'essor des technologies liées aux capteurs, au stockage de données et à la miniaturisation du matériel informatique, de nouveaux types de dendromètres plus sophistiqués ont vu le jour. Ces dendromètres – appelés dendromètres automatiques ou enregistreurs – permettent un enregistrement en temps réel de l'évolution de la

circonférence des arbres et stockent directement les données dans l'appareil de mesure ou les transfèrent sur un serveur délocalisé. On distingue deux grands types de dendromètres automatiques : les dendromètres à bande et les dendromètres à point.

Les dendromètres à bande se présentent sous la forme d'un arceau métallique apposé sur le pourtour du tronc. Cet arceau est relié à un ressort dont l'expansion et la contraction sont détectées sous forme de tension et ensuite traduits en accroissement en circonférence. Ces dendromètres présentent l'avantage d'être non-invasifs pour l'arbre et de mesurer de manière exhaustive les variations de circonférence sans implications de biais dû à la présence d'un méplat ou de bois de tension. En revanche, en comparaison aux dendromètres à point, l'installation et la maintenance de ce matériel est plus fastidieuse et présente l'inconvénient d'être sensible aux variations d'humidité, ce qui peut entraîner des erreurs de mesure.

Les dendromètres à point, quant à eux, se présentent généralement sous la forme d'un cylindre d'une dizaine de centimètres fixé dans l'arbre à l'aide d'une vis et équipé d'un ressort relié à un potentiomètre apposé sur le tronc (figure 1). Lorsque l'arbre croît, une pression est exercée sur le ressort du potentiomètre et permet de déduire une valeur de croissance. Certains dendromètres à point sont couplés avec un thermomètre et permettent le suivi en parallèle de la température de l'air. Les dendromètres à point présentent l'avantage d'être discrets et simples à installer sur site. Il s'agit néanmoins d'un instrument de mesure invasif,

Le saviez-vous ? L'un des premiers dendromètres automatiques à point a été créé en Belgique en 1965⁴. Néanmoins, leur utilisation ne s'est répandue que bien plus tard, notamment lorsque le coût de fabrication les a rendus plus accessibles.

RÉSUMÉ

Les dendromètres automatiques sont des instruments de mesure permettant de suivre en temps réel la croissance des arbres à une échelle de résolution très fine, de l'ordre du micromètre. Ces données ouvrent la porte à une large gamme de recherches en autécologie, écophysiologie et phénologie de la croissance des arbres, etc. En particulier, en couplant les données de croissance avec des données stationnelles et météorologiques, les dendromètres permettent de mieux comprendre le comportement des essences forestières face aux aléas climatiques et d'en déduire des recommandations de gestion fores-

tière. Cet article dresse un portrait de cette technologie et présente sommairement quatre recherches entamées à la faculté de Gembloux Agro-Bio Tech qui s'appuient sur ce type de données : la croissance du bouleau verruqueux selon la disponibilité en eau des stations qu'il occupe, la modélisation de la croissance de l'épicéa en tenant compte du climat et du statut social de l'arbre, la résilience de différentes essences forestières d'avenir face aux aléas climatiques, et la saisonnalité de la croissance des arbres en forêt tropicale.

puisqu'il est vissé dans le tronc, qui permet seulement une mesure de la croissance localisée. À l'Université de Liège, les dendromètres à point, qui peuvent être plus facilement déployés en nombre pour un coût limité ont été préférentiellement utilisés. Dans la suite de cet article et par soucis de confort de lecture, les mentions « dendromètres » feront implicitement référence aux dendromètres à point automatiques.

Les dendromètres permettent d'obtenir des informations à différentes échelles de résolution temporelles. De plus, l'agrégation des données de croissance au fil des jours, des mois, des saisons et des années permet d'analyser le comportement des arbres face à différents facteurs environnementaux ou sylvicoles comme la température, l'humidité, le statut social ou encore les éclaircies et détourages.

En particulier, les dendromètres permettent d'évaluer la dynamique diurne et nocturne de la physiologie des arbres. En début de journée, les stomates des plantes s'ouvrent pour permettre la libération d'eau et d'oxygène tout en captant du dioxyde de carbone. Au cours de cette période, les racines ne compensent pas les pertes en eau causées par la transpiration et les

tissus végétaux se contractent en réponse au déficit hydrique créé. En fin d'après-midi ou en début de soirée, les stomates se ferment et les tissus végétaux se dilatent sous l'influence de la réabsorption d'eau par les cellules végétales. En parallèle à ce phénomène de gonflement-retrait causé par les fluctuations en eau dans les tissus, on distingue également un phénomène de croissance non réversible dû à l'activité cambiale (figure 2). La capacité des dendromètres automatiques à détecter des variations de croissance de l'ordre du micron permet d'observer ces phénomènes de contraction, de dilatation et de croissance tout au long de la journée.

Quelques axes de recherches liés aux dendromètres

Les principaux domaines de recherche qui mobilisent des dendromètres concernent l'écophysiologie (c'est-à-dire la science qui étudie les réponses comportementales et physiologiques des organismes à leur environnement) et la phénologie de la croissance (la science qui étudie la saisonnalité de la croissance des plantes en fonction du climat). Les dendromètres permettent par exemple d'étudier les relations eau-arbre à travers les fluctuations journalières de croissance et d'identifier les épisodes de stress subis par les végétaux. Lorsque les données sont étudiées durant plusieurs années successives, ils permettent également

Le saviez-vous ? Les arbres grossissent la nuit et peuvent mincir la journée⁹.

Figure 1. Dendromètre automatique à point.



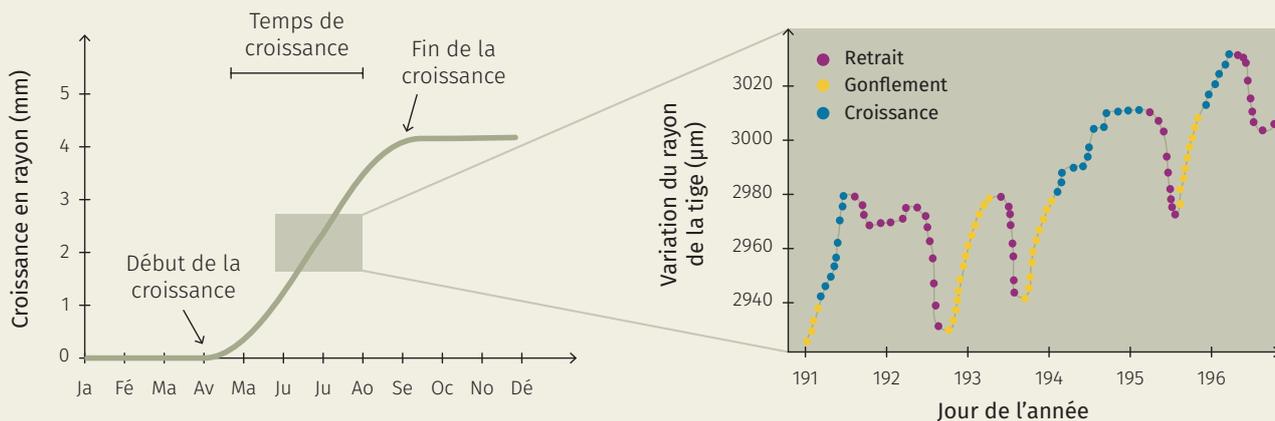


Figure 2. Illustrations du signal de croissance enregistré par un dendromètre à point.

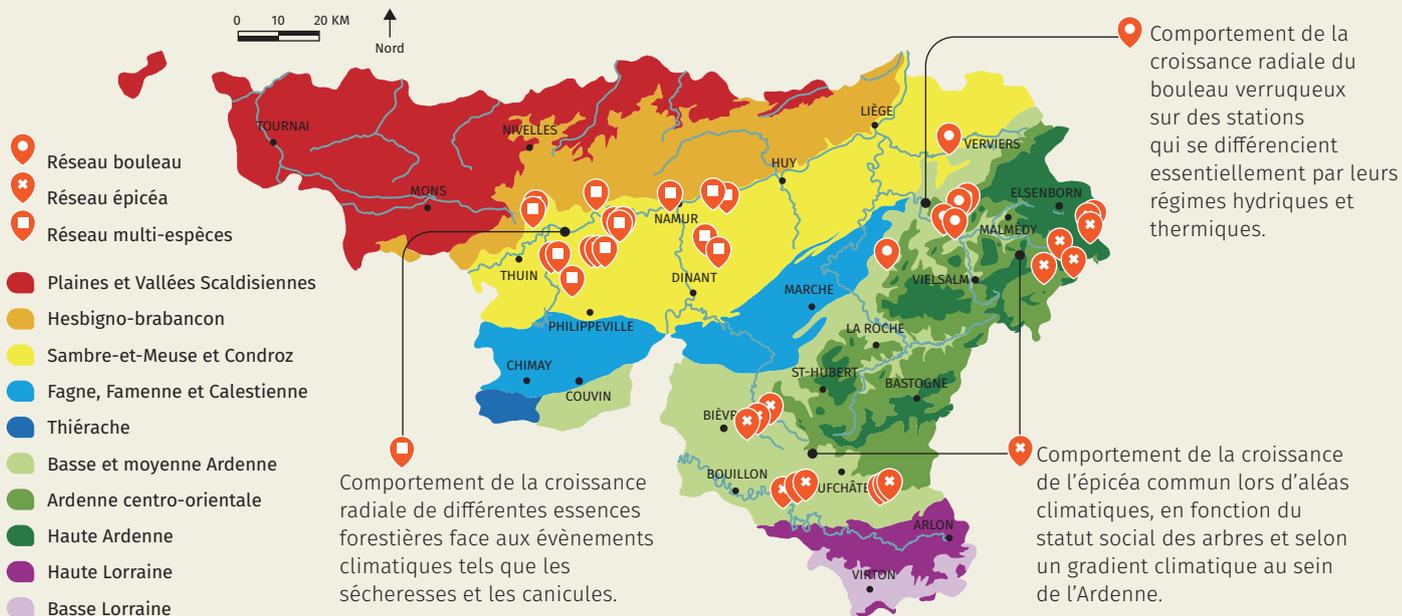


Figure 3. Différentes « grappes » de dendromètres installées par Gembloux Agro-Bio Tech en forêt wallonne, correspondant aux différents axes de recherche.

d'identifier la croissance saisonnière et en particulier, la date de début et de fin de formation du bois.

Les chercheurs s'intéressent également à la résilience des arbres face aux aléas climatiques ainsi qu'à l'impact de différents traitements sylvicoles sur la productivité et les flux de carbone. Par exemple, des études montrent comment un climat plus chaud et sec affecte la saison de végétation, le stockage de carbone et la productivité des arbres⁶, tandis que d'autres analysent l'impact de différentes intensités d'éclaircies sur la réduction du stress hydrique des arbres³ ou

sur la croissance des arbres dans différents contextes de statut social⁷. Des dendromètres ont également été utilisés pour identifier les déterminants climatiques des modifications de circonférence des arbres⁸.

Recherches en cours

Plusieurs axes de recherche développés à Gembloux Agro-Bio Tech (ULiège) s'appuient sur la technologie des dendromètres (figure 3) et sont présentés dans les encarts suivants. ■

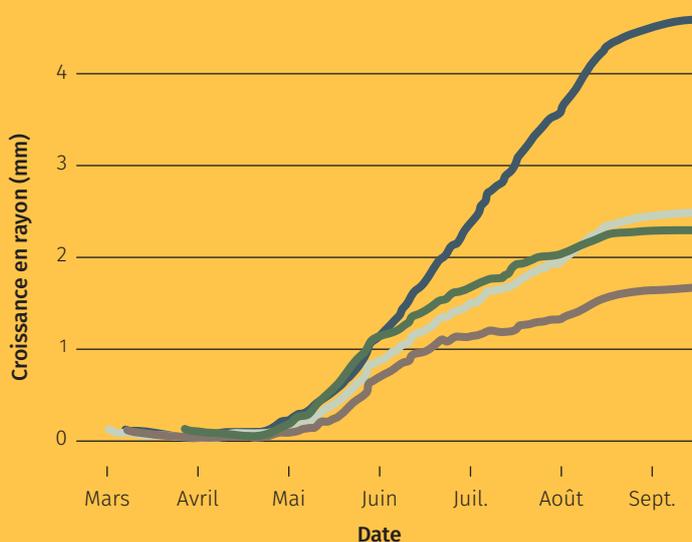
Saisonnalité de la croissance du bouleau verruqueux en fonction de la disponibilité en eau de la station

Le bouleau, dont la ressource est en plein développement et dont le bois possède des caractéristiques technologiques remarquables, apparaît comme une essence d'avenir². Reste à savoir s'il sera capable de s'adapter aux changements climatiques d'Europe occidentale. En parallèle à une analyse dendrochronologique à l'échelle européenne, l'installation d'un dispositif de dendromètres sur différentes stations contrastées par leur disponibilité en eau devrait permettre d'appréhender le niveau de stress subi par le bouleau lors d'épisodes climatiques extrêmes et d'en déduire sa capacité d'adaptation aux changements climatiques.

Évolution de la croissance radiale moyenne des bouleaux en fonction du type de station pendant la période de végétation 2023.

Comme on pouvait s'y attendre, la croissance des bouleaux installés sur une terrasse alluviale ne faiblit pas pendant la période estivale.

- Fond de vallée
- Plateau
- Versant nord
- Versant sud



Objectif

Caractériser l'effet de la disponibilité en eau sur la croissance en lien avec la phénologie des feuilles

Espèce

Bouleau verruqueux (*Betula pendula*)

Zone d'étude

Basse Ardenne

Critères de sélection des sites

- Facteur contrôlé : mésoclimat (altitude entre 300 et 400 mètres)
- Facteur étudié : disponibilité en eau de la station via quatre types de station (fond de vallée, versant Nord, plateau, versant Sud)
- Peuplements ou groupes purs et équiennes de bouleaux
- Arbres en pleine croissance, au stade de grossissement

Critères de sélection des arbres

- Bon état sanitaire
- Dominants ou co-dominants

Nombre de sites

8 (2 répétitions par type de station)

Nombre d'arbres par site

9 à 10

Nombre de dendromètres

78

Mesures complémentaires

Suivi par caméras phénologiques pour établir le lien entre la croissance radiale, le débourrement, l'éventuel jaunissement des feuilles et les variables climatiques

Financement

F.R.S-FNRS ; Plan quinquennal de recherches et vulgarisation forestières

Chercheuse

Lorna Zeoli

Modélisation fine de la croissance radiale de l'épicéa

Avec plus de 2 millions de mètres cubes de bois produits annuellement sur 126 000 hectares de forêts, l'épicéa est la première ressource en bois de la forêt wallonne⁵. Prévoir finement la disponibilité de cette ressource au cours du temps est essentiel pour l'industrie et la politique forestière. Cette démarche fait appel à la modélisation de la croissance au cours du temps, qui est jusqu'à présent basée sur les données de l'Inventaire permanent des ressources forestières de Wallonie (IPRFW). Pour prendre en compte l'effet des changements climatiques dans ces modèles, il faut désormais y inclure

les événements climatiques. Les mesures issues des dendromètres devraient améliorer les prévisions des modèles.

Parallèlement, ces modèles pourront aussi affiner les connaissances sur l'autécologie de l'épicéa, voire sur la sensibilité de cette espèce aux attaques de scolytes, en fonction des événements qui se produiront au cours de la période de fonctionnement des dendromètres, estimée théoriquement à une dizaine d'années.

Objectif

Modéliser la croissance radiale de l'épicéa, selon l'altitude de la station et le statut social de l'arbre

Espèce

Épicéa commun (*Picea abies*)

Zone d'étude

Ardenne

Critères de sélection des sites

- Facteur d'étude : gradient altitudinal (290 à 690 mètres)
- Stations favorables
- Peuplement de 45 à 55 ans

Critères de sélection des arbres

- Bon état sanitaire
- Facteur d'étude : statuts sociaux variés (de dominés à dominants)

Nombre de sites

15

Nombre d'arbres par site

6

Nombre de dendromètres

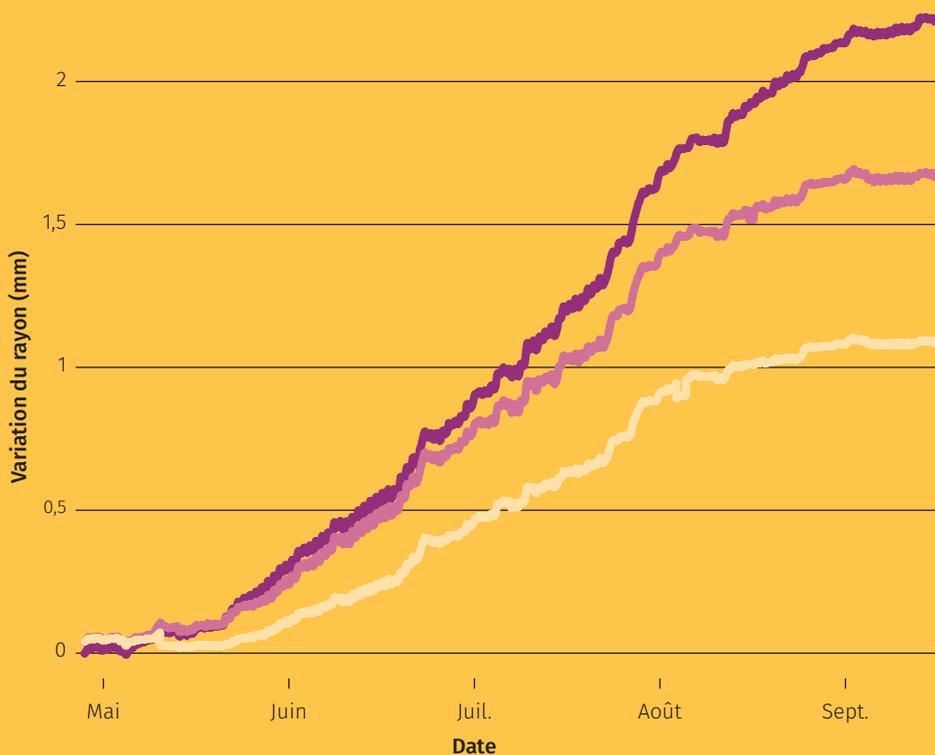
90

Financement

Plan quinquennal de recherches et vulgarisation forestières

Chercheurs

Arthur Gilles et Jérôme Perin



Variation du rayon d'épicéas selon leurs statuts sociaux (sur base des données brutes de l'année 2023 issues des dendromètres situés entre 290 et 450 mètres d'altitude).

À première vue, la période de croissance semble débuter en mai et se terminer début septembre, et la croissance semble plus longtemps soutenue pour les dominants.

Statut

- dominant
- Codominant
- Dominé

Étude comparée de la croissance de différentes essences d'avenir

Au cours du 20^e siècle, la gestion forestière a favorisé essentiellement l'épicéa, les chênes et le hêtre, les trois grandes essences commerciales, qui ont constitué jusqu'à 75 % de la ressource en bois en Wallonie. Les changements climatiques ont montré la faiblesse de cette politique et nous cherchons désormais à diversifier les peuplements pour augmenter leur résilience. Cette étude multi-espèce vise à évaluer le potentiel de développement d'essences actuellement minoritaires mais qui sont considérées comme relativement tolérantes à la sécheresse et aux températures élevées. L'hypothèse est donc qu'il s'agit d'essences qui pourraient améliorer la résilience des forêts produisant du bois d'œuvre. L'étude

est focalisée sur quelques essences peu connues, et les compare à trois essences de référence mieux étudiées.

Dans les choix d'implantation de ce dispositif multi-espèces, la plupart des facteurs de variations ont été contrôlés par l'homogénéité des conditions méso-climatiques, la bonne adéquation stationnelle et la dominance des arbres, laquelle limite les effets de la concurrence sur la croissance radiale et met les arbres en relation relativement étroite avec les conditions climatiques. Il est prévu de répéter ce dispositif dans d'autres contextes écologiques.

Objectif

Caractériser le rythme de croissance radiale de différentes essences peu connues et leur réponse aux événements climatiques tels que les sécheresses et les canicules

Espèces

Facteur d'étude : érable plane (*Acer platanoides*), tilleul à petites feuilles (*Tilia cordata*), bouleau verveux (*Betula pendula*), merisier (*Prunus avium*), pin de Corse (*Pinus nigra corsicana*), chêne rouge (*Quercus rubra*), chêne sessile (*Quercus petraea*), hêtre (*Fagus sylvatica*) et douglas (*Pseudotsuga menziesii*)

Zone d'étude

Zone géographique de faible étendue au sein de la zone bioclimatique de Sambre & Meuse et Condroz

Critères de sélection des sites

Stations favorables aux essences étudiées en termes de disponibilité en eau, en air et en éléments minéraux (adéquation optimale, voire de tolérance selon fichierecologique.be)

Critères de sélection des arbres

- Bon état sanitaire
- Dominants ou codominants
- Pleine croissance, début de la phase de grossissement

Nombre de sites

27 (3 répétitions par essence)

Nombre d'arbres par site

5

Nombre de dendromètres

135

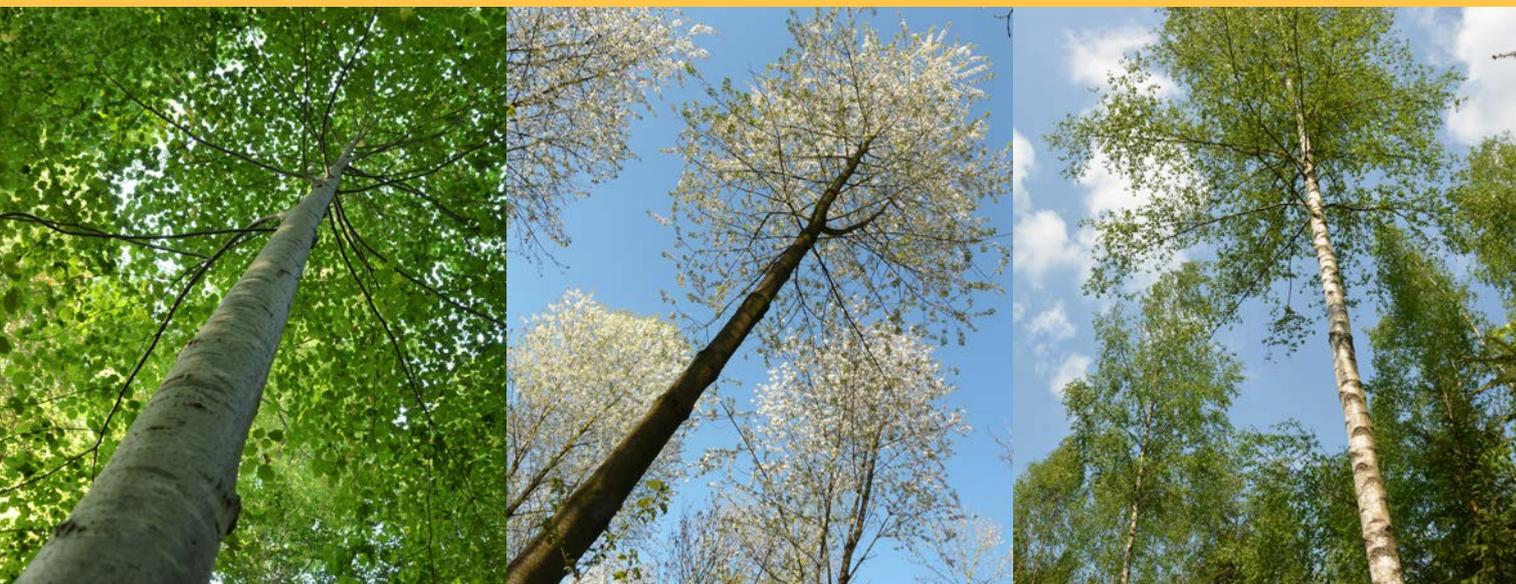
Financement

Interreg WAVE ; Plan quinquennal de recherches et vulgarisation forestières

Chercheurs et chercheuses

Recherche collaborative impliquant les auteurs de l'article, coordonnée par Violette Van Keymeulen

Tilleul, merisier et bouleau.



Saisonnalité de la croissance des arbres en forêt tropicale

Les axes de recherches de Gembloux Agro-Bio Tech ne se limitent pas uniquement aux études en forêt wallonne. En effet, la faculté développe également des recherches en Afrique centrale. Dans une vision plus large de l'utilisation des dendromètres, la forêt tropicale, où la grande diversité de comportements de croissance est peu investiguée, offre un terrain de recherche de choix pour les scientifiques. Contrairement aux forêts tempérées, les forêts tropicales d'Afrique centrale sont structurellement plus complexes et spécifiquement plus riches. De plus, la saisonnalité n'y est pas régie par les températures froides. De ce fait, les dendromètres sont un outil précieux pour l'analyse des divers schémas de

croissance des arbres tropicaux. Afin de mieux comprendre la sensibilité des forêts tropicales d'Afrique centrale à une aridification du climat, le projet CANOPi a vu le jour. L'un de ses volets a pour objectif d'étudier la saisonnalité de croissance et de perte de feuilles des arbres de canopée via l'utilisation de dendromètres et de caméras phénologiques.

Le saviez-vous ? En forêt tropicale, certains arbres mesurent plus de 100 centimètres de diamètre. L'installation de deux dendromètres par pied a donc été nécessaire pour suivre leur croissance.

Objectif

Étudier la saisonnalité du fonctionnement des arbres de canopée des forêts tropicales

Espèce

- 32 espèces à la réserve de la biosphère de Luki
- 20 espèces dans le Parc National de la Lopé
- 7 espèces dans la concession Sud-Estuaire

Zone d'étude

Afrique centrale, Gabon et République Démocratique du Congo

Critères de sélection des sites

- Possibilité d'installation d'une caméra phénologique en direction de la canopée
- Accessibilités des arbres
- Limite du gradient climatique pour la réserve de la biosphère de Luki

Critères de sélection des arbres

- Bon état sanitaire
- Sélection prioritaire des espèces dominantes de la canopée

Nombre de sites

11 parcelles dans trois sites : 5 parcelles à Luki, 5 à Lopé et 1 parcelle à Okala

Nombre d'arbres par parcelle

8 à 14

Nombre de dendromètres

123

Mesures complémentaires

Suivi par caméras phénologiques pour faire le lien entre la croissance radiale, la phénologie foliaire et les variables climatiques.

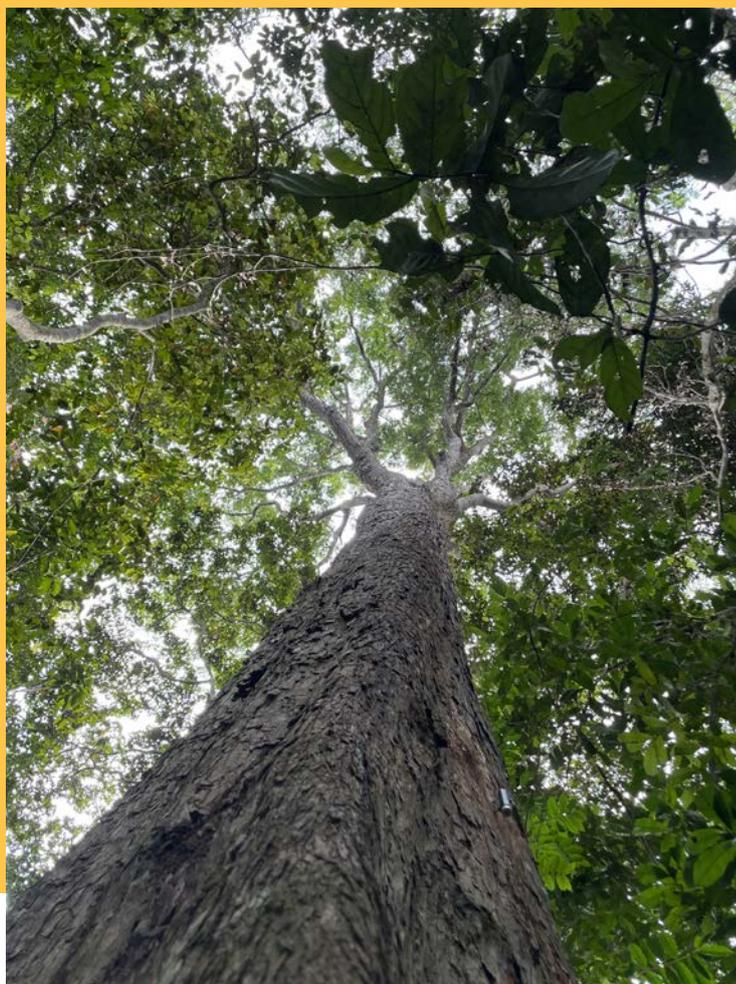
Financement

Projet CANOPi – Excellence of Science EOS (appel conjoint FNRS et FWO)

Chercheuse

Marjane Kaddouri
CANOPi.uliege.be

Dendromètre électronique
TOMST installé sur un
arbre en forêt tropicale.
L'avez-vous trouvé ?



POINTS-CLEFS

- ▶ Les dendromètres automatiques mesurent la croissance des arbres en temps réel à l'échelle du micromètre. Ils disposent d'un enregistreur intégré ou envoient directement les données sur un serveur délocalisé.
- ▶ L'analyse des courbes de croissance révèle les cycles de retrait/gonflement journaliers dus aux flux hydriques dans les tissus végétaux et la croissance des arbres due à l'activité cambiale.
- ▶ Ces données permettent d'observer les épisodes de stress hydrique et d'identifier la saisonnalité de la croissance des essences forestières et leurs déterminants climatiques, sylvicoles ou stationnels.
- ▶ Plusieurs recherches menées à Gembloux Agro-Bio Tech utilisent cette technologie pour étudier la croissance et la phénologie de différentes essences, ainsi que leur résilience face aux changements climatiques.

Financements

Les recherches présentées dans cet article ont notamment bénéficié des financements du Plan quinquennal de recherches et vulgarisation forestières (réseau épicéa), le Fond National pour la Recherche Scientifique (réseau bouleau), l'Union Européenne (projet interreg WAVE, réseau multi-espèce) et le financement Excellence of Science EOS (réseau d'Afrique centrale, projet CANOPi).



Bibliographie

- ¹ Drew D.M., Downes G.M. (2009). The use of precision dendrometers in research on daily stem size and wood property variation : A review. *Dendrochronologia* 27(2) : 159-172.
- ² Dubois, H., Layon, J., Claessens, H. (2023). *Sylviculture du bouleau, l'essence montante de l'Europe occidentale*. Éd. Forêt.Nature, Belgique, 144 p.
- ³ Hirsch A., Chhin S., Zhang J., Premer M. (2023). Effects of Thinning and Climate on Stem Radial Fluc-

tuations of *Pinus ponderosa* and *Pinus lambertiana* in the Sierra Nevada. *Journal of Forest and Environmental Science* 39(2) : 81-95. 

- ⁴ Impens I., Schalck J.M. (1965). A very sensitive electric dendrograph for recording radial changes of a tree. *Ecology* 46 : 183-184.
- ⁵ Lejeune P., Michez A., Perin J., Gilles A., Latte N., Ligoit G., Lisein J., Claessens H. (2022). L'épicéa wallon : État de la ressource en 2021. *Silva Belgica* 2/2022 : 16-23.
- ⁶ Matula R., Knířová S., Vítámvás J., Šrámek M., Kníř T., Ulbrichová I., Svoboda M., Plichta R. (2023). Shifts in intra-annual growth dynamics drive a decline in productivity of temperate trees in Central European forest under warmer climate. *Science of The Total Environment* 905 : 166906.
- ⁷ Olivar J., Rais A., Pretzsch H., Bravo F. (2022). The impact of climate and adaptive forest management on the intra-annual growth of *Pinus halepensis* based on long-term dendrometer recordings. *Forests* 13(6) : 935. 
- ⁸ Szymczak S., Häusser M., Garel E., Santoni S., Huneau F., Knerr I., Trachte K., Bendix J., Bräuning A. (2020). How do mediterranean pine trees respond to drought and precipitation events along an elevation gradient ? *Forests* 11(7) : 758. 
- ⁹ Zweifel R., Sterck F., Braun S., Buchmann N., Eugster W., Gessler A., Häni M., Peters R.L., Walthert L., Wilhelm M., Ziemińska K., Etzold S. (2021). Why trees grow at night. *New Phytologist* 231(6) : 2174-2185. 

Les auteurs remercient l'ensemble des propriétaires privés et le personnel du DNF qui ont permis la mise en place des réseaux de dendromètres. Nous remercions également Boris Lemaigre, Allan Borremans et Florentin Reginster pour leur appui technique sur le terrain.

Crédit photo. V. Van Keymeulen (p. 50 gauche), B. Lust (p. 50 droite), H. Claessens (p. 54), M. Kaddouri (p. 55).

Violette Van Keymeulen

Lorna Zeoli

Arthur Gilles

Marie-Pierre Tasseroul

Alexandre Ernst de Bunswyck

Marjane Kaddouri

Gauthier Ligoit

Hugues Claessens

Tom De Mil

fortomodrought@mseduculiegebe.onmicrosoft.com

Gestion des ressources forestières,
 Gembloux Agro-Bio Tech, ULiège
 gembloux.uliege.be