

# Le Hêtre en Hauts-de-France

Synthèse sanitaire, analyse de croissance et sylviculture adaptative



Hêtres de 45 ans en sylviculture dynamique à  
Gauchin-Verloingt  
(Pauline Surmont © CNPF)



Essai de comparaison de provenances à Erin  
(Pauline Surmont © CNPF)

2025



## Table des matières

Contextualisation .....	4
Où retrouver le hêtre ? Ses préférences climatiques et stationnelles.....	4
La place du hêtre en région .....	6
Viabilité du hêtre en région : qu'en disent les prédictions et qu'en est-il actuellement ?.....	8
Etat sanitaire en région : pas encore de signe alarmant.....	8
Et pour le futur ? Les modélisations produisent des scénarios assez convergents : des zones d'exclusion mais aussi des zones à ne pas sacrifier.....	12
Productivité du hêtre en région : analyses générales.....	14
Présentation des données.....	14
Résultats pour les croissances radiales et les accroissements moyens annuels .....	16
Résultats des fertilités .....	20
Valoriser les facteurs de résistance et de résilience du hêtre dès aujourd'hui .....	23
Sylviculture dynamique du hêtre : produire du gros bois plus rapidement.....	23
Le hêtre en mélange ou avec du recru.....	35
La diversité génétique du hêtre : une diversité de provenances.....	41
La diversité génétique du hêtre : la régénération naturelle n'est pas à sous-estimer .....	47
Une alternative en conditions limites : le hêtre d'Orient .....	49
Perspectives .....	50
Bibliographie.....	51
Annexe 1 : Extrait du bulletin DSF Hauts-de-France 2022 « Enquête complémentaire sur 2 massifs du territoire suite à des dépérissements ponctuels » .....	53
Annexe 2 : Répartition des placettes OREF sur lesquelles du hêtre est présent .....	54
Annexe 3 : Diagrammes pluviométrie / température moyennes annuelles de quelques placettes OREF.....	55
Annexe 4 : Compléments sur l'aspect sanitaire : apports phénologiques du réseau OREF .....	56
Annexe 5 : Analyse détaillées des prédictions ClimEssence et BioClimSol.....	57
Annexe 6 : Les tendances de croissances observées par l'IGN dans la sylvo-éco-région Centre Nord semi-océanique.....	62

---

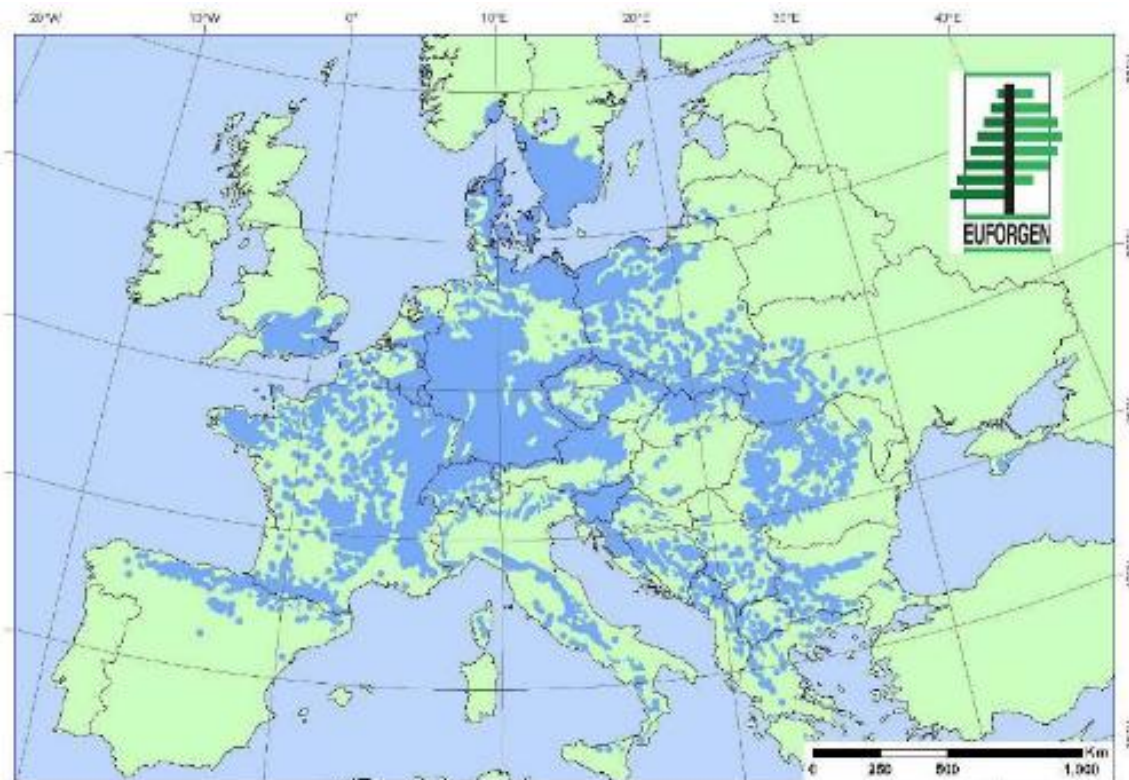
Essence phare de la région Hauts-de-France, le hêtre soulève inquiétudes et interrogations chez les propriétaires et les gestionnaires, notamment à cause de dépérissements marqués qu'il subit dans certaines régions de France. En 2007, l'INRAE publiait une carte alertant sur la prédiction de présence du hêtre en 2100 (Landmann et al., 2007) et de façon plus générale, cette essence n'est pas promue pour être une essence à introduire face au changement climatique. Mais qu'en est-il à l'heure actuelle dans notre région ? Cette synthèse présente les enseignements tirés de travaux d'observations dendrométriques, phénologiques et sanitaires en Hauts-de-France, et fournit des pistes sur la façon de repenser le hêtre en contexte de changement climatique dans la région.

---

## Contextualisation

### Où retrouver le hêtre ? Ses préférences climatiques et stationnelles

Le hêtre est une essence commune en France, et plus largement, en Europe. En longitude, on le rencontre depuis la côte atlantique, jusqu'en Roumanie ; et en latitude, il s'étend depuis l'Ecosse et le sud de la Suède (où il se plaira davantage dans des plaines de faibles altitudes); jusqu'en Espagne et en Italie (où il sera plutôt localisé en altitude, à partir de 1000 m ; et/ou avec une atmosphère enrichie en eau). Ses grandes **limites géographiques** sont dessinées au **nord** par sa sensibilité aux **gels tardifs** et aux **photopériodes courtes**; et au **sud** par sa sensibilité aux **sécheresses estivales**. En **France**, il se retrouve dans les **plaines** et **collines** de la **moitié septentrionale** du territoire ainsi qu'en **montagne (jusque 1700 m)**.



Carte de distribution du hêtre en Europe (EUFORGEN 2008)

Au **niveau topographique**, il évitera les **versants** orientés vers le **Sud** qui lui sont **trop secs**, les grandes surfaces sans protection au **vent** (le hêtre y étant **sensible**) ainsi que les plateaux à sol superficiel.



Eclatement d'un hêtre sous les vents d'une tempête à Clairfayts (59) en 2023  
(Gilles Poulain © CNPF)



Déstabilisation de la lisière d'un peuplement de hêtre suite à son exposition à un couloir venteux après exploitation de la parcelle adjacente à Felleries (59)  
(Pauline Surmont © CNPF)

A l'inverse, il poussera correctement et fournira un bois de bonne qualité sur les **pent**es **nord-ouest, nord et nord-est** ; ainsi que sur les **pent**es **est et ouest**, à condition que le **sol** soit **profond et drainant** ; ou encore sur les **plateaux à grande épaisseur de limons**.

Le hêtre apprécie en fait les **micro-climats** tempérés, doux mais surtout **humides** car il s'avère exigeant pour ses besoins hygrométriques, avec **des précipitations annuelles supérieures à 750 mm** (notamment au printemps car c'est la période où il réalise 80 % de sa croissance, Latte et al., 2017). Il peut tout de même se contenter de **moins si l'humidité atmosphérique est élevée** et que la **réserve utile** du sol est bonne (**120 mm**). Le maintien d'un micro-climat forestier lui est d'ailleurs favorable.

En termes de **conditions édaphiques**, le hêtre se développe dans des **sols sains**, idéalement **meubles et bien drainés**. Il **ne supporte ni l'hydromorphie trop prononcée, ni une texture argileuse trop compacte**. Il ne nécessite toutefois pas forcément une grande profondeur de sol grâce à son système racinaire traçant et semefasciculé. Par ailleurs, le hêtre est assez indifférent à la nature chimique du sol : il peut se développer sur une **large amplitude de pH**, allant de basiques à acides ; et il supporte même ceux très acides. C'est d'ailleurs pourquoi il peut être présent sur des humus allant du mull carbonaté au dysmoder. Toutefois, il faut garder en tête que plus le sol est acide, moins sa croissance et la qualité de son bois sont favorisés (même si d'autres facteurs entrent en compte comme la génétique ou la sylviculture).

Pour finir, le hêtre est une essence **sciaphile**. Non seulement il est capable de se développer en situation d'ombrage, mais un léger couvert lui est même d'autant plus favorable qu'il se révèle **sensible aux coups de soleil** : sa fine écorce peut se nécroser, se fissurer et craqueler lorsqu'elle y est trop exposée.



Dépérissement d'un hêtre en lisière causé par une brûlure, suite à l'exposition brutale d'un vieux peuplement à Pas-en-Artois (62)  
(Pauline Surmont © CNPF)

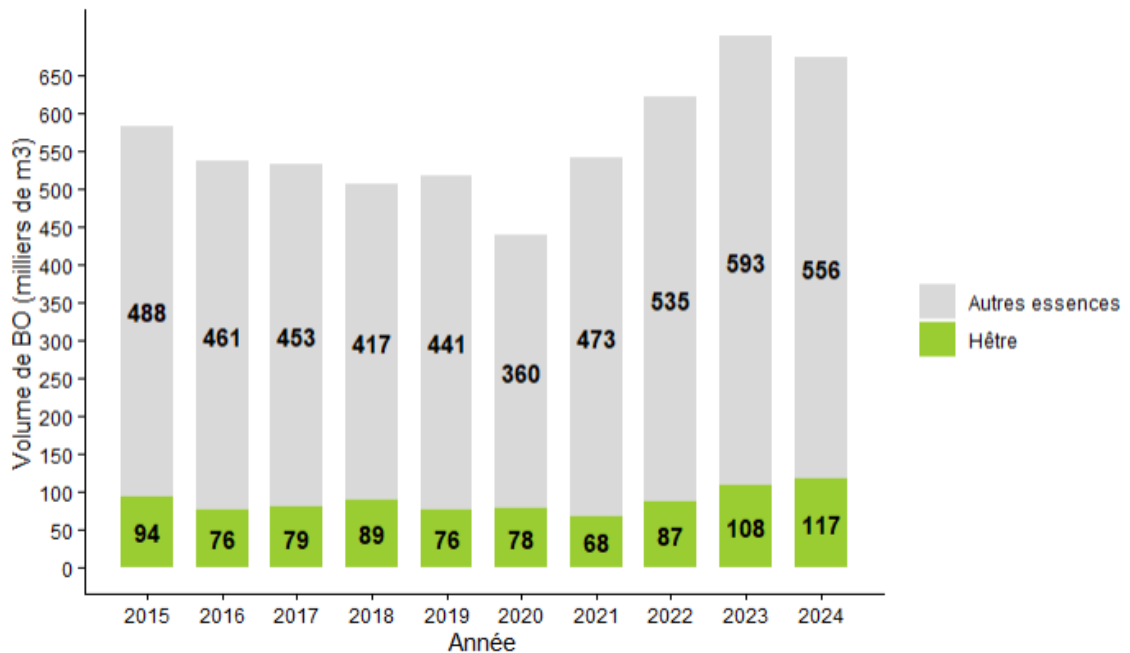
### La place du hêtre en région

D'après les chiffres régionaux de l'IGN 2025, le hêtre (hors peupleraie) représente aujourd'hui la **2<sup>ème</sup> essence la plus importante en terme de surface** occupée – avec **66 ± 12 milliers d'ha** ; juste après le chêne pédonculé (72 ± 12 milliers d'ha) et avant le chêne sessile (46 ± 10 milliers d'ha). Bien que sa surface n'ait, en réalité, pas forcément augmenté ces dernières années; il doit cette position au déclasserment du frêne suite à la crise de la chararose. Que ce soit en peuplement pur ou mélangé, le hêtre occupe alors **14 % de la surface boisée régionale**, ce qui est un peu supérieur aux **9 % de l'échelle nationale**. En descendant à l'échelle départementale, c'est dans l'Oise que la surface estimée est la plus grande (19 ± 5 milliers d'ha en 2025). C'est le seul département pour lequel la donnée est significative mais il serait a priori suivi d'assez près de l'Aisne ; la Somme et

le Pas-de-Calais présenteraient des valeurs intermédiaires ; et enfin le Nord est le département avec la superficie la plus faible.

**En terme de volumes, il serait similaire au chêne pédonculé à la première place ( $15 \pm 4$  millions de  $m^3$  pour le hêtre et  $15 \pm 3$  millions de  $m^3$  pour le chêne), soit 17% du volume régional.**

Quant à la place qu'il occupe du côté aval de la filière, on peut se pencher sur les chiffres des memento annuels de l'Agreste qui fournissent les **volumes de bois d'œuvre récoltés** par essence. Pour les Hauts-de-France, la donnée est disponible depuis 2015 :



Evolution des volumes de bois d'œuvre récoltés en Hauts-de-France entre 2015 et 2024 à partir des données de l'AGRESTE

Entre 2015 et 2024, la récolte régionale de bois d'œuvre en hêtre a été assez stable avec même un légère augmentation depuis 2021; elle représente **en moyenne 87 200  $m^3$ /an**, sur un total moyen de 564 900  $m^3$ /an toutes essences confondues sur la région, ce qui correspond à presque **15,4 % du marché régional**, plaçant l'essence en troisième position après les peupliers (564 900  $m^3$ /an soit 27 %) et les chênes (127 200  $m^3$  soit 22,5 %) ; alors que ce pourcentage n'atteint même pas 5 % à l'échelle nationale.

## Viabilité du hêtre en région : qu'en disent les prédictions et qu'en est-il actuellement ?

Le hêtre est une essence dont les besoins hygrométriques sont relativement forts : sécheresses et canicules sont susceptibles de déclencher des dépérissements. Or, dans le cadre du changement climatique, une accélération et une intensification de ces perturbations sont attendues dans les années à venir. Il est légitime de questionner sa viabilité en région.

### Etat sanitaire en région : pas encore de signe alarmant

#### Résumé des bulletins annuels du Département de la Santé des Forêts depuis 2014

En **2025**, dans son bulletin annuel régional, le Département de la Santé des Forêts (DSF) a qualifié **l'état de santé du hêtre comme bon dans tous les départements sauf l'Oise** où il est qualifié de moyen, notamment à cause de **dépérissements locaux**. Vis-à-vis de ces derniers, en 2022, le bulletin présente d'ailleurs une « enquête complémentaire sur 2 massifs du territoire suite à des dépérissements ponctuels » qui peut être retrouvée en annexe 1.

Avec un peu plus de recul, il s'avère que, dans les années précédentes, c'est l'indicateur de sécheresse-chaleur qui attire l'attention à plusieurs reprises (orange en 2018, 2019, 2022 et même rouge 2023). Comme souligné en 2019, ces sont les **années sèches consécutives et à répétition qui peuvent engendrer des dépérissements**. Malgré tout, depuis 2014, il n'y a eu que 2016 pour laquelle l'état de santé global du hêtre a été classé comme moyen sur toute la région. Il y a également eu en 2017, un état dégradé causé par des dégâts de gels cette fois-ci. Pour toutes les autres années, ce dernier s'est tout de même révélé bon. En outre, il n'a **jamais été signalé médiocre dans la région**.

#### Evolution de l'indicateur sanitaire des hêtres du dispositif OREF

L'Observatoire Régional des Ecosystèmes Forestiers (OREF) est un réseau de placettes permanentes mis en place en 2007 afin de recueillir des données sur l'évolution de différentes composantes des écosystèmes forestiers des Hauts-de-France, notamment en contexte de changement climatique (l'annexe 2 fournit une carte de la répartition des placettes avec du hêtre, et leur effectif). Cette analyse repose sur 8 indicateurs, dont fait partie l'état sanitaire. Ce sont les correspondants observateurs des forêts qui réalisent annuellement ce diagnostic. Chaque arbre qui se situe sur ces placettes est suivi à partir du système de notation du Département Santé des Forêts qui quantifie la **mortalité des branches** et le **déficit foliaire** dans le houppier fonctionnel (houppier hors concurrence réalisant l'essentiel de la photosynthèse). Il est alors possible de reconstituer une note **DEPERIS**.

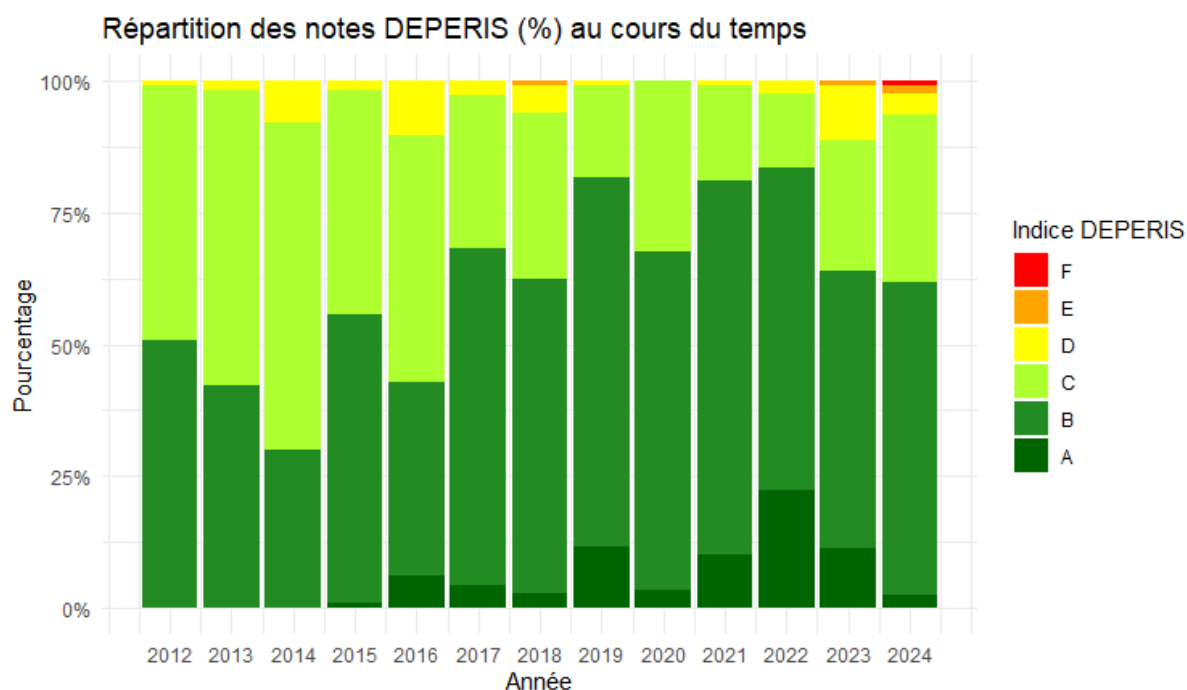
---

#### La notation DEPERIS

Ce protocole évalue l'état sanitaire d'un arbre à partir de deux critères principaux : d'une part, la mortalité de branche, et d'autre part, le manque de ramification (feuillus

ou mélèze) ou d'aiguilles (autres résineux) ; auxquels s'ajoute le déficit foliaire. Pour chaque indicateur, les classes de pourcentages sont couplés afin d'obtenir une note allant de A à F. Un arbre est considéré dépérissant à partir de la note D.

Le graphe suivant présente l'évolution des effectifs des notes DEPERIS entre 2012<sup>1</sup> et 2024, toutes placettes confondues. A noter que, selon les années, le nombre de tiges observées peut légèrement varier en fonction de l'évolution du peuplement (exploitation sylvicole, seuil de recensement etc.). Les arbres sont comptabilisés à la condition d'être co-dominant.



**Les notes DEPERIS sont globalement favorables** : le pourcentage de notes à **dépérissement avéré (D, E ou F) varie entre 0% et 11 % selon les années**. Ce sont en fait les résultats de mortalité de branches qui sont bonnes : le taux de 0% est largement majoritaire et globalement stable et il n'y a que deux occurrences de mortalité de branche avec un taux qui atteint 50 % (un 70% en 2024 et un 80 % en 2018). Les déficits foliaires sont un peu moins favorables, avec davantage de pourcentages d'au moins 50 %, dont en particulier **des pics en 2014 ; 2016 et 2023** (respectivement 14% ; 18% et 14% des notes). De plus, il n'y a **pas de tendance** qui se dessine : le pourcentage peut augmenter une certaine année puis diminuer par la suite, montrant une **amélioration** et un **retour à de meilleures conditions sanitaires**, illustrant une **certaine capacité de résilience de l'essence, vis-à-vis des pertes foliaires**. En dépit de sa **sensibilité importante par rapport au manque d'eau**, le hêtre possède une bonne résilience : il sait montrer une **récupération rapide et significative**, tout en étant capable de subir de faibles taux de mortalité (Landmann et al., 2008). Ainsi, même d'importantes pertes foliaires lors d'un épisode de

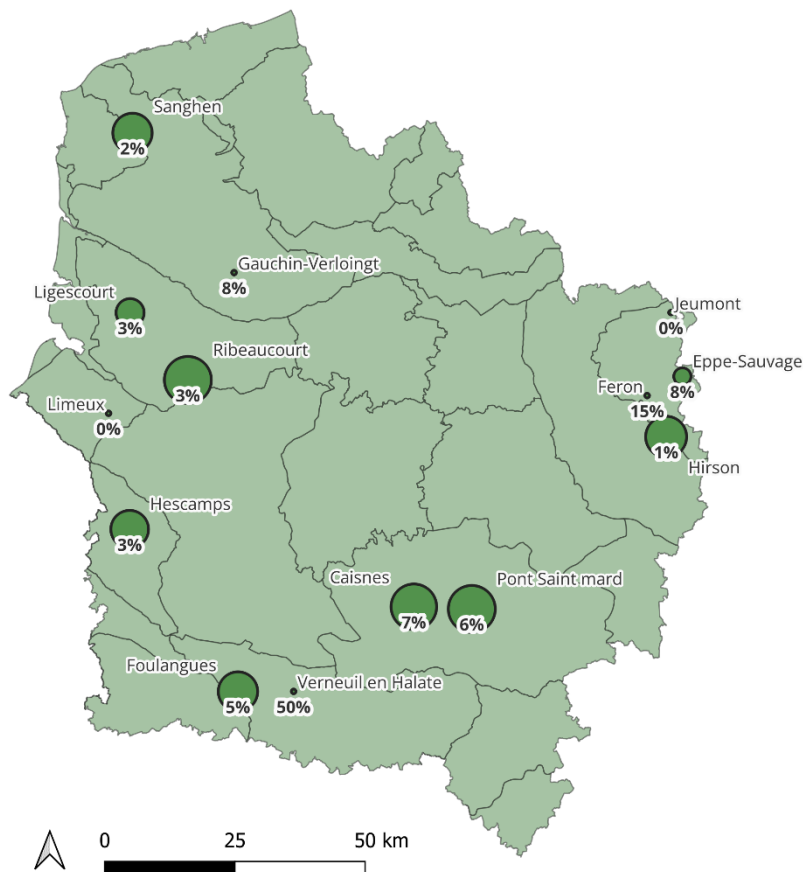
<sup>1</sup> Les observations présentées commencent à partir de 2012 par soucis d'homogénéité de protocole car les placettes OREF ont été remaniées en 2011.

sécheresse ne doivent pas nécessairement être interprétées comme un signe précurseur de dépérissement généralisé. Malgré une **forte réaction au stress** qui se traduit par une **croissance réduite**, il est capable de **retrouver rapidement un niveau satisfaisant d'accroissement si les conditions redeviennent favorables** (Lebourgeois, 2005). Ainsi, lorsqu'il est en bonne station, les sécheresses ponctuelles ne constituent pas forcément une menace.

On peut se questionner sur la localisation des hêtres dépérissants : Certaines placettes sont-elles davantage concernées ? Où se situent-elles en région ? La carte suivante présente le pourcentage moyen de hêtres considérés dépérissants (note DEPERIS D, E ou F) par placette, entre 2011 et 2024. La taille des figurés permet d'appréhender le nombre moyen de hêtres inventoriés sur cette même période sur ces mêmes placettes.

### Pourcentages moyens de notes DEPERIS indiquant un dépérissement (note D, E ou F) par placette

La taille des ronds est proportionnelle au nombre moyen de hêtre échantillonné par an sur la placette (entre 1 et 18)



A première vue, Verneuil en Halatte retient l'attention de par son pourcentage élevé. Mais on remarque que son figuré est minuscule, ce qui indique un très faible nombre de hêtres inventoriés (il n'y a qu'un seul hêtre inventorié sur la placette donc le moindre dépérissement rend la valeur très forte). La remarque vaut également pour Féron.

En réalité, plus le figuré est grand, mieux son pourcentage est représentatif. Globalement les pourcentages sont assez bas, parmi les placettes mieux représentatives, les valeurs vont de 1% à Féron à 7% à Caisnes.

La démarcation n'est pas flagrante, mais on peut lire que les valeurs les plus grandes ont tendance à se retrouver dans le sud de la région : 5% à Foulangues, 6% à Pont-St-Mard et 7% à Caisnes.

Dans l'annexe 3 on peut remarquer une légère tendance : pour les communes avec un pourcentage un peu plus fort de dépérissants, les pluviométries sont plus basses (et souvent sous la barre de 750 mm, valeur retrouvée en littérature) et les températures a priori plus élevées. Pour vérifier ces observations, il faut interroger les modèles statistiques. Les variables explicatives choisies sont : la température moyenne annuelle de l'année pour représenter le stress thermique moyen ; les précipitations pendant la période de végétation pour représenter le stress hydrique pendant l'activité physiologique forte; ainsi que les précipitations annuelles de l'année précédente afin d'inclure une notion de réaction à retardement du stress hydrique. Pour faire simple, le modèle mobilisé (modèle linéaire généralisé mixte binomial) va alors chercher à identifier la probabilité qu'un arbre dépérisse selon les variables citées. La **température moyenne annuelle** présente un effet positif marginalement significatif sur le dépérissement (Estimate = 0.278,  $p = 0.069 > 0.05$ ). Bien que cet effet ne soit pas significatif au seuil classique de 5 %, il indique une **tendance selon laquelle des conditions plus chaudes augmenteraient la probabilité de dépérissement**. Les **précipitations annuelles n'ont pas d'effet significatif** (Estimate = 0.104,  $p = 0.547 > 0.05$ ), suggérant qu'elles ne permettent pas d'expliquer directement la mortalité dans ce modèle. L'interaction entre la température moyenne et les précipitations annuelles n'est pas significative ( $p = 0.437$ ), ce qui suggère l'absence d'effet combiné détectable entre ces deux variables dans le cadre de ce modèle. En revanche, les **précipitations de l'année précédente** apparaissent comme un facteur fortement significatif et négatif (Estimate = -0.638,  $p < 0.001$ ). Ce résultat indique qu'une **plus forte disponibilité en eau lors de l'année précédente est associée à une diminution significative de la probabilité de dépérissement**, mettant en évidence un effet de mémoire hydrique important sur la vitalité des arbres. Ces résultats sont cohérents avec la littérature et montrent que le phénomène est bien observable à l'échelle de notre région.

Quelques observations complémentaires peuvent également accentuer le stress hydrique : la placette de Foulangues est exposée vers le Sud, ce qui peut aggraver les épisodes secs ; aggravation également possible quand la pente atteint 25% comme à Caisnes et Pont-Saint-Mard; et enfin pour Caisnes, c'est la station entière dont les potentialités sont très faibles à cause de la dalle calcaire à faible profondeur qui limite la réserve utile. Ces compléments mettent en évidence l'importance de la station au-delà des aspects climatiques.

*Dans le cadre de l'OREF, une analyse d'un autre indicateur a été menée en 2025 : la phénologie. Il s'agit de l'étude des événements biologiques cycliques, tout au long de l'année. Et en cherchant à comprendre les réponses physiologiques, elle permet de mieux appréhender les réactions aux changements externes, et en particulier aux aléas climatiques. L'annexe 4 présente un résumé des informations phénologiques obtenues sur le hêtre, complémentaires à l'indicateur phytosanitaire.*

*En résumé, des dépérissements du hêtre existent en région de façon sporadique et non systématique. Ces observations sont représentatives de la vigilance du DSF qui n'a encore jamais lancé d'alerte forte vis-à-vis du hêtre pour notre région depuis 2014 : pour le moment, elles restent minoritaires et ponctuelles. Actuellement, la température qui augmente n'est que légèrement en cause car le facteur prépondérant est celui de la pluviométrie ; une pluviométrie dont l'effet est à retardement plutôt que direct. Les années à venir permettront d'évaluer la capacité réelle de cette résilience à compenser les effets du changement climatique, et de déterminer si la répétition des épisodes de sécheresse fragilisera durablement l'intégrité des forêts. Les premiers signes de dépérissement sont-ils conformes aux prédictions des modélisations ?*

Et pour le futur ? Les modélisations produisent des scénarios assez convergents : des zones d'exclusion mais aussi des zones à ne pas sacrifier

Les modélisations cherchent à évaluer le niveau de risque associé à l'essence dans les années à venir. Elles se basent sur des hypothèses de travail, à propos des scénarios futurs, des échéances, et des sensibilités propres à l'espèce. Les facteurs intégrés peuvent varier d'une modélisation à l'autre ; c'est pourquoi en considérer plusieurs permet d'avoir une vision complémentaire des prédictions. L'annexe 5 détaille les prédictions **ClimEssence** et **BioClimSol** et analyse les cartes associées au Hêtre. Même si elles ne peuvent **pas être directement comparées** car ne correspondant pas aux mêmes hypothèses de travail, **les constats entre les deux modélisations vont dans le même sens.**

Pour les scénarios **ClimEssence**, l'évolution de la **compatibilité**<sup>2</sup> est plus ou moins marquée selon le niveau d'optimisme des scénarios. **Actuellement**, celle-ci reste **élevée sur presque toute la région**, avec les premières traces d'incompatibilités présentes dans le sud de l'Oise et de l'Aisne. Avec l'augmentation des températures, ces zones s'étendent depuis les **vallées alluviales** à travers plusieurs régions forestières (**Vexin, Valois, Brie-Tardenois** et **Soissonnais** ; puis elles gagnent progressivement les **plateaux d'Artois** et le **Cambrasis**, et enfin le **Bas-Pays de Flandre** et le **long de la Somme** jusqu'à la baie. Parallèlement, les zones s'élargissent au point de fusionner et l'incompatibilité s'intensifie. Cette modélisation survient dès 2070 dans le scénario le plus pessimiste. Note positive, même dans ce scénario, certaines zones **restent compatibles** (**Vimeu, Boulonnais, Collines d'Artois, Flandres, Bas-pays de Flandre** et, dans une mesure un peu

---

<sup>2</sup> Le modèle de ClimEssence repose sur le déficit hydrique annuel, la température minimale annuelle et la somme des degrés jours annuelle. Grâce aux inventaires forestiers européens, normales mensuelles vingtenaires peuvent être obtenues, permettant ensuite d'identifier les gammes et extrêmes de valeurs (avec une marge de 1 ou 2,5%). Une zone est « compatible » quand les conditions futures estimées pour les trois indicateurs sont dans la gamme de valeur de référence.

moindre, **Ponthieu** et **Ardenne primaire**). Les régimes pluviométriques demeurent en fait bénéfiques grâce à **l'influence océanique ou ardennaise**.

Les cartes régionales de ClimEssence présentent donc une progression de la dégradation des hêtres depuis le Sud vers le Nord de la région **sous l'effet des conditions climatiques**. Néanmoins, les interprétations issues de ClimEssence ont une portée régionale : **les potentiels effets compensateurs de la station (topo-climat voire micro-climat, régime hydrique, conditions édaphiques) et de la sylviculture ne sont pas à négliger**.

C'est ce que **BioClimSol** cherche à nuancer, en **s'incrivant dans les spécificités stationnelles des parcelles**.

En compilant différentes données cartographiques de résolution 25m, il a été possible de **reconstituer artificiellement** des indices de vigilance BioClimSol sur les massifs de hêtre de la région, en conditions références (1980-2010), sous +1°C ou +2°C. Il est nécessaire de préciser que cette approche était expérimentale et que l'outil n'a pas été développé pour visualiser une échelle régionale : **un diagnostic BCS interprétable sur une parcelle et un peuplement en particulier nécessite un relevé de terrain**.

Pour les massifs relativement **épargnés**, on retrouve le **Boulonnais, l'Artois, le Ponthieu** et le **Vimeu**; ainsi que dans le **Hainaut, la Thiérarchie** et **l'Ardenne Primaire**. Même si le risque y augmente, il reste majoritairement modéré. A l'inverse, les massifs au sud de la région voient le risque considérablement augmenter : les massifs associés au **risque élevé** du **scénario de référence** sont localisés dans le **Soissonnais de l'Oise et le Valois de l'Aisne**; il y sont encore épars, mais, au fur et à mesure de l'augmentation de température, ils **basculent** en **risque maximal**. Ce sont les conditions de **sécheresse** ainsi que les caractéristiques édaphiques avec des **sols plus sableux** qui expliquent cette répartition.

Les modélisations ne sont pas comparables car possèdent des hypothèses de travail différentes, néanmoins on peut remarquer que les observations convergent.

*Le hêtre est une essence dont les besoins hygrométriques sont importants. En contexte de changement climatique et d'intensification des sécheresses, des incertitudes vis-à-vis de son maintien sont soulevées. Les modélisations permettent d'appréhender ses futures zones de vulnérabilité. Celles présentées illustrent que le sud de la région est identifié en tant que zone de vulnérabilité future pour le hêtre, mais également que cette essence conserve tout de même de l'intérêt sur la façade océanique et aux abords des Ardennes. Attention, seul un diagnostic stationnel précis permet d'avoir la meilleure approche de la viabilité du hêtre sur une parcelle spécifique.*

## Productivité du hêtre en région : analyses générales

Le CNPF coordonne et suit un réseau de placettes de démonstration et d'expérimentation varié (RRED). Cette étude a pour ambition de faire un état des lieux de productivité de l'essence en région et de mettre en valeur certaines thématiques sylvicoles testées sur le réseau. 28 dispositifs présentant du hêtre ont été retenus, d'âge et d'objectifs différents (les détails de chacun sont consultables dans l'annexe complémentaire<sup>3</sup>). Le premier aspect abordé est celui de la productivité de l'essence en région, au travers de la croissance en diamètre et en hauteur (fertilité). Pour cette partie, seules les 23 placettes de plus de 20 ans sont considérées.

Les encadrés jaunes permettent des résumés synthétiques des explications statistiques détaillées.

### Présentation des données

#### Données mobilisées sur les placettes

Les mesures ont été effectuées au sein d'une placette concentrique de 20 m de rayon. L'ensemble des arbres présents sur la placette fait l'objet d'un relevé des circonférences à 1m30, en précisant l'essence. La hauteur dominante est mesurée sur les arbres de plus fort diamètre de la placette (rangs 1 ; 3 et 5). Et une mesure de la surface terrière complète les données dendrométriques. Un relevé de station complet vient également compléter la description des conditions de développement et replace le peuplement dans son contexte écologique; avec la description de l'humus, du profil pédologique, ainsi que les caractéristiques topographiques (altitude, exposition, pente) et la flore indicatrice.

#### Données complémentaires : l'Inventaire Forestier National (IFN)

Les données seules du réseau ne parviennent pas à couvrir correctement les différentes situations : aucune significativité ne ressort des données RRED. C'est pourquoi les **données brutes de l'IFN**, disponibles en libre accès<sup>4</sup>, ont également été mobilisées. Attention, **la portée statistique des données brutes de l'IFN reste limitée et n'ont pas de la fiabilité statistiques publications officielles de l'IGN** ; le système de poids de placette mis en place par l'IGN permet d'être une référence statistique des fiable, or ce système n'est pas présent ici. Néanmoins, ces 92 références complètent tout de même de jeu de données. La sélection est faite sur la région, pour les 10 dernières années et sous réserve que le hêtre y soit majoritaire (couvert relatif supérieur à 50 %). Les données concernent la circonférence, la hauteur et l'âge ; mais également les conditions stationnelles.

#### Variables explicatives retenus et répartition des dispositifs

Dans les analyses les placettes sont abordées sous l'angle de deux aspects : l'un pédologique et l'autre climatique. Concernant les facteurs du sol, ceux retenus sont :

---

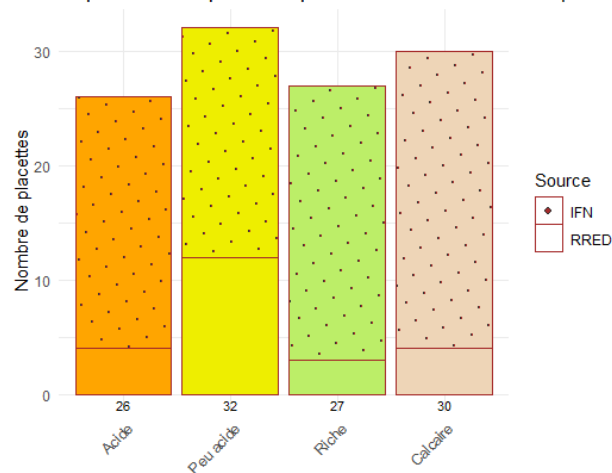
<sup>3</sup> L'annexe complémentaire présente en détail l'intégralité des placettes de hêtres mobilisés dans la synthèse. Le nombre de page étant conséquent, elle a été séparée de la synthèse.

<sup>4</sup> <https://inventaire-forestier.ign.fr/dataifn/?lang=fr>. L'annexe 5 présente les valeurs globale données par l'IFN mais ne correspondent pas strictement à la région et ne détaille pas toutes les variables souhaitées.

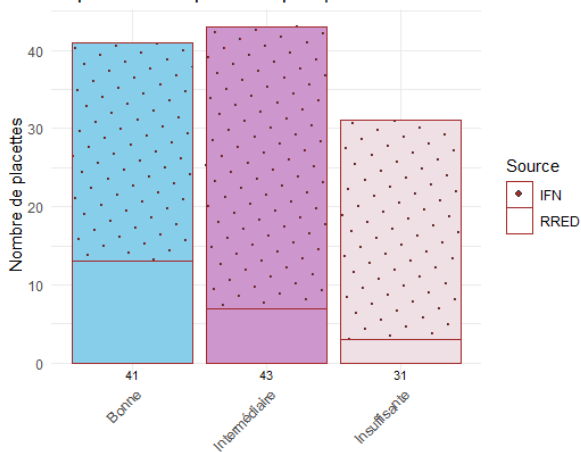
- | Richesse trophique : « acide », « peu acide », « riche » et « calcaire » ;
- | Niveau de réserve utile : RU « faible » si inférieure à 80 mm ; « bonne » si supérieure à 120 mm et « intermédiaire » sinon ;
- | Engorgement : « permanent » si présence de gley ou de pseudo-gley avant 50 cm de profondeur ; « temporaire » si présence de gley ou de pseudo-gley plus profond et/ou présence d'une oxydation forte avant 50 cm de profondeur ; et « absent » sinon.

Chaque critère est catégorisé pour simplifier les analyses. Les graphes suivants permettent de visualiser la répartition des placettes selon chacun d'entre eux. Les données de l'IFN permettent de compléter certaines situations peu représentées par le réseau RRED (exception pour le niveau d'engorgement qui reste tout de même disproportionné).

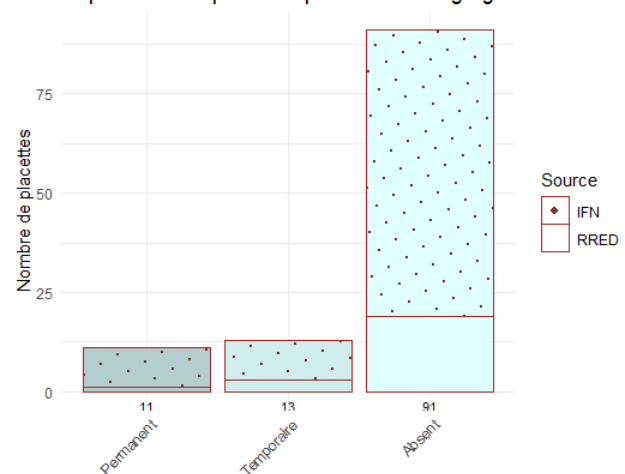
Répartition des placettes par niveau de fertilité chimique



Répartition des placettes par qualité de la réserve utile



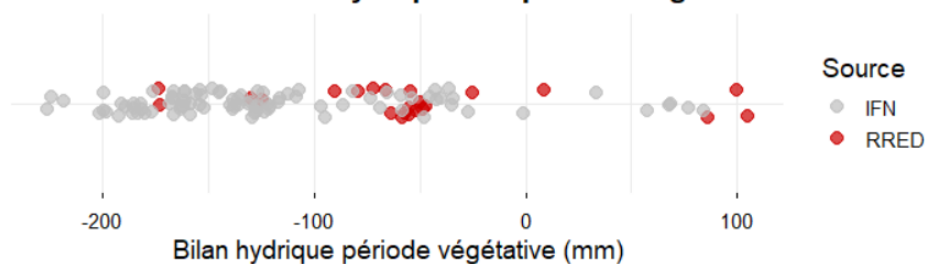
Répartition des placettes par niveau d'engorgement



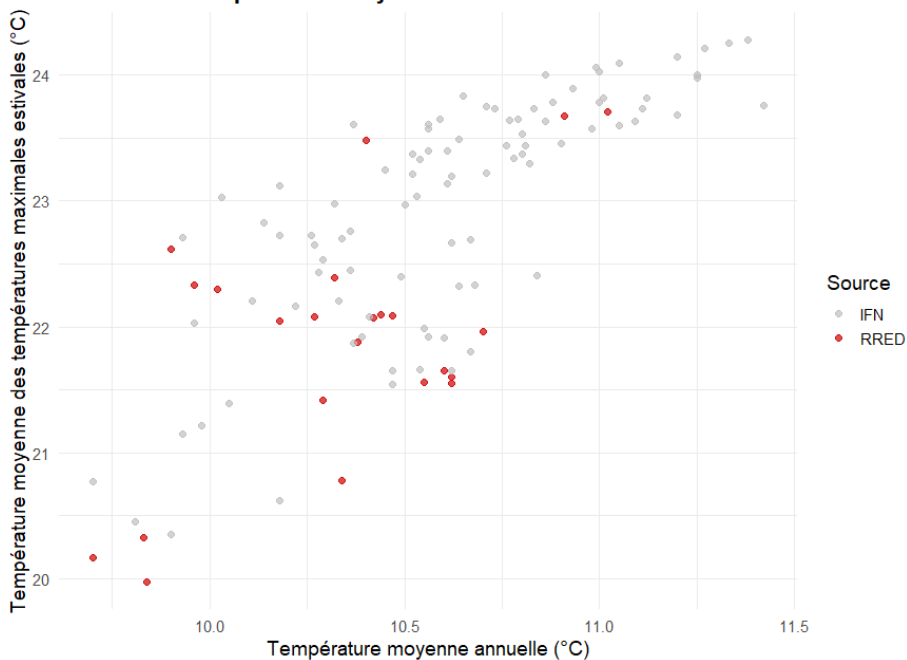
Au niveau climatique, les données sont caractérisées par le bilan hydrique en période de végétation<sup>5</sup> ainsi que les températures moyennes annuelle et des températures maximales en juin-août ; dont les gammes respectives sont présentées par les deux graphes suivants.

<sup>5</sup> Coefficient de corrélation entre les valeurs de bilan hydrique annuel et en période de végétation : 99%.

## Distribution des bilans hydriques en période végétative



## Gamme des températures moyennes annuelles et maximales estivales



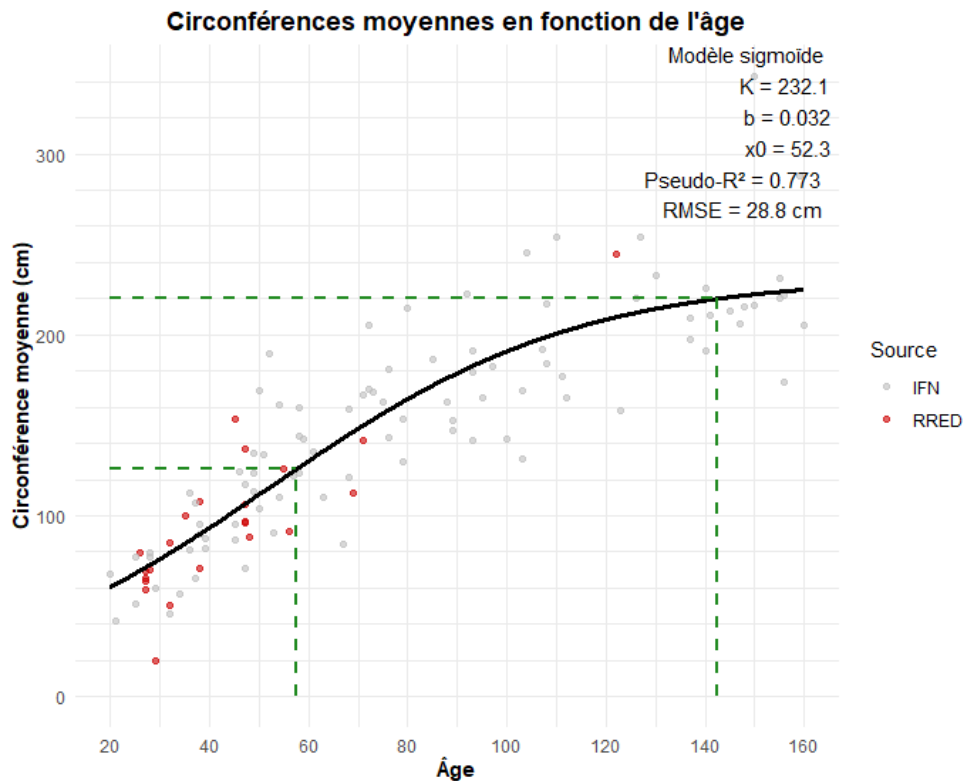
## Résultats pour les croissances radiales et les accroissements moyens annuels

### Les accroissements moyens annuels en circonférence

Le graphe suivant présente les circonférences moyennes en fonction de l'âge. Le modèle choisit est une courbe dite « sigmoïde » qui permet de représenter trois phases de croissance : une initiale plus douce, une plus soutenue et enfin une plus ralentie. C'est un modèle usuellement utilisé en biologie pour les croissances. Les annotations du graphe donnent la formule de la courbe mais également des indications sur la qualité du modèle : Plus le  $R^2$  est proche de 1, plus le modèle explique fidèlement les variations observées dans les données ; et le RMSE (Root Mean Square Error, ou racine de l'erreur quadratique moyenne) mesure l'écart moyen entre les valeurs observées et les valeurs prédites par le modèle. **D'après le SRGS<sup>6</sup> de la région, le diamètre d'exploitabilité minimal est de 40 cm, et celui recommandé monte jusque 70 cm.** Sur la région,

<sup>6</sup> Schéma Régionaux de Gestion Sylvicole, constituant la référence d'instruction des documents de gestion durable en région.

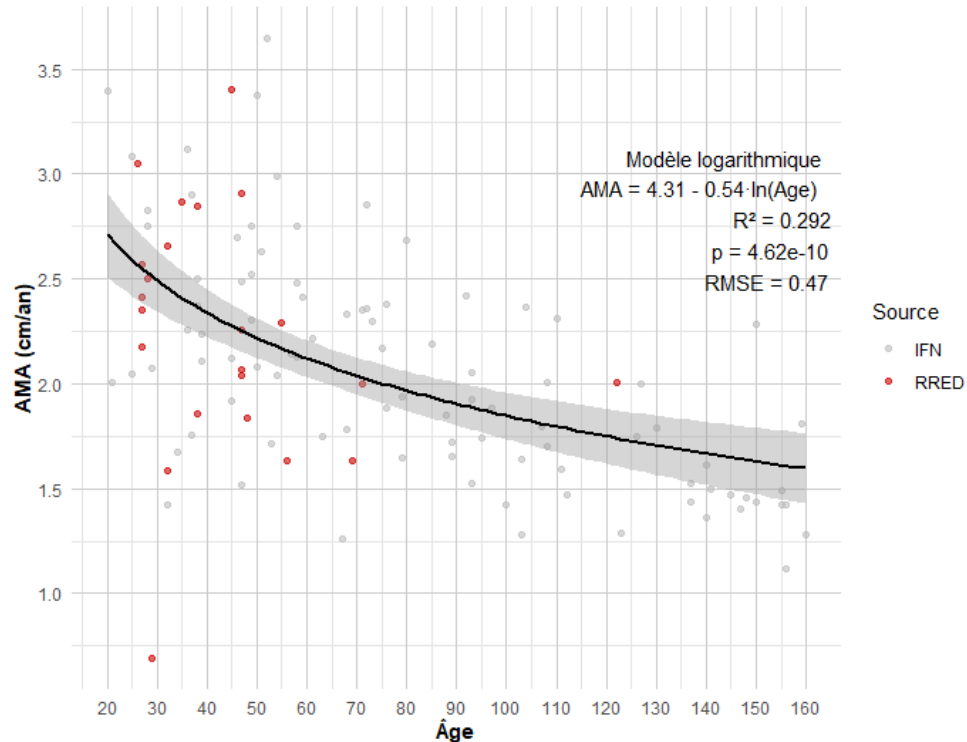
ces valeurs sont acquises grossièrement pour **55 et 145 ans (100 ans pour le diamètre de 60 cm)**.



A partir de la circonférence et de l'âge, il est possible de calculer les **accroissements moyens annuels (AMA) en circonférence**<sup>7</sup>. Dans la région **Hauts-de-France**, ils sont en moyenne de **2,09 cm/an**. La valeur sur les dispositifs **RRED** est un peu plus élevée avec **2,24 cm/an**, car plusieurs essais font l'objet d'une sylviculture dynamique sur cet essèce. A l'inverse, les données **IFN** indiquent une moyenne un peu plus basse avec **2,05 cm/an**. D'ailleurs, le graphe suivant présente l'évolution des accroissements moyens annuels en fonction de l'âge. Les accroissements sont plus grands pour les peuplements plus jeunes (rappel : les mesures sont considérées à partir de 20 ans) et diminuent avec l'âge. Quand le peuplement est **à 20 ans, l'accroissement moyen annuel donne environ 2,7 cm/an** (intervalle de confiance entre 2,5 et 2,8 cm/an) ; et **il passe sous la barre des 2 cm/an autour de 75 ans** (entre 65 et 90 vis-à-vis de l'intervalle de confiance).

<sup>7</sup> Obtenu par la circonférence totale divisée par l'âge au moment de la mesure. C'est ce qu'à pris l'arbre en circonférence en un an, en moyenne.

### Décroissance des accroissements moyens annuels en fonction de l'âge



#### Régression linéaire : abandon de l'engorgement, du niveau trophique et du bilan hydrique

Une régression linéaire consiste à trouver la droite qui décrit au mieux la relation entre une variable explicative et une variable à prédire, afin d'estimer comment l'une évolue en fonction de l'autre. Comme il y a ici plusieurs facteurs explicatifs (facteurs pédo-climatiques précédemment cités), elle est caractérisée de multiple et est réalisée de manière pas à pas, pour **identifier les variables les plus pertinentes pour expliquer la variation de l'AMA dans la région des Hauts-de-France**. Ce processus repose sur l'optimisation d'un critère nommé critère d'information d'Akaike (AIC) qui sert à comparer des modèles statistiques en privilégiant celui qui explique le mieux les données tout en pénalisant les modèles trop complexes : il favorise un modèle à la fois simple et performant.

Le modèle final explique environ 37 % de la variance de l'AMA ( $R^2 = 0,372$ ) et est significatif ( $p$  value  $\approx 7,2e-10$ ) ; et, malgré la conservation de facteurs non significatifs, il capture l'influence principale des variables sur la croissance de l'AMA.

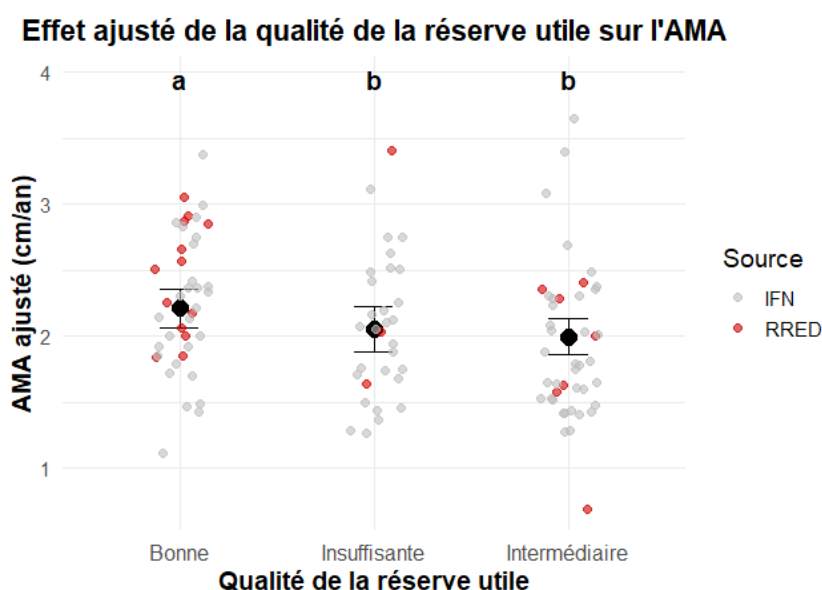
Au cours de cette sélection, la première variable **écartée** a été celle du **bilan hydrique en période végétative**, puis **l'engorgement**, et enfin le **niveau trophique**. Au regard des exigences stationnelles du hêtre, la suppression de l'engorgement n'apparaît pas aberrante. Elle est déjà un peu plus surprenante pour le niveau trophique, même si il est vrai que l'essence couvre une gamme large. En revanche, considérant les exigences hydrique du hêtre, l'élimination du bilan hydrique semble contre-intuitive. Cependant, elle rejoint tout de même les observations sur l'état sanitaire ; et comme la réserve utile a malgré tout été conservée dans le modèle, il est possible que ce soit davantage parce que les bilans hydriques mesurés sur la région ne présentent pas de variations suffisamment marquées pour faire apparaître un effet significatif, plutôt que l'essence

elle-même qui n'est pas sensible à ce facteur. De plus, on parle ici de moyennes trentenaires, ce qui n'exclut pas que l'essence réagisse année après année de façon plus fine.

Les variables **conservées** dans le modèle final, classées par importance, sont alors : **l'âge** (p-value de  $6e-10 < 0,001$ , comme la représentation logarithmique précédente est plus pertinente, cette variable n'est pas davantage présentée dans les résultats de la régression) ; la **qualité** de la **réserve utile** ; et enfin, la **température moyenne annuelle** et la **température maximale estivale moyenne** (incluses dans le modèle malgré la non significativité individuelle ; car elle peuvent toutefois refléter des tendances climatiques générales affectant la croissance, ou contribuer de manière combinée à l'explication de l'AMA).

### De meilleurs accroissements en bonne réserve utile

Sachant que le hêtre est une essence exigeante en apports hydriques, la qualité de la réserve utile a été retenue dans le modèle de régression linéaire. La catégorie « intermédiaire » a été choisie comme référence. En moyenne, **l'accroissement moyen annuel (AMA)** est de 0,215 cm/an **plus élevé pour les sols de qualité « bonne »**, avec un effet statistiquement significatif (p-value = 0,04 < 0,05). En revanche, pour les sols de qualité « insuffisante », **l'AMA ne se distingue pas de manière significative de la qualité « intermédiaire »** (p-value = 0,6 > 0,05). Sur le graphe suivant les lettres indiquent les groupes significativement homogènes.



### Influence des températures moyennes

Intégrer l'effet des **variables de température** permet effectivement **d'améliorer le modèle**. Néanmoins, leurs effets **ne sont pas significatifs** (p-value = 0.12 pour la température moyenne annuelle et 0.16 pour la température maximale estivale moyenne, toutes deux > 0.05). De plus, les deux ont des **effets modérés**, avec, entre les deux, une prépondérance pour la température moyenne annuelle.<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Coefficient standardisé de -0.193 contre +0.166

La **température moyenne annuelle** a un **effet négatif** : les températures plus élevées sont associées à des accroissements plus faibles. La pente est de l'ordre de  $-0.28$  cm/an par °C.

A l'inverse, la **température maximale estivale moyenne** a un **effet positif** : avec des températures maximales estivales plus élevées, l'accroissement est favorisé. La pente est de l'ordre de  $0.09$  cm/an par °C. On peut s'attendre à l'avenir à ce que les températures atteignent des valeurs qui seront contre-productives car trop fortes et feront alors reculer cet aspect.

Dans la région, le hêtre atteint en moyenne un diamètre de 60 cm vers 100 ans, avec un accroissement moyen annuel en circonférence d'environ 2,09 cm/an. Le modèle de régression linéaire multiple a écarté l'engorgement, le niveau trophique (un peu surprenant mais acceptable étant donné que l'espèce couvre une large gamme) et le bilan hydrique (probablement en raison d'une variabilité régionale pas assez clivante).

*L'âge reste le facteur principal, avec les jeunes peuplements (20 ans) présentant les plus forts accroissements ( $\sim 2,6$  cm/an) qui diminuent progressivement ( $\sim 2$  cm/an vers 100 ans). La qualité de la réserve utile influence également l'AMA, qui est significativement plus élevée sur sols de RU > 120 cm, tandis que les sols intermédiaires et insuffisants ne diffèrent pas. Les températures jouent un rôle modéré : la température moyenne annuelle a un effet négatif, tandis que la température maximale estivale a un effet positif, probablement limité à l'avenir en raison des chaleurs excessives. Ces effets climatiques, bien que non significatifs individuellement, améliorent la performance globale du modèle.*

## Résultats des fertilités

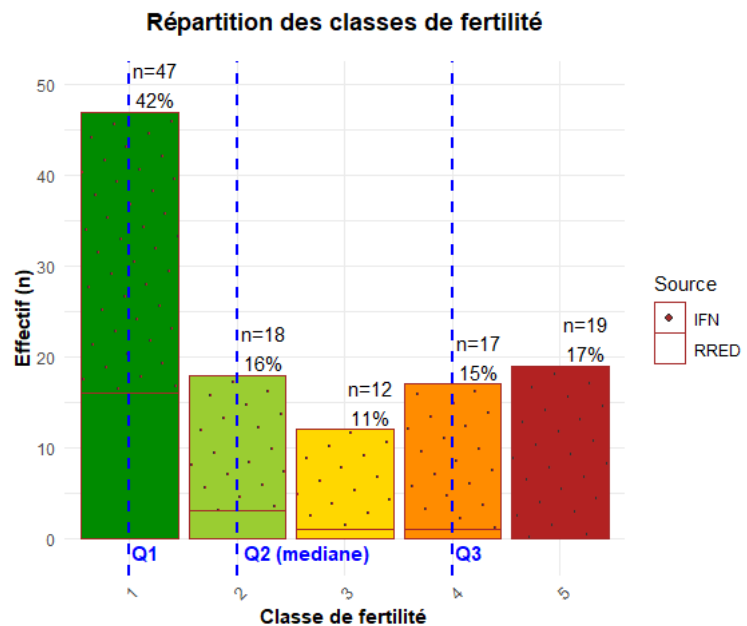
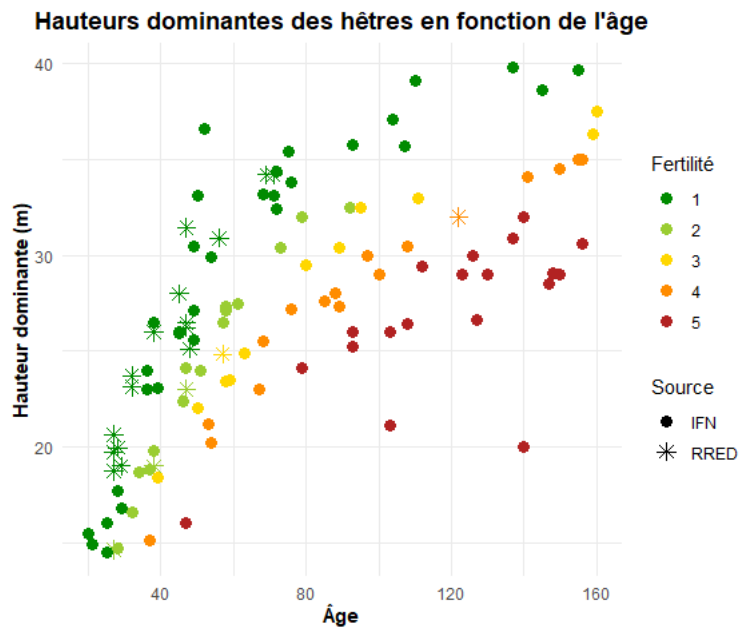
### Une majorité de fertilité très bonne sur la région

En fonction des zones géographiques, il existe différentes tables de productivité. La table mobilisée pour cette étude est celle de Bontemps (2007)<sup>9</sup> [1] pour le Nord-Ouest. Dans le cadre du changement climatique, cette table correspond à l'ancrage géographique et permet en plus de prendre en compte la dérive au cours du temps des courbes de références pour la croissance en hauteur dominante des hêtraies régulière de plaine du Nord de la France (influence climatique). Le graphe suivant, sur lequel on peut retrouver les valeurs de hauteurs dominantes en fonction de l'âge, ne représente donc pas les courbes qui distinguent les

---

<sup>9</sup> Celle historiquement mobilisée pour le Nord-Ouest de la France est la table anglaise de Hamilton et Christie (1971) en Angleterre, mais cette dernière semblait moins correspondre tant sur l'aspect géographique que temporel.

fertilités car elles sont propres à l'âge et donc multiples. Les fertilités sont distinguées par le code couleur.



Les effectifs par fertilité sont répartis comme sur le graphe d'après. La distribution des fertilités est concentrée sur les faibles valeurs : elle s'avère légèrement asymétrique à gauche (indice de Bowley = 0,33 > 0) et **la classe modale correspond d'ailleurs à la fertilité 1. En Hauts-de-France, le Hêtre présente majoritairement une bonne voire très bonne fertilité.** Néanmoins, **la distribution reste dispersée sur toutes les classes** : l'écart interquartile IQR est de 3, indiquant

que la moitié centrale des individus se situe entre les fertilités 1 et 4 ; et l'indice de variation ordinal est d'environ 0.77, et plus il est proche de 1, plus les réponses sont dispersées.

### Des corrélations ambivalentes

Comme les fertilités sont données sous forme de catégories ordonnées, pour analyser l'effet des variables explicatives, c'est la régression logistique ordinaire<sup>10</sup> qui est cette fois mobilisée. Le jeu de donnée n'a pas permis d'ajouter des interactions entre les variables. La sélection pas-à-pas basée sur l'AIC a de nouveau été appliquée pour simplifier le modèle.

**L'analyse des résultats est ambivalente : certains aspects sont logiques voire attendus, mais d'autres sont surprenants et même contre-intuitifs.**

Le modèle final le plus parcimonieux conserve uniquement la qualité de la RU, le niveau trophique et l'engorgement, ainsi que l'âge, suggérant que ces variables sont les principaux prédicteurs de la fertilité calculée dans notre jeu de données.

Comparativement à un sol de « Bonne » **réserve utile**, un sol de qualité « **Intermédiaire** » est associé à une **fertilité** relativement **moins bonne** ( $p = 0.012$ ), ce qui est cohérent avec les exigences de l'essence. En revanche la différence n'est pas significative avec la RU de qualité « Insuffisante », ( $p = 0.289$ ). Les faibles réserves utiles sont principalement associées à des sondages de faible profondeur. Ce constat peut éventuellement mettre en évidence les limites des sondages, à la tarière en particulier, comparé à l'exploration réelle des racines.

Pour le **niveau trophique**, par rapport aux sols riches, les sols **peu acides** présentent une **fertilité meilleure** ( $p = 0.03$ ), alors que les sols calcaires et acides n'ont pas d'effet significatif ( $p = 0.07$  et  $p = 0.20$  respectivement). Le hêtre étant une essence à large amplitude, ce résultat n'est pas aberrant, même si on s'attendait à ce que ce soit les sols riches les plus favorables .

Enfin comparé à un sol temporairement engorgé, un **engorgement permanent** est associé à une **fertilité moins bonne** ( $p = 0.007$ ), tandis qu'une absence d'engorgement n'a pas d'effet significatif ( $p = 0.79$ ). L'essence supporte l'engorgement mais ce dernier limite la croissance.

L'âge a un effet significatif sur tous les seuils de fertilité ( $p \leq 0.05$ ), et indique que les **parcelles plus âgées ont tendance à présenter une fertilité moins bonne**. Aller chercher du côté de la sylviculture serait une piste intéressante pour expliquer ce résultat mais les informations ne sont pas disponibles (uniquement sur une partie des dispositifs RRED).

*En résumé, les fertilités observées en région pour le hêtre sont en majorité très bonnes. Ce sont les sols de bonne qualité de réserve utile, avec un niveau trophique peu acide et un engorgement limité voire absent qui les favorisent.*

---

<sup>10</sup> Méthode qui modélise la relation entre une variable réponse catégorielle par rapport aux variables explicatives par comparaison de probabilité.

## Valoriser les facteurs de résistance et de résilience du hêtre dès aujourd'hui

Avec les bonnes précautions dans le choix de la localisation et de la situation, le hêtre a encore de la viabilité dans la région; et une fois établi, ses potentialités de croissance sont favorables. Pour renforcer sa résistance face au changement climatique, certaines pratiques sylvicoles sont favorables. Les paragraphes abordés présentent des apports bibliographiques mais se réfèrent également aux placettes d'expérimentation suivies par le CNPF dans la région. Chaque placette citée fait l'objet d'une description complète dans l'annexe complémentaire. Elles sont rangées par ordre croissant de numéro<sup>11</sup>.

### Sylviculture dynamique du hêtre : produire du gros bois plus rapidement

En contexte de changement climatique, une des stratégies de diminution des risques consiste à réduire l'exposition : ici, l'exposition passe par la durée de révolution.

#### Etude de cas : Comparaison de modalités d'éclaircie chez le hêtre

Le CNPF Hauts-de-France et l'ONF ont installé un dispositif de comparaison d'éclaircie de hêtre (dispositif n°**62 00 006**), planté en 1999 en plaine de l'Artois (Bertincourt, 62) sur une station avec de très bonnes potentialités sylvicoles (sol limono-argileux riche, de bonne réserve utile et sans engorgement).

L'écartement entre les lignes est de 4 m, et celui sur les lignes de 2,50 m pour les lignes de hêtres et 3 m pour les lignes **d'accompagnement (essences feuillues introduites pour apporter abri et diversification : aulnes, bouleaux, érables, châtaigniers, frênes etc.)**, soit une densité moyenne théorique de **958 plants/ha dont 750 hêtres/ha**.

Le **girobroyage des interlignes** a été réalisé annuellement jusqu'en 2007 date à laquelle cette intervention n'a plus été réalisée que sur 1 ligne sur 3, pour limiter le tassement au sol, permettre le développement d'un sous étage diversifié et le maintien d'un accès pour le suivi des interventions ultérieures.

Le suivi des plants a été assuré par une **taille de formation** des plants durant les 4 premières années du peuplement. En **2006 et 2009**, la taille de formation est associée à un **élagage sélectif**, réalisée sur une majorité des hêtres. A partir du printemps **2012**, l'intervention finale en taille de formation a été pratiquée sur **80 hêtres d'avenir désignés par ha**, devant constituer le peuplement final. La hauteur dominante des hêtres est alors de 9,5 m (homogène).

**Installé en février 2012 avec une emprise totale de 1,50 ha**, le dispositif comprend **3 modalités de 0,25 ha chacune**, délimitées par des bandes d'isolement de 10 m de large ou 3 lignes de hêtres (voir plan du dispositif ci-après) :

---

<sup>11</sup> Exception : les placettes de Hêtre d'Orient sont situées à la fin.



**Modalité A : placette témoin** ne portant pas d'interventions d'éclaircie jusqu'à la fermeture significative du couvert et donc une mise en concurrence accrue des tiges, caractérisée par un faible accroissement sur la circonférence des arbres d'avenir désignés (durée de révolution prévisible > 100 ans).

**Modalité B : placette d'intensité moyenne d'éclaircie.** Les interventions interviendront lorsque la hauteur des hêtres aura augmentée de 4 mètres, c'est-à-dire tous les 5/6 ans puis tous les 8/10 ans (durée de révolution prévisible 70/80 ans).

**Modalité C : placette d'intensité d'éclaircie forte**<sup>12</sup>. Les interventions interviendront lorsque la hauteur des hêtres aura augmentée de 4 mètres, c'est-à-dire tous les 5/6 ans puis tous les 8 ans. Les interventions dynamiques viseront à obtenir une croissance libre à semi libre de la cime des arbres d'avenir pour une durée de révolution objectif de 50/60 ans.

### Etat initial des 3 placettes :

Selon les modalités, la **densité avant éclaircie est homogène** : elle varie de 7 % entre la plus élevée (**864/ha**) et la plus faible (**804/ha**) liée à quelques mortalités d'essences d'accompagnement. Ceci ne remet pas en cause le pourcentage moyen de hêtre des modalités (68 % à 69 %), le choix et la répartition des arbres d'avenir désignés en moyenne tous les 11 m.

	TEMOIN		MOYEN		FORT	
	Total	Total/ha	Total	Total/ha	Total	Total/ha
Hêtre	150	600	136	544	142	568
Aulne Glutineux	18	72	14	56	9	36
Grisard	10	40	7	28	9	36
Bouleau	6	24	6	24	9	36
Frêne	10	40	14	56	17	68
Châtaignier/Era	16	64	20	80	18	72
Merisier/Alisier	6	24	4	16	5	20
<b>Total placette</b>	<b>216</b>	<b>864</b>	<b>201</b>	<b>804</b>	<b>209</b>	<b>836</b>

<sup>12</sup> Une telle intensité d'éclaircie n'est possible qu'en peuplement de jeune âge, qui ne présente pas encore de prise au vent.

Les essences d'accompagnement sont majoritairement représentées par les bois blancs (**aulne glutineux, grisard, bouleau**) entre 12 % et 18 % puis les **érables/châtaigniers** : 9 à 10 % et les **frênes** : 7 à 8 %.

### **Suivi des modalités : interventions en éclaircies et travaux**

**Dans chaque modalité, 20 arbres d'avenir ont été numérotés et sont mesurés en circonférence tous les 3 ans ou après chaque éclaircie.** Les interventions d'élagage sélectif des 20 arbres d'avenir désignés dans chaque modalité seront identiques jusqu'à obtention d'une bille de qualité droite et élaguée sur une hauteur moyenne de 6 mètres.

**Le marquage de la 1<sup>ère</sup> éclaircie sélective** a été réalisée en hiver 2012/2013 dans les modalités moyenne (B) et forte (C) ; ainsi que dans les bandes d'isolement correspondantes. La **modalité moyenne (B)** a subi une réduction de densité afin de passer de 804 tiges/ha à **628 tiges/ha** soit un taux de prélèvement de 22 %. Pour la **modalité forte (C)**, la densité de 836 tiges/ha a été réduite à **492 tiges/ha** soit un taux de prélèvement de 41%. Pour l'essentiel les prélèvements ont supprimé, dans les deux cas, les bois blancs dominants dans les lignes d'accompagnement ; mais pour le détournage, parmi les hêtres, l'ordre de grandeur de prélèvement s'élève à 1 individu codominant par arbre d'avenir désigné pour la modalité B, contre 3 pour la modalité C.



Cerclé de rouge, un arbre d'avenir désigné et élagué dans la placette B (modalité moyenne) avec éclaircie sélective en hiver 2012/2013. (Gilles Poulain © CNPF)

Le **défourchage et l'élagage sélectif** des arbres d'avenir sur les trois modalités jusque 6 mètres a été réalisé au printemps **2017**. En moyenne, cela a concerné 4 à 5 branches par arbre pour des diamètres supérieurs à 3 cm. Les hauteurs de bille nette de nœud ont atteint 4 mètres.

Enfin, le marquage de la seconde éclaircie sélective date de l'hiver 2019-2020. Les densités des **placettes d'intensité moyenne (B)** et **forte (C)** ont respectivement été réduites de 628 à **500**

**tiges/ha** (taux de prélèvement à **20 %**) ; et de 492 à **350 tiges/ha** (taux de prélèvement à **29 %**). Les tiges coupées ont pu être exploitées en bois de chauffage avec des diamètres autour de 20 cm pour la placette B et 22 cm pour la placette C. Ce marquage a également été couplé à un élagage définitif à 6 mètres des arbres d'avenir. Le nombre de branches variait cette fois-ci entre 4 et 6 par arbre mais pour des diamètres de 2 à 4 cm.



Placette témoin (A) : pas de marquage d'éclaircie. (Gilles Poulain © CNPF)



Placette d'intensité moyenne (B) : éclaircie pour ramener la densité à 500 tiges/ha. (Gilles Poulain © CNPF)

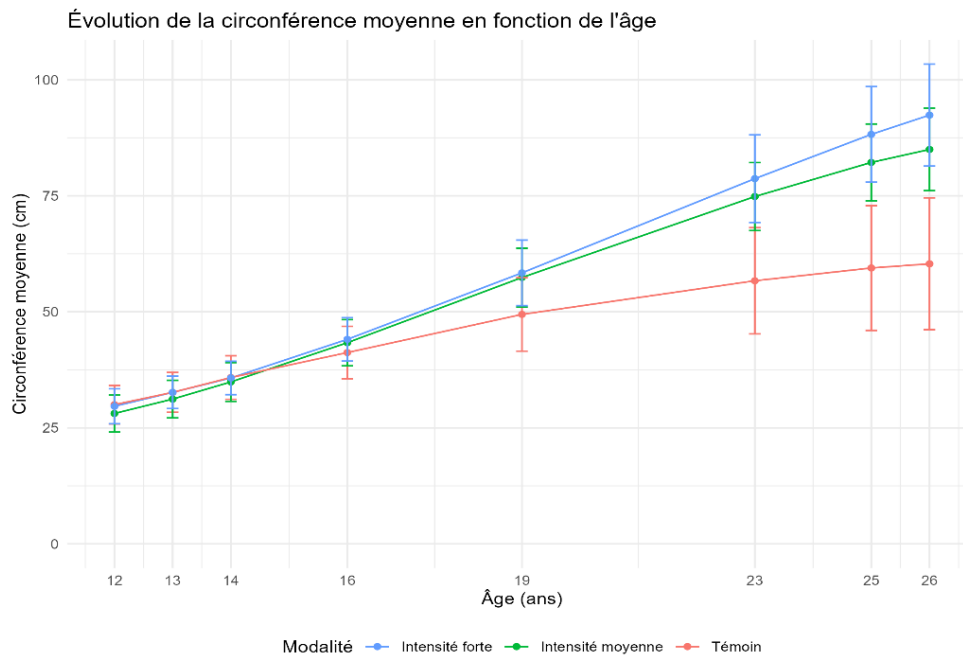
### **Résultats :**

Les circonférences moyennes initiales sont similaires avec des moyennes respectives à 30 cm de circonférence, 28 cm et 30 cm selon l'intensité croissante de la modalité.

La courbe des circonférences moyennes des deux modalités commencent à s'éloigner de celle du témoin dès 5 ans après l'installation des modalités.

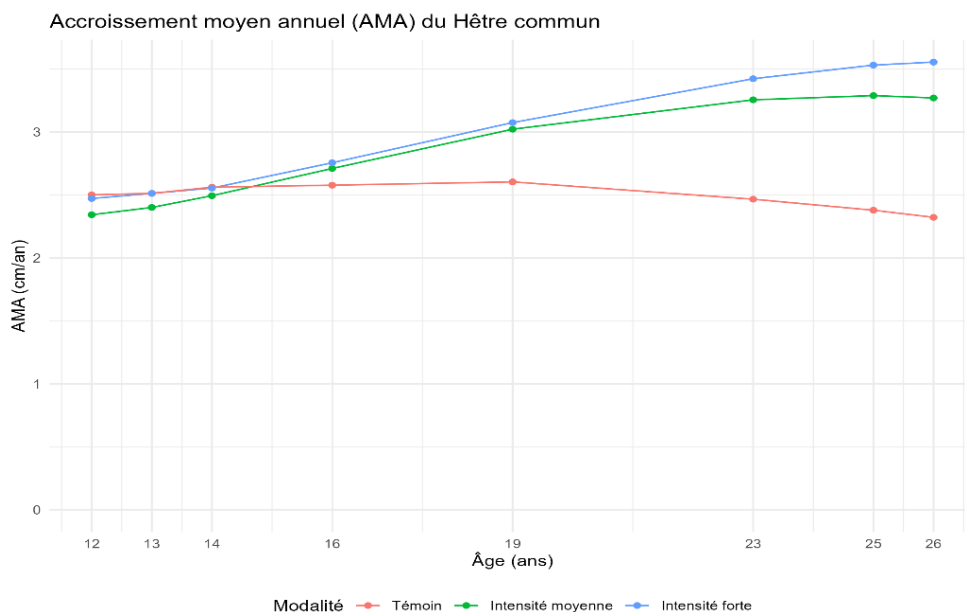
La **placette témoin** a montré une **croissance plus faible**, et même un début de stagnation ces quelques dernières années. A 26 ans, la moyenne des circonférences y est de **60 cm**. **Cette moyenne est significativement inférieure aux modalités avec éclaircie.**

La courbe de la modalité de **forte éclaircie** (C), avec **92 cm** de moyenne de circonférence à 26 ans, semble à première vue être un peu supérieure à celle de la modalité **moyenne** (B), qui obtient **85 cm**. **Cependant, les moyennes ne se distinguent pas encore de façon significative sur le plan statistique.** L'avantage entre présence/absence d'éclaircie est net et confirmé mais il n'est pas encore tout à fait validé entre les deux intensités.



Les résultats des **accroissements moyens annuels de circonférence** ne sont pas surprenants au vue des courbes précédentes : globalement, **la modalité témoin montre des accroissements stagnants voire diminuants, alors que ceux des modalités d'éclaircie augmentent, avec en tête la modalité d'éclaircie forte. La distinction se fait clairement dès 14 ans** (hauteur dominante 10 m) : à partir de cet âge, pour la modalité témoin, les arbres sont visiblement trop en concurrence. L'accroissement moyen est de 2,3 cm/an à 26 ans, ce qui est une valeur un peu basse pour ce qu'on pourrait en attendre (entre 2,4 et 2,7 cm/an).

**La première éclaircie à 13 ans, s'est avérée davantage positive pour la modalité d'intensité moyenne** que celle d'intensité forte : pour la modalité intermédiaire, l'accroissement moyen annuel fait un bond et réduit l'écart avec la modalité forte, qui réagit peu la première année. Si on se penchait sur les accroissements courants, on verrait que la valeur est bien plus élevée pour la modalité intermédiaire. En revanche **c'est plutôt l'inverse pour la seconde éclaircie à 20 ans** : les accroissements de la modalité forte montrent une plus grande augmentation. A 26 ans, les accroissements moyens annuels sont respectivement de 3,3 et 3,6 cm/an, ce qui cette fois-ci est bien supérieur à ce qu'on peut attendre en moyenne.



L'éclaircie est destinée à maintenir, relancer ou améliorer la croissance en volume et en qualité. La modalité témoin illustre bien qu'élaguer sans éclaircir représente une perte de temps. L'âge charnière de croissance se situe vers 15 ans ici, ce qui correspond à une hauteur dominante de 10 m environ. Les hêtres des modalités d'éclaircie, qu'elle soit modérée ou forte, ont tout deux montré de bonnes réactions de croissance des individus restants. A première vue, c'est dans la modalité forte que les résultats semblent meilleurs; même si la tendance est peut-être encore trop récente et demandera à être confirmée. Pour ce peuplement, les éclaircies ont été réalisées dès que le besoin s'est fait ressentir, mais qu'en est-il en cas de retard ?

### Retard d'éclaircie : un rattrapage limité

Le CNPF suit en région d'autres dispositifs sur la thématique de l'éclaircie du hêtre, et en particulier 3 d'entre eux sont pertinents vis-à-vis du retard et de son rattrapage. A noter que les éclaircies citées sont celles indiquées dans le dossier, aussi complet qu'il peut l'être. Ces essais font partis des archives à cause du résultat mitigé.

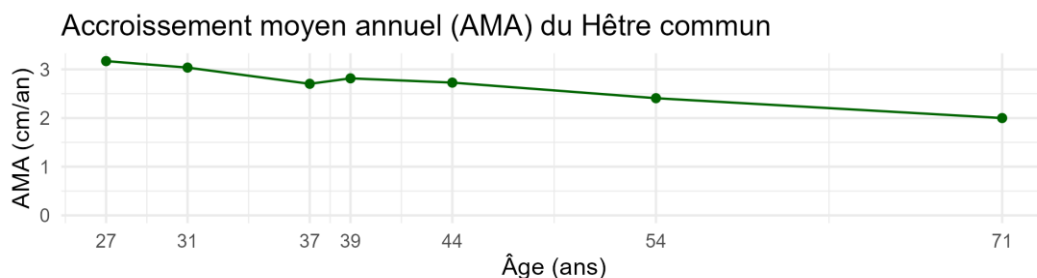
Il y a le dispositif n°**59 53 001**, localisé en Ardenne primaire (Felleries, 59) et planté en 1953, avec une densité moyenne de 900 plants/ha.

La station y est acide, avec une bonne réserve utile mais un engorgement temporaire ; ce qui correspond à des potentialités sylvicoles moyennes.

Le suivi a été mis en place afin d'essayer de rattraper un fort retard d'éclaircie.

La première éclaircie renseignée, légère et par le bas, a été réalisée à l'âge de 29 ans ; suivie d'une éclaircie sanitaire de 25% à 41 ans (chancre) et une autre éclaircie de 25% à 45 ans.

Aujourd'hui, le peuplement présente une surface terrière plutôt forte de 26 m<sup>2</sup>/ha mais un coefficient d'élancement assez faible de 58.



**L'accroissement moyen était initialement très bon avec environ 3 cm/an autour de 30 ans** (usuellement attendu entre 2,3 cm/an et 2,6 cm/an pour cet âge). Mais il a ensuite diminué plus rapidement que la moyenne ; **et aujourd'hui, il se situe à 2 cm/an, alors qu'on en attendrait au moins 2,2 cm/an, ce qui est donc très moyen.** Ces accroissements sont constamment **en pente descendante, sans montrer de ralentissement après les éclaircies : le peuplement n'a pas clairement réagi aux éclaircies tardives.**

Sur ce dispositif, on peut également souligner que la sylviculture conservatrice initiale ne comprenait **presque pas de taille ou d'élagage en contrepartie ; mais la densité n'était peut-être alors pas assez forte pour capitaliser sur cet avantage** car à 37 ans, on retrouve un commentaire indiquant que 40% des individus sont malgré tout flexueux et 40% sont fourchus : **l'élagage naturel** a été **déficier** avec des nœuds recouverts et des billes de pied de qualité moyenne.

Les deux autres dispositifs peuvent être évoqués de façon simultanée (n° **80 55 120** et **80 68 059**). La première a été plantée en 1955 et la seconde en 1968 ; sur la même propriété, en

Vimeu (Bouillancourt-en-Séry, 80). Les densités y étaient très élevées avec respectivement 5 900 plants/ha et 5 500 plants/ha.

Les stations y sont très similaires avec un sol peu acide, une réserve utile insuffisante et une absence d'engorgement ; avec des potentialités sylvicoles faibles à moyennes pour la première et moyennes à bonnes pour la seconde.

La première placette indique 5 éclaircies avec une première à 31 ans puis à 33 ans (prélèvement de 36% dans un peuplement de hauteur dominante 18,5 m) ; 37 ans (prélèvement de 36% dans un peuplement de hauteur dominante 20 m) ; 42 ans (prélèvement de 17% dans un peuplement de hauteur dominante 22 m) et 67 ans (prélèvement de 19% dans un peuplement de hauteur dominante 31 m).

Pour la seconde placette, la première éclaircie est un peu moins en retard, à l'âge de 20 ans, mais les suivantes le sont davantage avec 38 ; 49 et 55 ans (hauteur dominante 30 m).

Aujourd'hui les surfaces terrières ne sont pas trop élevées avec 24 et 23 m<sup>2</sup>/ha ; et les coefficients d'élancement restent raisonnables avec 80 et 70.

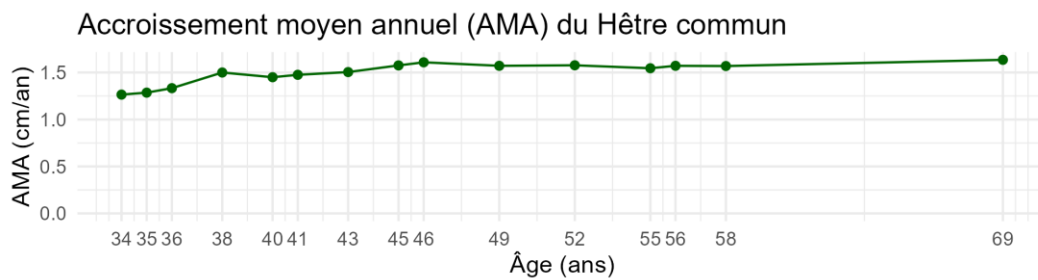


**Dispositif n° 80 55 120**  
(Pauline Surmont © CNPF)



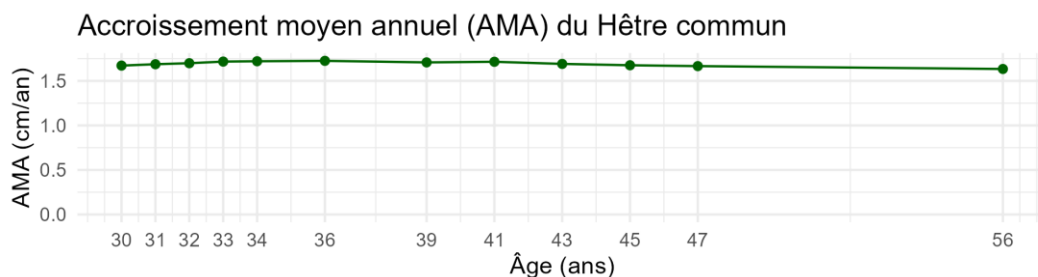
**Dispositif n° 80 68 059**  
(Pauline Surmont © CNPF)

Le graphe suivant correspond à la placette n° 80 55 120 :



On peut y voir que pour les premières éclaircies (31 ; 33 et 37 ans), le peuplement semble avoir tout de même réagi en augmentant progressivement. Il en est de même autour de celle de 42 ans, après qu'il ait diminué légèrement, il reprend une pente positive, même si faible. Il n'y en a ensuite plus (pas avant 67 ans) et l'accroissement finit par stagner. **Il y a donc bien réaction du peuplement à l'éclaircie, néanmoins on peut souligner que les valeurs restent très basses** : actuellement, l'accroissement moyen annuel est de 1,6 cm/an, ce qui est une valeur faible par rapport à ce qui peut être attendu pour cet âge (entre 1,9 et 2,1 cm/an). **Le retard de la première éclaircie n'est que contenu sans pouvoir être corrigé** (d'autant que les potentialités sylvicoles moyennes voire faibles n'aident pas).

Le graphe suivant correspond à la placette n° 80 68 059 :



**Malgré une première éclaircie moins tardive, l'accroissement moyen annuel semble ne pas avoir du tout réagi aux éclaircies (cf. 38 ; 49 et 50 ans) avec une courbe qui ne fait que stagner, à des valeurs basses qui plus est.** Actuellement, l'accroissement moyen annuel est identique à celui précédent (1,6 cm/an), alors même que les hêtres sont plus jeunes (accroissement moyen annuel attendu autour de 2,1 et 2,2 cm/an), alors que les potentialités de la station sont même sensées être un peu meilleures.

*Sur les dispositifs de suivi du hêtre en rattrapage d'éclaircie le constat est flagrant : le peuplement peut éventuellement réagir au travers d'un maintien voire d'une légère augmentation de ses accroissements moyens annuels ; mais cette réaction n'est pas systématique et les valeurs restent basses : le retard n'est pas rattrapé. De plus, la vigilance doit être maintenue au fil des années et pas uniquement sur la première éclaircie. En conséquence, la durée de révolution est allongée et/ou le diamètre objectif de récolte est diminué.*

**Sylviculture dynamique : une très forte productivité mais qui se joue tôt et de façon soutenue**

Si la sylviculture dynamique du hêtre est menée **dès le jeune âge, le hêtre répond favorablement** et sa productivité explose par rapport au cycle moyen usuel : il peut alors atteindre de façon assez précoce les diamètres d'exploitabilité. Cette sylviculture peut **maximiser les chances de produire un bois blanc plus rapidement, sans qu'il soit nerveux** ; tout en **diminuant la pression de concurrence pour la ressource eau**, ainsi que **l'exposition du peuplement aux aléas climatiques** (qui deviennent de plus en plus récurrents et intenses). Les deux dispositifs<sup>13</sup> suivant illustrent cette notion de sylviculture dynamique : les avantages mais aussi les contraintes.

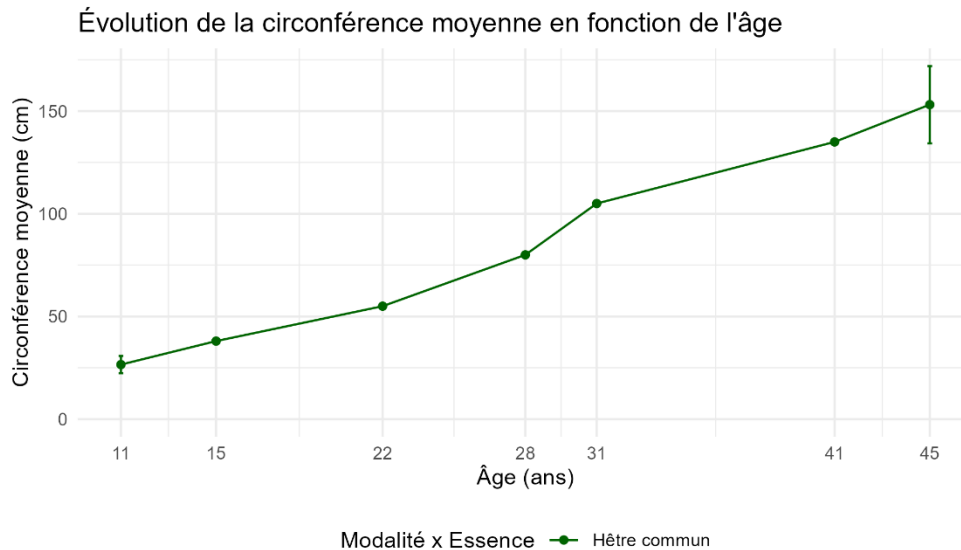
Le premier dispositif est le n°**62 81 013**, il a été planté en 1980 sur les collines de l'Artois (Gauchin-Verloingt, 62). La station a pourtant de faibles voire très faibles potentialités sylvicoles avec un sol calcaire peu profond (réserve utile insuffisante).



La première éclaircie a été réalisée à 21 ans avec un prélèvement de 20%. A 26 ans, quelques individus chancreux ont été prélevés. La deuxième éclaircie est menée à 28 ans (hauteur moyenne 18 m), avec une plus forte intensité (30%) ; et la troisième à 40 ans, plus légère (15 à 20 %). Il est prévu une éclaircie pour 2027. On peut relever que **les âges et la fréquence n'apparaissent pas particulièrement intenses à première vue, mais c'est en réalité grâce aux larges écartements initiaux** (4 x 4 m soit une densité initiale de 625 plants/ha). Aujourd'hui, **le peuplement de 45 ans** présente une surface terrière de 19m<sup>2</sup>/ha, avec des hêtres de **circonférence 153 cm, ce qui est une valeur qu'on attendrait plutôt autour de 70 ans. L'accroissement moyen annuel est de 3,4 cm/an** ce qui est une **valeur très élevée** (moyenne attendue entre 2,2 et 2,4 cm/an à cet âge), d'autant plus si on considère les potentialités

limitées de la station.

<sup>13</sup> Le dispositif n° 62 93 897 correspond également à de la sylviculture dynamique mais est encore un peu jeune pour être pleinement démonstratif.



Dans le cadre de la sylviculture dynamique, il est néanmoins nécessaire de souligner les **besoins en taille et élagage qu'induit le manque de compression** car le hêtre est déjà initialement une essence avec une **forte tendance à fourcher**. Il réagit bien à la taille si les branches coupées ont un **diamètre raisonnable (maximum 3 cm)**; mais cela reste néanmoins nécessaire dans le cadre de cet itinéraire. Et sur ce même aspect, plus tard, il faut éventuellement **surveiller la formation de suppléants potentiels**. Sur le dispositif précédent de Bertincourt avec les comparaisons d'intensité d'éclaircie par exemple, il a été signalé que pour la plus forte, il y a visiblement plus de suppléants qui se forment sur les **troncs, davantage exposés à la lumière**. Or cela peut jouer sur **l'aspect qualitatif des bois**. Pour contrer ce dernier aspect, il est conseillé de **laisser le sous-étage se développer sous les hêtres** : de toute façon, l'ouverture soutenue des houppiers est elle-même favorable au recrutement, il suffit de laisser faire tout en conservant un accès aux arbres. Ce sous-étage permettra également de **limiter les coups de soleil** (aucun relevé sur les deux dispositifs dynamiques).

*Attention, en présence de chancre (*Nectria ditissima*), il est plutôt conseillé d'éviter de tailler : les plaies ouvertes favorise l'installation de ce champignon et ce dernier peut provoquer une déformation du tronc et donc une dépréciation du bois. En cas de taille nécessaire malgré sa présence, il est possible exceptionnellement de couper, non pas au ras du tronc, mais à une distance de 1 cm.*

Le second dispositif, le n°**59 76 069**, est une bonne illustration qu'**une fois la sylviculture dynamique du hêtre initiée, il ne faut pas rompre la cadence**.

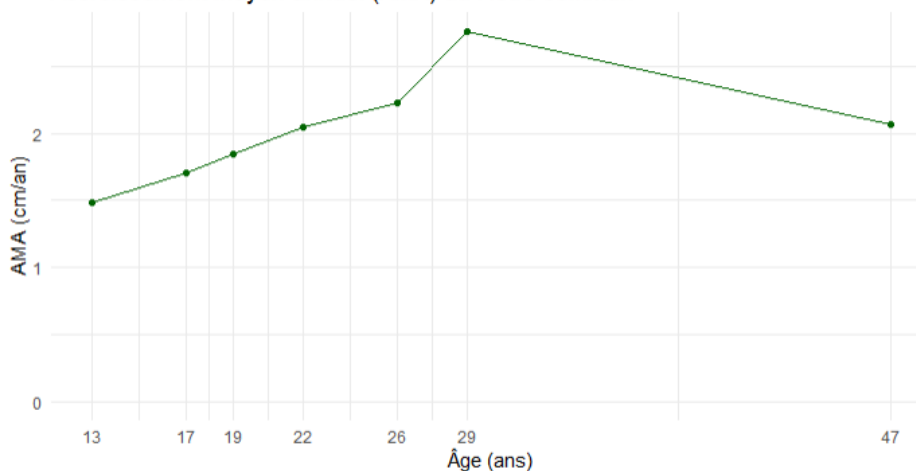


Le peuplement a été planté en 1976 à forte densité (1 666 plants/ha) ; même si la plupart des plants d'aujourd'hui sont issus du regarnis de 1977 à cause d'une forte sécheresse estivale. La station sur plateau de l'Ardenne Primaire (Felleries, 59) y est acide, avec une bonne réserve utile et sans engorgement; ce qui correspond à de bonnes potentialités sylvicoles.

Entre 15 et 37 ans, il y a eu une opération de dépressage (à 15 ans) ainsi que 6 éclaircies. La première a été menée à 17 ans vers une hauteur moyenne de 10 m, de façon légère (10%), afin de retirer des « loups » bas-branchus. Les suivantes ont ensuite été d'intensité moyenne avec 25% à 20 ans (H moy. = 11 m); 35% à 24 ans (H moy. = 15 m) ; 25% à 27 ans, 35% à 30 ans et 25% à 37 ans. Sur le graphe suivant, on peut clairement voir **l'augmentation accentuée des accroissements moyens annuels dans les trentes premières**

**années du peuplement** (petit trou de données entre 30 et 40 ans pour pleinement appréhender les bénéfices néamoin) ; **suivie d'une diminution brutale** : la valeur actuelle est à peine dans la fourchette moyenne de ce qui peut être attendu pour cet âge (2,1 cm/an).

Accroissement moyen annuel (AMA) du Hêtre commun



Si la sylviculture dynamique est mise en place dès le jeune âge, le hêtre réagit bien : il prend la place qu'on lui donne et montre de très fortes productivités, sans que cela nuise à la qualité technologique de son bois. Néanmoins, une fois initiée, la cadence doit être maintenue, au risque de perdre les bénéfices. De plus, il ne faut pas sous-estimer les besoins en taille et élagage que l'absence de compression induit.

## Le hêtre en mélange ou avec du recru

### Pourquoi mélanger le hêtre

Les bénéfices attribués aux mélanges ont particulièrement émergé en contexte de climat changeant : de façon générale, diversifier les essences permet de diversifier les sensibilités propres à chaque espèce (face à des facteurs biotiques comme des ravageurs mais aussi abiotiques comme le vent) ; d'avoir une complémentarité dans l'utilisation des ressources (dans les quantités, l'espace et/ou le temps), de favoriser la biodiversité (et les avantages induits [2]) ; voire d'engendrer des phénomènes de facilitation. Ainsi, la résistance [3] et résilience des essences face au changement climatique peuvent être augmentées en mélange.

Il est important, toutefois, de souligner que la **nature même du mélange module les effets obtenus** : toutes les associations d'essence n'apportent pas forcément les mêmes bénéfices. Les effets des différentes compositions d'essences sur **l'exposition du hêtre à la sécheresse** en est un exemple bien documenté. Que le hêtre soit moins exposé à la sécheresse en mélange serait notamment expliqué par une occupation différenciée et complémentaire de la ressource en eau, dans le temps et/ou l'espace [4]; une redistribution hydraulique; ou encore un micro-climat plus favorable. Alors que le hêtre a su montrer une **moindre exposition** en forêt tempérée **diversifiée** [5][6][7], comme lorsqu'il est associé avec le **chêne sessile** [8][9]; le mélange s'est révélé **neutre** avec **l'épicéa** [10]; voire **défavorable** avec le **chêne pédonculé** [11], ou avec les **tilleuls à petites et grandes feuilles** [12]. En somme, l'effet du mélange sur l'exposition à la sécheresse n'est pas systématique [13]. Au delà de la nature de l'association, il peut également être modulé par les conditions du milieu [14], ce qui peut notamment expliquer l'obtention de **résultats contraires pour une même composition**. C'est le cas dans l'association **hêtre-chêne pubescent** qui s'avère **neutre** sur l'exposition à la sécheresse chez Jourdan (2019) [15] ; mais **aggravant en conditions climatiques limites** chez Martin-Blangy (2021) [16]. Mais ces mêmes associations peuvent tout à fait montrer des effets différents sur un autre aspect : en fonction des associations, la **nature des bénéfices** et leurs **intensités** pourront **varier** ; de façon générale le mélange est avantageux face au changement climatique mais il s'agit de savoir si la mise en place du mélange cherche à valoriser un aspect en particulier, afin **d'ajuster** au mieux le **choix des essences**.

Les bénéfices précédemment cités deviennent de plus en plus nécessaires dans le cadre du maintien et de l'intégrité même des peuplements. Mais la conciliation de la résilience avec la rentabilité reste tout de même légitime. Vis-à-vis de la **productivité**, les constats sur les mélanges impliquant le hêtre sont parfois partagés (cf. conclusions contradictoires pour une même association), mais **de façon générale, le hêtre semble profiter du mélange** [17], et ce, même **davantage que les essences qui l'accompagnent**<sup>14</sup>. Concernant la **qualité** des bois, il s'avère qu'en mélange, le hêtre est également **bénéficiaire** grâce au **gainage** fourni par les essences accompagnatrices. Et pour finir, la **diversification** des essences implique également celle des

---

<sup>14</sup> En mélange, quand l'effet bénéfique pour le hêtre s'accompagne d'un effet neutre -voire positif- pour l'autre essence, c'est la productivité globale du peuplement qui est augmentée. Cependant, ce résultat n'est pas systématique avec toutes les essences : ce n'est par exemple pas le cas avec le chêne sessile, dont la productivité subit un effet négatif.

**revenus**, grâce à la notion d'**essence relai** qui limite les risques, particulièrement pertinente en cas de décrochage d'une des espèces.

### Avec qui et comment mélanger le hêtre ?

Pour qu'un mélange fonctionne, le **prérequis** est de connaître les **préférences stationnelles**, les **comportements** et les **contraintes sylvicoles de chaque essence** impliquée. De part sa large amplitude écologique, le **hêtre** trouvera de nombreuses associations possibles ; mais avec lui, ce sont les questions de **concurrence** et de croissance qui nécessitent une attention particulière.

Les mélanges qui fonctionnent usuellement bien concernent des essences dont la vitesse de croissance sont similaires [18] . Ces associations ont l'avantage de la **simplicité de gestion sylvicole** car les essences évoluent à un **rythme équivalent**. Comme le hêtre montre dans son jeune âge une croissance modérée voire assez lente, on peut ici s'orienter vers des **essences à croissance lente** telles que le **chêne**<sup>15</sup> ou l'**alisier torminal**. Il est tout de même important de souligner que, par son caractère sciaphile, le hêtre représente une **concurrence d'autant plus forte que celles-ci sont exigeantes en lumière**.

C'est ce même côté sciaphile qui justifie que les essences dont la **croissance juvénile est forte** (souvent à tendance pionnière et héliophile), forment également des **associations pertinentes**. Dans sa thèse, Mateus Liziniewicz (2009) [19] souligne que ce type d'associations a une influence **positive sur la forme des hêtres et la qualité de leur bois**; ainsi que sur la **régénération artificielle** du hêtre. Le hêtre s'accommode de l'ombrage d'autres individus lors de ses jeunes années ; alors que ces essences accompagnatrices (et donc transitoires), une fois rattrapées et dominées, lui laisseront la place de se développer. Comme les feuillus, on peut par exemple citer le **châtaignier**, le **chêne rouge d'Amérique**, le **bouleau verruqueux** ou le **merisier** [20]. Et concernant les résineux, on pourra retrouver le hêtre avec du **douglas**, du **mélèze**, des **sapins** ou encore des **pins**. Attention, pour un mélange avec des essences à forte croissance juvénile, un **suivi sylvicole attentif** sera **nécessaire** (taille et élagage) pour assurer la bonne qualité technologique des bois des essences secondaires.

Dans les deux cas, le **choix des essences principales et secondaires implique une réflexion initiale sur la sylviculture à mener**. Il s'agit de définir non seulement les objectifs intermédiaires et finaux à atteindre ; mais aussi les indicateurs à surveiller pour définir les différentes phases du peuplement : par exemple, une phase de compression suivie d'une fragmentation du couvert [21]. Pour la compression, il ne faut pas négliger la notion de densité, quitte à compléter avec des essences d'accompagnement, voire de bourrage, ou même du recru naturel. Dans cette réflexion initiale, la question de la **forme du mélange** est également primordiale : certains mélanges pourront se faire **piéd à piéd, en mélange intime** ; alors que d'autres nécessiteront des **bandes espacées** voire **des îlots ou des bouquets, pour laisser de l'espace vital**. A noter que si le souhait est d'aboutir à une régénération naturelle, l'hétérogénéité spatiale potentielle des essences induite par le mélange complexifie la réflexion.

### Un exemple de mélange en région : hêtre et alisier torminal à Wahagnies (59)

---

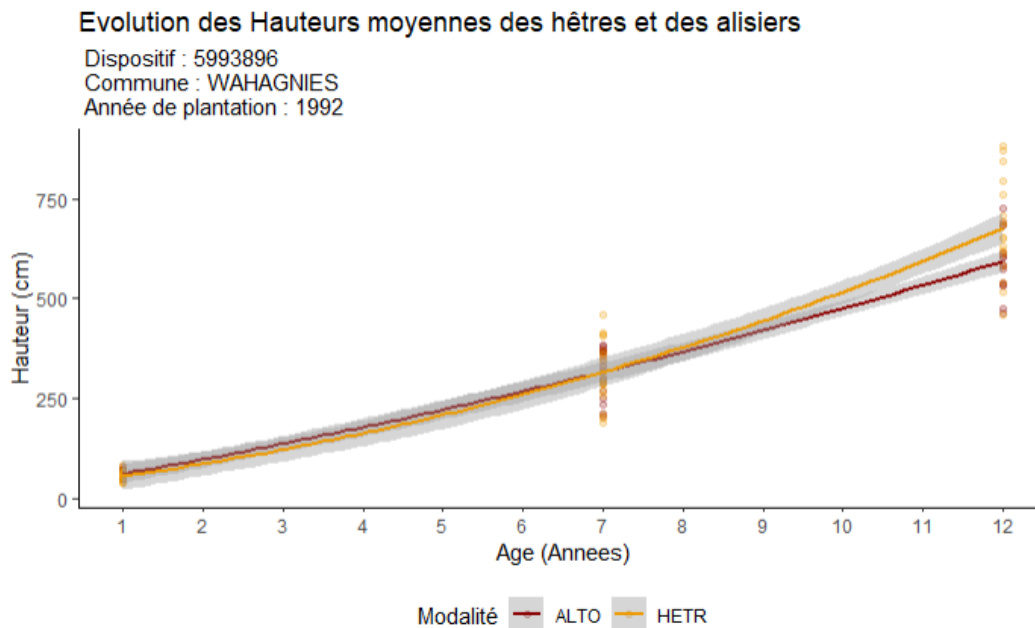
<sup>15</sup> La productivité du chêne sessile en mélange avec le hêtre est moindre mais le mélange reste viable !





Plantation mixte hêtre-alisier torminal de Wahagnies en juillet 2024. (Gilles Poulain © CNPF)

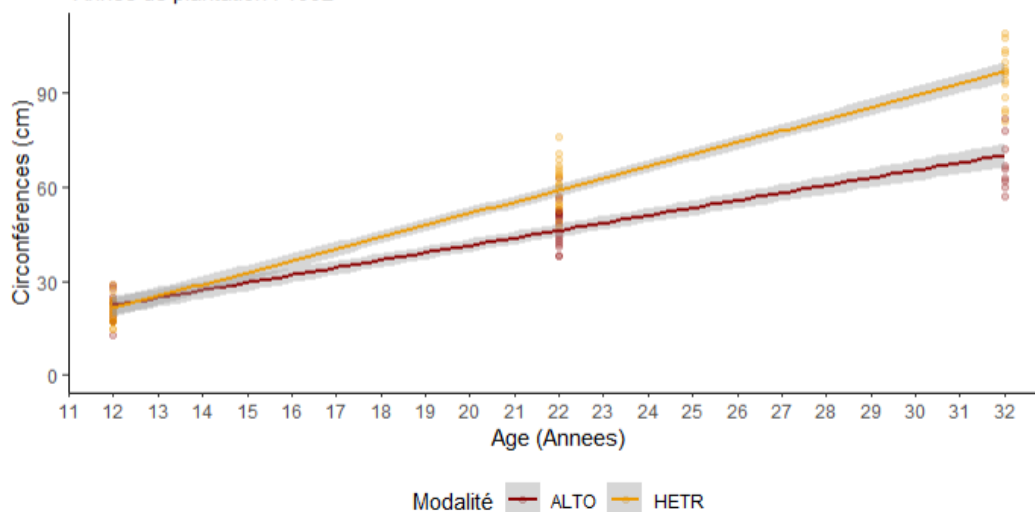
Les résultats des mesures en hauteur (pour les gaules et perches cf. entre 1992 et 2004) et en circonférence (à partir du stade petit bois cf. à partir de 2004) sont données par les graphes<sup>16</sup> suivants :



<sup>16</sup> L'année de plantation indiquée est 1992 afin de parler en termes d'année de végétation

### Evolution des circonférences moyennes des hêtres et des alisiers

Dispositif : 5993896  
Commune : WAHAGNIES  
Année de plantation : 1992



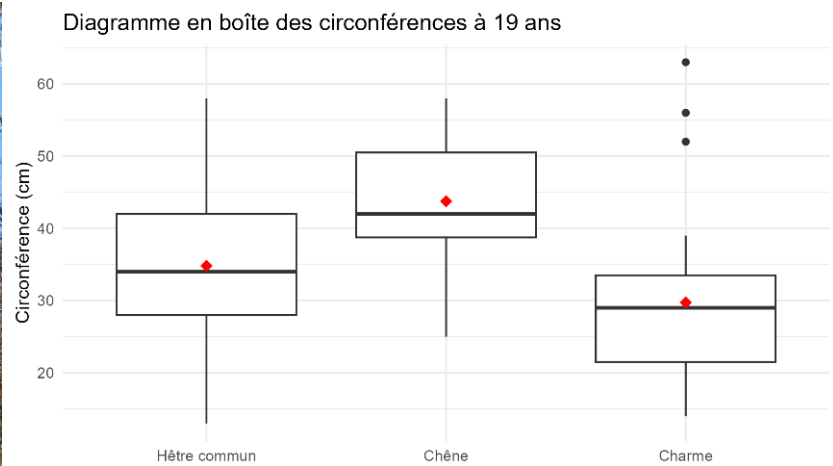
Sur les dernières mesures de 2024, il ne reste que la moitié des alisiers mesurés car beaucoup se sont faits dominer entre temps voire en sont morts. Ce qui est intéressant de retenir de cette placette, dès aujourd'hui c'est que **le mélange pied à pied entre l'alisier et le hêtre ne fonctionne pas pour l'alisier : le hêtre est trop compétitif** et le premier se fait rapidement dépasser et dépérit sous l'épais feuillage de ses voisins. **Un mélange par petits bouquets d'alisiers est donc plus adéquat** pour cette association (ce qui a pu être confirmé avec le dispositif n° **62 98 035**).

D'autres mélanges avec des essences nouvelles sont en début d'expérimentation, c'est le cas notamment du mélange avec le chêne pubescent dans le Pas-de-Calais, à Hericourt.

#### Des exemples de hêtre par bande ou larges écartement : planter moins et inviter le recru

Le plus bel exemple de diversification du hêtre par plantation par bandes et valorisation du recru est le dispositif n°**59 05 117**, situé en Ardenne Primaire (Sains-du-Nord, 59). Sur ce haut de versant peu pentu, la station est de potentialité sylvicole moyenne : la réserve utile y est bonne (146 mm), avec un sol acide et temporairement engorgé. La plantation de 2005 fait suite à un peuplement d'épicéa commun mûr, accompagné de chênes, de charmes et de bouleau. Le bloc de hêtre est planté par couples de lignes espacées de 4 m entre elles et avec 8 m entre chaque couple. Sur la ligne les plants sont espacés de 2 m. La densité est alors de 834 plants/ha. Les dégagements y ont été réguliers, au gyrobroyeur de part et d'autre des lignes, avec finitions au croissant sur les lignes. Dans les interbandes, **c'est d'abord le bouleau qui s'est particulièrement développé, dominant les hêtres et nécessitant deux dépressages (à 6 et 11 ans) ; mais une fois contenu, une bonne diversité a pu s'exprimer**. Ainsi sur la placette inventoriée, le **hêtre** ne représentait plus que **54 %** des individus, issus de la plantation mais aussi de régénération (d'ailleurs, en comparaison avec ceux plantés, les hêtres venus de façon naturelle sont souvent de meilleure forme). Ils étaient alors accompagnés par **24 %** de **chêne**, souvent de belle forme ; **20 %** de **charme** ainsi que quelques **douglas** et **bouleaux** dissimulés. Par ailleurs, la circonférence

des chênes est d'ailleurs en moyenne significativement plus élevée que celle des hêtre (et des charmes).



Les bandes présentent l'avantage de faciliter les accès et dégagements. Mais il est également possible d'aller chercher du recru en jouant uniquement sur les écartements simple.

C'est ce qui s'est passé sur le dispositif n° **62 87 431**, localisé sur les collines de l'Artois (Bucquoy, 62). Les conditions stationnelles renseignent des potentialités sylvicoles bonnes à très bonnes avec un sol peu acide, de bonne réserve utile (125 mm) et sans engorgement. La parcelle a été plantée en 1986 avec **une densité assez faible de 555 plants/ha (écartements de 3 x 6 m), le taillis était composé de bouleau, saule, châtaignier, érable sycomore et charme et a été valorisé**. Les regarnis en merisiers ont également participé à la diversification d'ailleurs. Dès la première **pré-désignation** en 1996 (**10 ans**), un certain nombre de **semis de qualité** a été **conservé** (en particulier du **châtaignier**, mais également de **l'érable sycomore** et éventuellement quelques **chênes pédonculés**). Ainsi, alors que les tailles de formations précédentes étaient concentrées sur les hêtres (à 4 ; 6 et 8 ans), les tailles et élagages



suiuants incluent ces nouveaux arbres d'avenir. A l'âge de 14 ans, le recru a été coupé au profit de ces derniers. Il y a eu ensuite trois éclaircies (à 20 ; 25 et 35 ans) et aujourd'hui, le peuplement se compose à **77% de hêtre**, accompagné de **15% de châtaigniers** (qui ont d'ailleurs une circonférence moyenne de 139 cm contre 108 pour les hêtres) ainsi que **quelques charmes et merisiers**.

### La diversité génétique du hêtre : une diversité de provenances

Les hêtres présents en Hauts-de-France sont génétiquement originaires d'une population refuge issue des Balkans et qui s'est étendue après la dernière glaciation. Lorsque les conditions de croissance sont redevenues plus propices au développement des individus, ces derniers se sont étendus depuis les zones refuges [22]. Cette population a ainsi colonisé le Nord de la France il y a plus de 2000 ans ; issue de générations successives durant lesquelles les hêtres ont pu s'adapter de façon continue aux conditions de leur milieu et développer des caractéristiques génétiques parfois propres aux populations locales.

### Les essais de provenances menés par le CNPF dans les Hauts-de-France

Quatre dispositifs de comparaison de provenances plus ou moins locales sont référencés dans le réseau de démonstration du CNPF dans la région (il y a également un dispositif de provenance locale mais qui ne permet aucune comparaison cf. n°02 78 002).

Le premier (**n° 60 98 075**) présente les provenances suivantes : Crécy (sur la façade ouest de la région), Eu (idem mais côté Normandie) , Halatte (au Sud de la région), Soignes (à l'est du bas-pays de Flandre, en Belgique), et Massif central (MC, éloignée de la région).

Il date de 1997 et il est situé en Vieille France sur station acide, avec une bonne qualité de réserve utile mais sans engorgement.

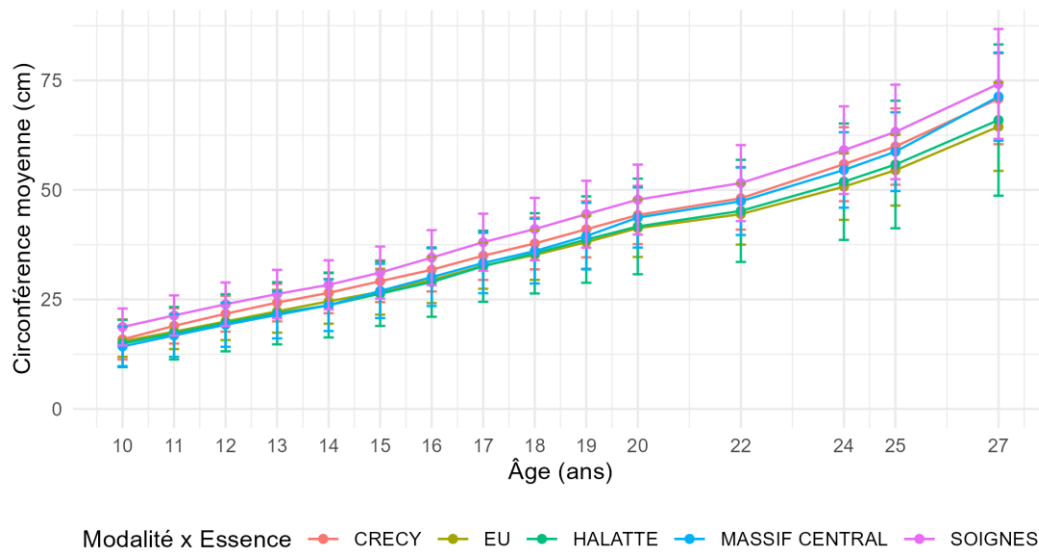
**En terme de mortalités, les résultats à 5 ans sont très bons avec des taux de reprise compris entre 88% (Halatte), et 96% (Soignes, Massif central et Eu) ; avec Crécy à 92%.**

On peut souligner que les plants ont été plantés à densité finale (en 7 m x 7 m) et il n'y a donc pas d'éclaircie sélective.

Lors de la croissance en hauteur, il s'avère **qu'entre 1 et 9 ans, les provenances ne sont pas significativement différentes les unes des autres, à l'exception de Soignes qui passe de la plus faible moyenne à 1 an, à la plus grande à 9 ans.**

Cette avance semble persister d'ailleurs car pour les résultats de croissance les plus récents, les comparaisons de moyennes révèlent que **la provenance Soignes est significativement supérieure à Eu ; même si Crécy, Halatte et Massif central ne diffèrent significativement ni de l'un ni de l'autre.** Le graphe suivant présente les données de circonférences par provenance.

### Évolution de la circonférence moyenne en fonction de l'âge



Les hêtres sont encore jeunes et les accroissements moyens sont donc en constante augmentation. Ils tournent autour de 2,5 cm/an actuellement, ce qui est pile la moyenne attendue pour cet âge.

Le deuxième dispositif (n° 62 93 897) présente également les mêmes provenances (Crécy, Eu, Halatte, Soignes et Massif central) auxquelles s'ajoutent la provenance Mormal (Ardenne primaire).

Il date de 1992 et est également situé sur station de bonne réserve utile et sans engorgement mais un peu moins acide (en Colline d'Artois).

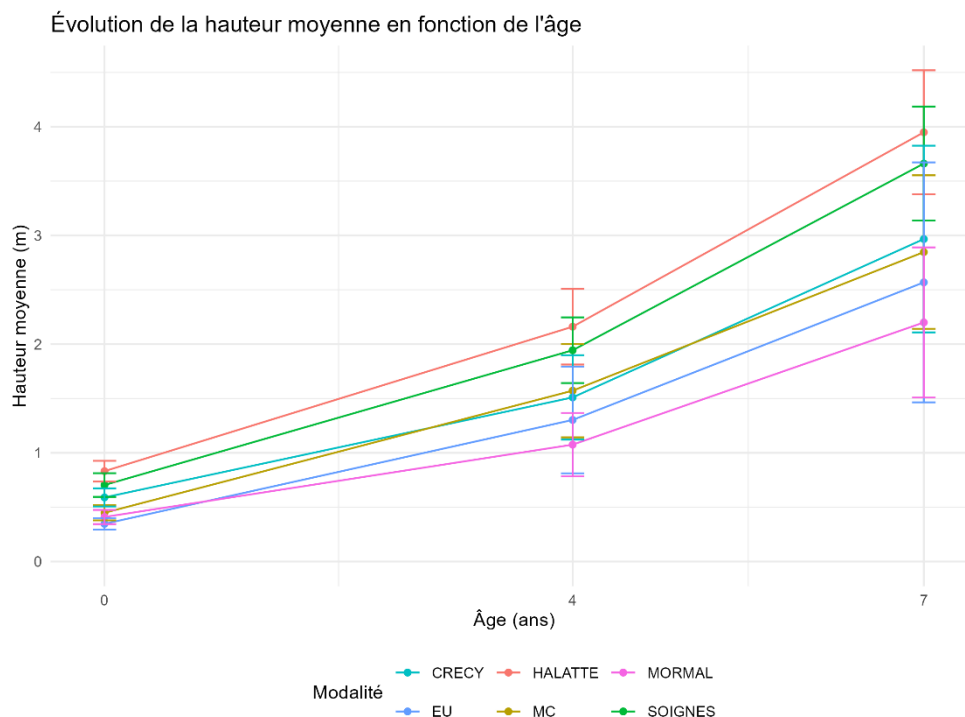
En terme de **mortalités à 4 ans**, les résultats sont également **très bons avec des taux de reprise allant de 90 % (Eu et Mormal) à 100 % (Massif central et Soignes)** ; avec 95% pour Crécy et Halatte.

**Contrairement à précédemment, dans le jeune âge, les croissances en hauteur ont conservé les différences de taille discernables à la plantation.** Ainsi, à l'année de plantation, toutes les modalités sont significativement différentes (exception pour Mormal, qui reste intermédiaire) et avec le classement croissant : Eu (a) < Mormal (ab) < Massif Central (b) < Crécy (c) < Soignes (d) < Halatte (e). Et à 7 ans, l'ordre s'est globalement conservé et il n'y a plus que les hauteurs pour Halatte et Soignes (groupe

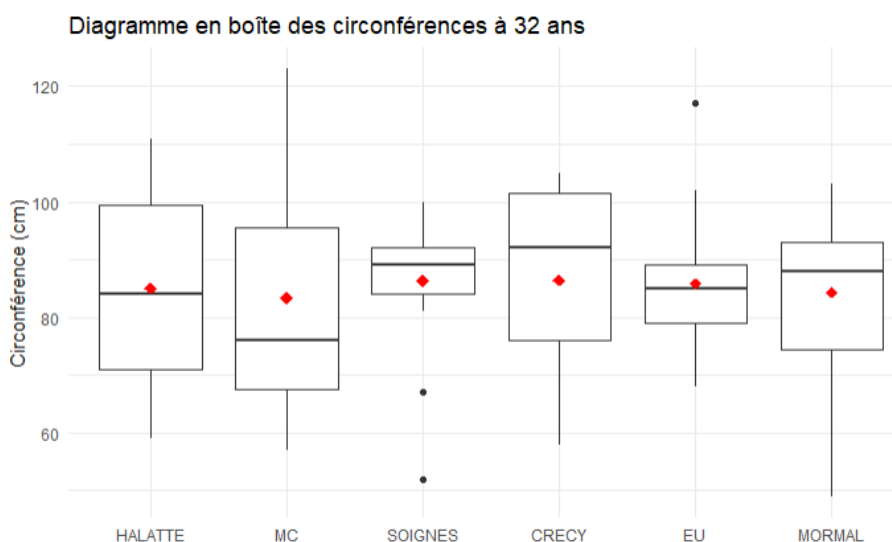


Pauline Surmont © CNPF

homogène) qui sont significativement plus grandes que Eu, Massif Central et Mormal (groupe homogène). La provenance Crécy ne se distingue pas des trois derniers ni de Soignes.



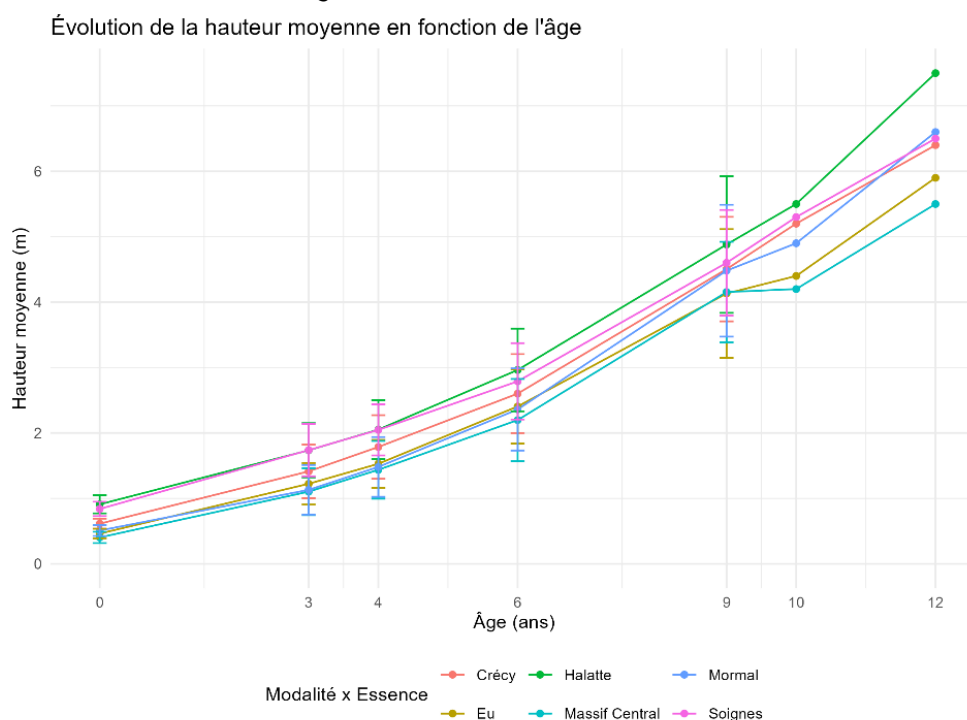
Néanmoins, finalement, **au fil des éclaircies sélectives, aujourd'hui, aucune modalité ne montre une différence significative**. Le boxplot des mesures 2024 en est assez révélateur :



Le troisième dispositif (**n°80 93 256**) présente les mêmes provenances que précédemment (Crécy, Eu, Halatte, Massif central, Mormal et Soignes). Il date de 1992 et est situé en région Vimeu, sur station de nouveau peu acide et sans engorgement mais avec une réserve utile plus intermédiaire.

**En terme de mortalité, les résultats sont un peu moins bons** pour certaines provenances : pour **Mormal, la survie est de 74% à 4 ans**. Massif central atteint tout de même 82% ; Eu 85 % ; puis on passe à 94 % pour Halatte et même **96% pour Crécy et Soignes**.

**Comme précédemment, il y a des différences de hauteur initiale, qui se gomment doucement lors de la croissance en hauteur mais dont l'ordre persiste tout de même** : à la plantation (0 an), les modalités présentent donc déjà des différences significatives (exception pour Eu, qui reste intermédiaire) avec le classement croissant : Massif central (a) < Eu (ab) < Mormal (b) < Crécy (c) < Soignes (d) < Halatte (e). Or à 12 ans, l'ordre a très peu changé, Halatte reste la plus grande hauteur moyenne tout en étant significativement différente de Massif central, qui est la plus faible ; alors que les autres provenances intermédiaires sont non discernables de l'un ou de l'autre. Les différences se sont gommées.



En revanche, il y a un changement vis-à-vis des circonférences : à 12 ans<sup>17</sup>, c'est **Soignes qui est significativement plus grande que le groupe formé par Eu, Massif central et Mormal** ; même si Crécy et Halatte sont intermédiaires aux deux groupes.

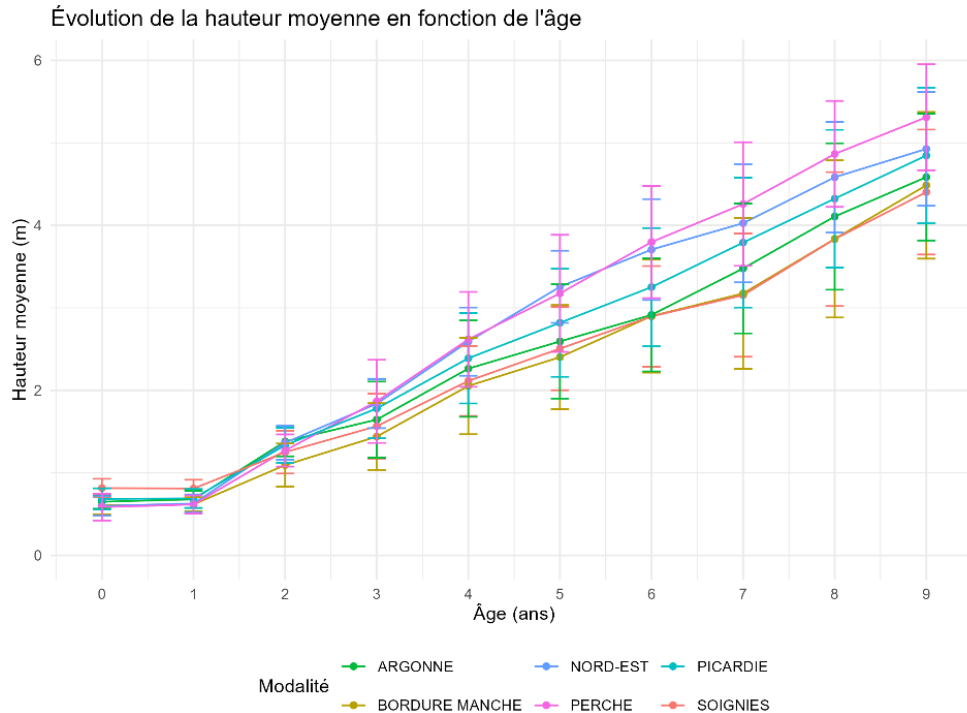
Le dernier dispositif (**n°80 97 064**) présente des provenances un peu différentes, avec une couverture géographique plus étendue mais parfois moins de précisions de provenance. On y retrouve Soignes comme provenance précise, mais pour le reste il s'agit de : Picardie, Nord-Est calcaire, Perche Argonne et Bordure Manche.

Il date de 1997 et est situé en région Vimeu, sur une station encore une fois assez similaire avec un sol peu acide, de bonne réserve utile et sans engorgement.

En terme de **mortalité**, les taux de reprise sont tous favorables à l'âge de 5 ans : **93 % pour Soignes et Argonne** ; 97 % pour Bordure Manche, Picardie et Perche et **100% pour NE calcaire**.

<sup>17</sup> Les individus sont aujourd'hui surcimés par des mélèzes et il n'a pas été possible de retrouver les différentes provenances.

Cette fois-ci, il n'y a **presque pas de différence de taille initiale**, avec juste **Soignes** a une moyenne significativement **plus grande** que le reste (et encore, elle n'est même pas discernable de Nord-Est calcaire). **Alors qu'à 9 ans**, les hauteurs se sont distinguées car on retrouve **Soignes au même titre que Argonne et Bordure manche, significativement plus petits que Perche**, avec Nord-Est calcaire et Picardie qui ne se distinguent ni des uns ni de l'autre.



Mais finalement cette distinction s'estompe avec les circonférences, car **à 16 ans, aucune différence significative n'est mise en évidence.**

**Récapitulatif des principales informations (les provenances non citées sont intermédiaires, souvent non discernables d'un point de vue significatif) :**

N°	Mortalité à 4 ou 5 ans	Différences initiales	Différences de hauteur	Différences de circonférence
60 98 075	Entre 88% (Halatte) et 92% (Crécy)	Aucune sauf Soignes plus faible	Soignes supérieure aux autres	Soignes supérieure à Eu
62 93 897	Entre 90% (Eu / Mormal) et 100% (Soignes / MC)	Toutes différentes Eu + faible Halatte + fort	Soignes et Halatte supérieures à Eu, MC et Mormal	Aucune
80 93 256	Entre 74% (Mormal) et 96% (Crécy / Soignes)	Toutes différentes MC + faible Halatte + fort	Halatte supérieure à MC	Soignes supérieure à Eu, MC et Mormal
80 97 064	Entre 93% (Soignes / Argonne) et 100% (NE calcaire)	Aucune sauf Soignes plus grande	Perche supérieure à Soignes, Argonne et Bordure Manche	Aucune

*Le CNPF suit 4 dispositifs de comparaison de provenances, plus ou moins locales en fonction de l'année d'installation.*

*Concernant la mortalité, les taux sont souvent favorables et aucune provenance n'a montré de défaillance répétée par rapport à d'autres (exception éventuelle avec une unique défaillance pour Mormal).*

*Au moment de la plantation, il n'est pas rare que les tailles initiales des plants diffèrent significativement, et même si les différences tendent à s'effacer, il y a une certaine persistance de l'ordre initial lors de la croissance en hauteur.*

*En termes de provenance, on peut relever que Soignes semble se démarquer car elle est citée à plusieurs reprises comme ayant la hauteur ou la circonférence moyenne significativement plus élevée que d'autres. Dans une moindre mesure, c'est également le cas pour Halatte. A l'inverse, Eu et Massif central, font plutôt partis des provenances associées à des croissances plus faibles.*

*Néanmoins, il n'est pas négligeable que sur deux dispositifs, il n'y a finalement plus de différence discernable entre les provenances en termes de circonférence.*

*Les conditions de station, de plantations et d'entretien ne sont pas homogènes entre les placettes, ce qui pourrait expliquer certaines différences de réaction.*

### La migration assistée dans le but de trouver des populations résilientes

Aujourd'hui, des inquiétudes quant à la vitesse du changement climatique pèsent de plus en plus ; remettant en question le rythme d'adaptation dont sont capables les arbres, eux dont le cycle de vie s'étend sur des dizaines d'années. Dans ce contexte, le thème de la migration assistée apparaît comme un potentiel élément de réponse. Il est attendu non seulement une augmentation des températures, mais aussi une irrégularisation des régimes de pluviométrie, avec en particulier, une diminution des précipitations en période estivale ; et finalement une accentuation et une répétition plus soutenue des sécheresses et des déficits hydriques. L'idée de la migration assistée de provenance est d'aller chercher des **graines issues de populations plus méridionales**, qui déjà aujourd'hui, sont **exposées à un climat plus sec** ; afin de les introduire plus au nord de leur aire de répartition originelle. Cette méthode part du postulat que les populations qui ont évolué dans des conditions plus contraignantes ont su développer, grâce à la sélection naturelle, des **traits génétiques leur permettant de mieux faire face à ces circonstances limites**. Sous un climat chaud qui progresse vers le Nord, les populations se déplacent dans cette même direction de façon spontanée, mais bien plus lentement (en moyenne, il y a un facteur 40 entre les deux), sans compter la fragmentation des habitats qui peut être un obstacle à la progression ; d'où l'intérêt de les « assister » dans leur « migration ». Cette notion est assez récente et la plupart des études se basent sur des modélisations. Besliu (2024) [23] ont tout de même mené une étude en conditions réelles pour le hêtre, avec 31 provenances à

travers l'Europe. Parmi les 4 provenances issues de France, deux sont citées comme ayant les **meilleures performances de croissance-survie (Perche et Ségala)** ; et trois ont montré les **meilleures plasticités moyennes** de l'étude (**Perche, Ségala et Jura**) et apparaissent comme ayant les meilleures capacités pour s'acclimater à conditions environnementales changeantes.

### Les limites de la migration assistée de provenances

La migration assistée doit cependant être réfléchie et attentive car elle peut entraîner des changements de composition et de structure à l'échelle des gènes et selon les provenances, ses bénéfices peuvent se révéler plus limités que ce qu'il en est attendu.

Déjà, les **gènes importés** ne sont **pas tous forcément avantageux**. Pour le hêtre, il y a, par exemple, un caractère contrôlé génétiquement relevant de la phénologie et qui montre des différences significatives entre les populations du nord et de l'ouest, et celles du sud et de l'est. En climat continental, les gelées tardives sont moins récurrentes qu'en climat océanique ; et les hêtres de ces régions respectives s'y sont justement adaptés. En effet, la somme des températures nécessaire au débourrement (contrôlée génétiquement) s'avère plus élevée chez les individus de climat océanique que chez ceux de climat continental. En outre, le débourrement se fait plus tardivement dans le premier cas. **Introduire des provenances continentales en climat océanique augmentera le risque de dégâts en cas de gels tardifs (printemps)**. La migration assistée pourrait donc même être contre productive sur certains aspects.

Ensuite, **toute caractéristique ne montre pas forcément des signes d'une adaptation locale**. C'est ce qu'à montré l'étude de Muffler (2021) [24] vis-à-vis du succès de germination et d'**implantation des jeunes plantules**, qui s'y est révélé moins influencé par l'origine de la graine que par **conditions environnementales**<sup>18</sup>. L'avantage recherché d'une certaine localité ne se manifesterà pas forcément ailleurs.

### La diversité génétique du hêtre : la régénération naturelle n'est pas à sous-estimer

Ces dernières années, les gestions basées davantage sur les **processus naturels** sont mises en avant pour leur capacité à rendre les **forêts plus résilientes** face au changement climatique. Dans le contexte d'une régénération naturelle, le hêtre peut avoir un rôle clé grâce à son caractère **sciaphile** qui facilite l'établissement des **plantules même sous couvert**. Parallèlement, au sein de ses populations, le hêtre présente une forte diversité génétique. Or la régénération naturelle est un processus en faveur de la conservation de son matériel génétique : pour un même critère, la sélection des jeunes hêtres peut s'opérer différemment d'une année à l'autre [25] ; ce qui permet aux générations de graines successives d'**entretenir la richesse génétique** (limitée avec seulement une ou deux provenances). Et cette diversité génétique est d'autant plus important que des études sont en faveur du **potentiel d'adaptation d'une population à son contexte local, même à courte échéance**.

---

<sup>18</sup> L'intervention d'un contrôle génétique et d'une adaptation locale n'est pas exclue mais elle ne prévale pas.

Dans les travaux<sup>19</sup> précédemment menés par le CNPF Hauts-de-France Normandie il est possible de retrouver les pratiques favorables à la régénération du hêtre.

En fonction des conditions stationnelles, la régénération est plus ou moins facile à mener et les blocages peuvent varier : sur sol calcaire peu épais (cf. rendzine) la fructification sera plus faible que sur sol riche et profond; mais à l'inverse, la végétation concurrente posera moins de problème.

Le premier élément est de s'assurer que le peuplement initial est en densité suffisante, **sans problème sanitaire préoccupant** (présence du chancre défavorable) et **de qualité génétique satisfaisante**.

La première étape est la **coupe d'ensemencement**. Ce relevé de couvert favorise la fructification en exposant les houppiers ; permet de sélectionner les plus beaux individus au détriment de ceux dominés, chancreux ou même d'essence trop concurrente ; et apporte de la lumière diffuse au sol, pour les futurs semis, tout en limitant l'explosion de la végétation concurrente. Pour les stations riches ou acides, où **l'installation des semis** est souvent plus **délicate**, il sera plus modéré avec **10 à 20%** du volume de l'étage dominant ; mais sinon il peut monter **jusqu'à 30%**. Cette coupe **comprend l'ouverture des cloisonnements** (de 4 m tous les 20 m idéalement), qui permettent de limiter le tassement du sol.

La phase suivante correspond à l'observation des faînées, réalisée en juin afin de s'assurer de l'abondance des graines. Un début d'été assez chaud et sec est particulièrement favorable. Alors qu'à l'inverse de fortes pluies à la floraison ont un effet néfaste. **En moyenne il y a une très bonne faînée tous les 10 ans, et des faînées partielles mais tout de même favorables, tous les 3 à 5 ans.**

Sous réserve d'une faînée favorable, le **travail du sol** peut constituer un coup de pouce à la régénération, d'autant plus en condition de **germination difficile** (humus épais) ou de **forte concurrence**. **Avant la chute des fruits**, passer le gyrobroyeur puis éventuellement le cover-crop permet de favoriser la germination des faînes et l'enracinement des semis tout en réduisant la végétation.

Par la suite, cette dernière doit être surveillée et ne doit pas dépasser la hauteur des semis : la **fougère** pourra être **bâtonnée**, et la **ronce peignée** par exemple. D'autres risques pèsent également sur les semis (dent du gibier, fonte des semis au printemps, puceron laineux en juin) et **ils ne sont acquis qu'à partir de la hauteur 50 cm.**

La **mise en lumière des jeunes semis** se doit d'être **progressive** pour éviter l'ensoleillement trop brutal (**risques de mortalité**), **sans pour autant être trop lente** car plus les semis grandissent et plus ils **cassent** facilement. Ainsi, il est possible d'opérer environ des **coupes secondaires** (environ 3) qui éliminent **15 à 30% du peuplement restant** à chaque passage ; et réalisées **3 à 6 ans après** la coupe d'ensemencement. **La phase de régénération s'étale sur une période comprise entre 6 et 10 ans**, voire davantage sur les peuplements trop capitalisés.

La **coupe définitive** des semenciers est réalisée lorsque les **semis** sont **bien répartis** et atteignent **0,5 à 1 m de haut** en moyenne.

---

<sup>19</sup> Fiches complètes disponibles sur le site internet du CNPF dont récemment « La régénération naturelle du hêtre : comment la favoriser dans le Pas-de-Calais »

## Une alternative en conditions limites : le hêtre d'Orient

Le hêtre d'Orient (*Fagus orientalis* Lipsky) se retrouve originellement dans les Balkans ; de façon fragmentée son aire de répartition démarre à l'ouest en Grèce et parvient jusqu'en Iran, en longeant le nord de la Turquie pour sa limite sud, et le sud de la Crimée pour sa limite nord. Aux jonctions de son aire de répartition avec le hêtre commun (*Fagus sylvatica*), leur hybridation est d'ailleurs reconnue et étudiée [26]. Il est ici cité comme une essence alternative mais sa **proximité morphologique** et **phylogénétique**<sup>20</sup> est si proche du Hêtre européen commun que dans la communauté scientifique, **les deux sont parfois même considérées en tant que taxons d'une même espèce**. Non seulement elles partagent des **niches écologiques** et des **associations botaniques similaires**, mais en plus, leurs **potentiels pathogènes** et **ravageurs** ont les **mêmes tendances d'occurrence** sur l'une ou l'autre d'essence ; ce qui **limite les risques liés à l'introduction d'une nouvelle essence**. La différence majeure -qui représente ici une opportunité d'alternative- est que le hêtre d'Orient semble **se satisfaire de conditions climatiques plus sèches et chaudes** que son voisin européen ; tout en étant **moins sensible aux gelées tardives**.

Deux points de prudence sont toutefois présents dans la littérature scientifique, notamment car il s'agit d'une forme de migration assistée.

Les chercheurs invitent à la précaution quant à l'introduction de cette essence, car il n'y a, finalement, qu'assez peu d'informations sur des peuplements adultes en France (seule l'Alsace a répertorié des peuplements datant du XXème siècle). L'essence gagnerait par exemple à être introduite mais **de façon progressive** dans les **limites climatiques du hêtre européen** (dans lesquelles il ne parvient plus à se maintenir), comme ce qui est proposé par Mellert (2022) [27] dans son étude portant en Allemagne. En région Hauts-de-France, il s'agirait par exemple des zones citées dans la partie sur l'état des lieux sanitaire en région et les prédictions futures des modèles (cf. dans le Sud de la région).

Concernant les provenances : comme l'**hybridation avec le hêtre européen est commune**, la question des conséquences de cette hybridation est nécessaire. Cette réflexion se retrouve également dans l'étude de Kurz. Il s'avère que le hêtre d'Orient présente, au sein de sa propre aire géographique, une grande diversité génétique ; alors que **l'origine** qui présente la **plus grande divergence génétique** avec les **hêtres européens** est celle **iranienne** ; celles qui en présentent la **moins grande** sont les populations de **Turquie** et de **l'est de la Bulgarie**. D'un côté, une plus grande divergence implique un plus grand **potentiel d'augmentation de diversité génétique et de partage des gènes favorables lors de l'hybridation**. De l'autre, avec une trop grande divergence, des **risques de dépression hybridique**<sup>21</sup> pourraient survenir, diminuant alors les capacités des populations hybrides à se reproduire. Du reste, à savoir si cela représente un avantage ou un inconvénient, cela dépend si la régénération naturelle est souhaitée. Mais en tout cas, la compatibilité génétique de la provenance iranienne n'a pas encore été étudiée.

L'introduction du hêtre d'Orient sur des sites expérimentaux est actuellement en cours (dispositifs n°**60 23 001**; **62 25 002** ; **80 22 001** et **80 23 001** actuellement); et des analyses sur

---

<sup>20</sup> La phylogénie est l'étude des liens de parenté entre les êtres vivants et ceux qui ont disparu.

<sup>21</sup> On parle de dépression hybridique quand la descendance du croisement entre individus de populations différentes présente une valeur sélective moins grande que chacun des deux parents.

son comportement vis-à-vis des conditions stationnelles et des extrêmes climatiques ainsi que sur les interactions biotiques qu'il induit pourront être menées **mais pour le moment, les constats ont encore assez peu de poids statistique**. Ce qui en ressort néanmoins à première vue :

- **Son taux de reprise est excellent** avec des taux qui s'élèvent à 100% la première année à Orville (62) ; à 100 % à 2 ans sur l'arboretum de Cauvigny (60) dans le sud de la région et sur plateau calcaire ; et à 92 % à 2 ans à Limeux (80) sur sol crayeux superficiel.
- **Sa croissance initiale est faible** (entre 5 et 10 cm la première année): en moyenne, la première année, 4 cm à Cauvigny, 5 cm à Limeux et 9 cm à Orville.

## Perspectives

Le maintien –ou non- du hêtre en Hauts-de-France n'est pas une question univoque et dépend des contextes locaux. Des signes de faiblesses voir de dépérissements existent déjà dans le Sud de la région ou pour des sujets hors station et âgés, principalement dûs à des conditions abiotiques (stress hydrique, fortes chaleurs..). Ces constats de contexte spécifique auront même tendance à s'accroître dans le futur. Néanmoins, le hêtre reste encore une essence intéressante dans notre palette de renouvellement que ce soit au travers d'une diversification de sylviculture : mélange, dynamisme d'éclaircie ; migration assistée de provenances ou au contraire régénération naturelle. Et ce, d'autant plus que sa croissance et sa fertilité en région sont plutôt favorables. Ce qu'il faut souligner, c'est que la richesse et la complexité du matériel vivant exclut la possibilité de solution unique et miracle. Chacune démontre des bénéfices et des risques : il s'agit avant tout de s'informer pour déterminer, en bonne connaissance de cause, la pratique sylvicole adaptée, en prenant en compte, certes, le peuplement ; mais également les ressources humaines, matérielles et intellectuelles disponibles. Enfin, lorsque sa viabilité ne peut plus être assurée, il existe des alternatives, dont fait partie son cousin, le hêtre d'Orient, pour lequel de jeunes sujets sont en train d'être testés en région.

## Bibliographie

[1] Bontemps J-D., Duplat P., Hervé J-C. and Dhôte J-F. (2013) Croissance en hauteur dominante du hêtre dans le Nord de la France: des courbes de référence qui intègrent les tendances à long-terme. *Rendez-vous techniques de l'ONF, HS 2*, pp.39-47.

[2] Brockerhoff E., Barbaro L., Castagneyrol B. et al. (2017) Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodiversity and Conservation, volume n°26*, pp.3005-3035. DOI 10.1007/s10531-017-1453-2.

[3] Jactel H., Bauhus J., Boberg J. et al. (2017) Tree diversity drives forest stand resistance to natural disturbances. *Forest Entomology, volume n°3*, pp.223-243. <https://doi.org/10.1007/s40725-017-0064-1>.

[4] Ammer C. (2018) Diversity and forest productivity in a changing climate. *New phytologist, volume 221* pp.50-66. <https://doi.org/10.1111/nph.15263>.

[5] Forrester D., Bonal D., Dawud S. et al. (2016) Drought responses by individual tree species are not often correlated with tree species diversity in European forests. *Journal of applied ecology volume n°53* pp.1725-1734. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12745>.

[6] Mölder I. and Leuschner C. (2014) European beech grows better and is less drought sensitive in mixed than in pure stands: tree neighbourhood effects on radial increment. *Trees*. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-0991-4>.

[7] Metz J., Annighöfer P., Schall P. (2015) Site-adapted admixed tree species reduce drought susceptibility of mature European beech. *Global Change Biology, volume n°22, issue n°2*, pp.903-920. <https://doi.org/10.1111/gcb.13113>.

[8] Pretzsch H., Schütze G. and Uhl E. (2012) Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biology, volume n°15, issue n°3*, pp.483-495. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2012.00670.x>.

[9] Jonard F., André F., Ponette Q. and al. (2011) Sap flux density and stomatal conductance of European beech and common oak trees in pure and mixed stands during the summer drought of 2003. *Journal of Hydrology, volume n°409, issues n°1-2*, pp.371-381. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.032>.

[10] Schume H., Jost G. and Hager H. (2004) Soil water depletion and recharge patterns in mixed and pure forest stands of European beech and Norway spruce. *Journal of Hydrology, volume 289*, pp.258-274. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.11.036>.

[11] Vanhellefont M., Sousa-Silva R., Maes S. et al. (2019) Distinct growth responses to drought for oak and beech in temperate mixed forests. *The Science of the total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.054>.

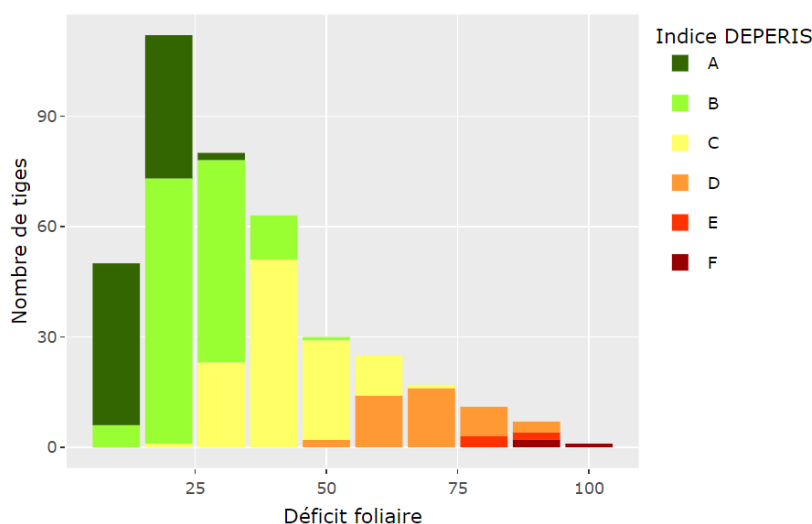
[12] Gebauer T., Horna V., Leuschner C. et al. (2012) Canopy transpiration of pure and mixed forest stands with variable abundance of European beech. *Journal of Hydrology, volumes n° 442-443*, pp.2-14. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.009>.

[13] Gorssiord C. (2018) Having the right neighbors: how tree species diversity modulates drought impacts on forests. *New Phytologist, volume n°228, issue n°1*, pp.42-49. <https://doi.org/10.1111/nph.15667>.

- [14] Forrester D. and Bauhus J. (2016) A Review of Processes Behind Diversity–Productivity Relationships in Forests. *Ecological function*, volume n°2, pp.45-61. DOI <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0031-2>.
- [15] Jourdan M., Lebourgeois F. and Morin X. (2019) The effect of tree diversity on the resistance and recovery of forest stands in the French Alps may depend on species differences in hydraulic features. *Forest Ecology and Management*, volume 450. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117486>.
- [16] Martin-Blangy S., Charru M., Gerard S. and al. (2021) Mixing beech with fir or pubescent oak does not help mitigate drought exposure at the limit of its climatic range. *Forest Ecology and Management*, volume 482. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118840>.
- [17] Toïgo M., Vallet P., Perot T. and al. (2015) Overyielding in mixed forests decreases with site productivity. *Journal of Ecology*, volume n°103, issue n°2, pp.502-512. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12353>.
- [18] Morneau F., Vallet P., Toïgo M. and Dalmaso M. (2016) Les forêts mélangées. *La feuille de l'Inventaire Forestier*.
- [19] Liziniewicz M. (2009) The development of beech in monoculture and mixtures.
- [20] Wihelm G. and Raffel D. (1993) La sylviculture du mélange temporaire Hêtre-Merisier sur le Plateau lorrain. *Revue Forestière Française*, volume n°45, pp.651-668. <https://doi.org/10.4267/2042/26465>.
- [21] Bastien Y. (1997) Pour l'éducation du Hêtre en futaie claire et mélangée. *Revue Forestière Française*, volume n°49, pp.49-68. <https://doi.org/10.4267/2042/5589>.
- [22] Magri D., Vendramin G., Comps B, et al. (2006) A new scenario for the Quaternary history of European beech populations: palaeobotanical evidence and genetic consequences. *New Phytologist*, volume n°171, pp.199-221. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01740.x>.
- [23] Besliu E., Curtu A., Apostol E. and Budeanu M. (2024) Using Adapted and Productive European Beech (*Fagus sylvatica* L.) Provenances as Future Solutions for Sustainable Forest Management in Romania. *Land*. <https://doi.org/10.3390/land13020183>.
- [24] Muffler L., Schmeddes J., Weigel R., et al. (2021) High plasticity in germination and establishment success in the dominant forest tree *Fagus sylvatica* across Europe. *Global Ecology and Biogeography*, volume n°30, issue n°8, pp.1583-1596. <https://doi.org/10.1111/geb.13320>.
- [25] Westergren M., Archambeau J., Bajc M. et al. (2023) Low but significant evolutionary potential for growth, phenology and reproduction traits in European beech. *Molecular Ecology*. <https://doi.org/10.1111/mec.17196>.
- [26] Kurz M., Kölz A., Gorges J. et al. (2023) Tracing the origin of Oriental beech stands across Western Europe and reporting hybridization with European beech – Implications for assisted gene flow. *Forest Ecology and Management*, volume n°531. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120801>.

## Annexe 1 : Extrait du bulletin DSF Hauts-de-France 2022 « Enquête complémentaire sur 2 massifs du territoire suite à des dépérissements ponctuels »

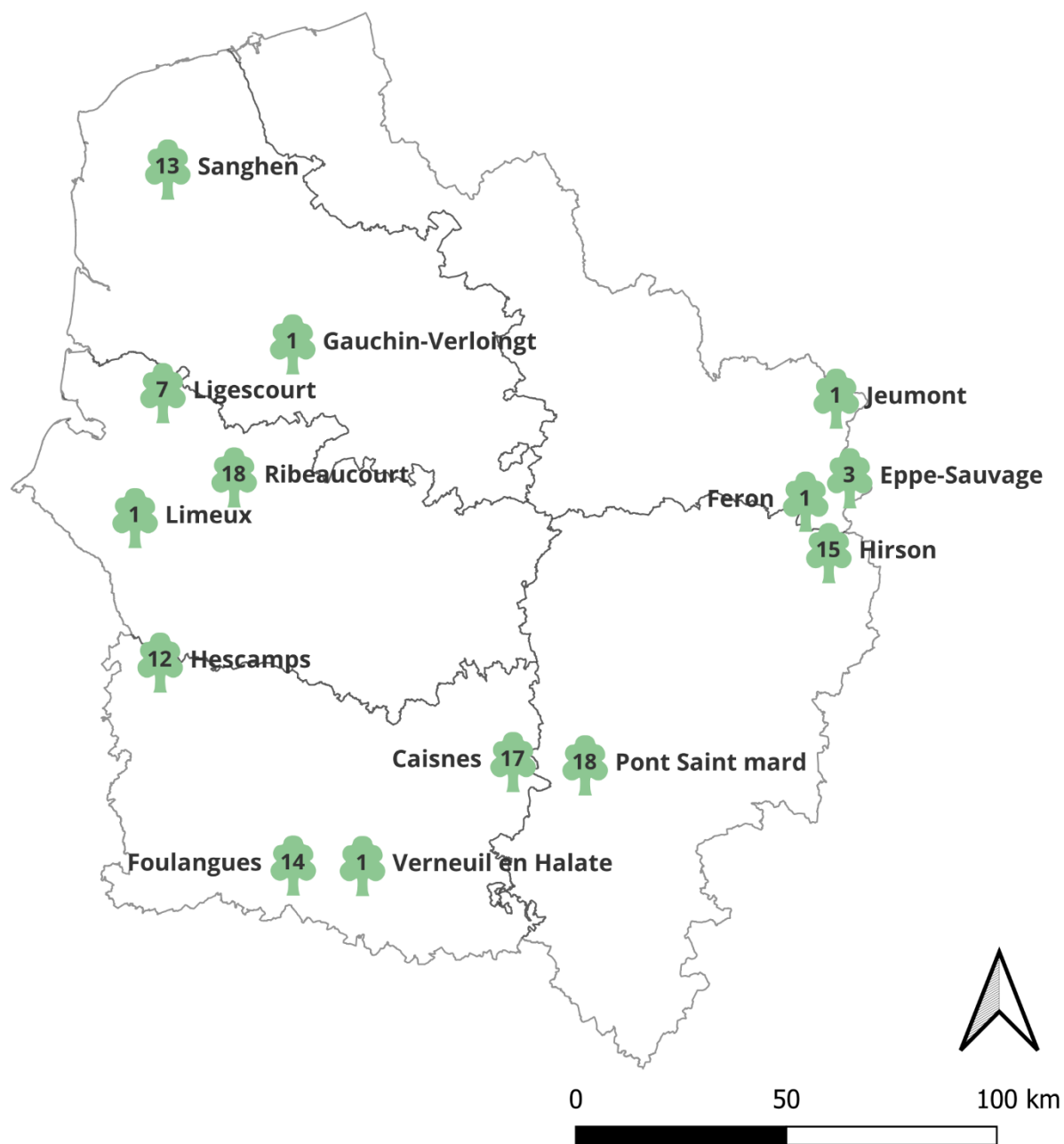
« Suite aux années sèches de 2018 à 2020, des signes de dépérissement des hêtraies ont été observés sur toute la région. Une étude conjointe DSF-ONF, sur l'état sanitaire des hêtraies picardes, a été réalisée dans les grands massifs domaniaux suivants : Saint-Gobain (02), Retz (02), Hez-Froidmont (60), Crécy (80). La méthode du road sampling<sup>22</sup> a été utilisée et les notations d'état sanitaire reposent ensuite sur le protocole DEPERIS. Pour le moment, les hêtraies picardes situées en **bonnes stations** ne présentent que **peu de symptômes de dépérissement** (les hêtraies sur sables sont non observées en 2022). Une majorité des tiges notées ne présentent que de **faibles dégâts**. Les hêtres de catégorie **très gros bois** (diamètre supérieur ou égal à 67,5 cm) sont le **plus impactés** en particulier sur les **stations** forestières les plus **contraignantes** (exposition Sud, rupture de pente et station forestière séchante). Les résultats sont globalement homogènes exceptés ceux de Saint-Gobain (02) et Crécy-en-Ponthieu (80), où les hêtres semblent plus vigoureux. Cette étude sera poursuivie sur Compiègne et la Normandie. Elle permettra de consolider les résultats, après plusieurs épisodes météorologiques défavorables à cette essence qui ne montre à ce jour que des dommages limités sur la région Hauts-de-France. »



Niveau de déficit foliaire et de dépérissement global pour la Forêt Domaniale de Hez-Froidmont (60) –  
Source DSF

<sup>22</sup> Traduit depuis l'anglais par « échantillonnage depuis la route », il s'agit d'une méthode d'échantillonnage qui repose sur les voiries forestières carrossables afin de limiter le temps d'accès aux points d'échantillon et garantissant un aspect aléatoire. Il permet un échantillonnage avec une bonne fiabilité statistique

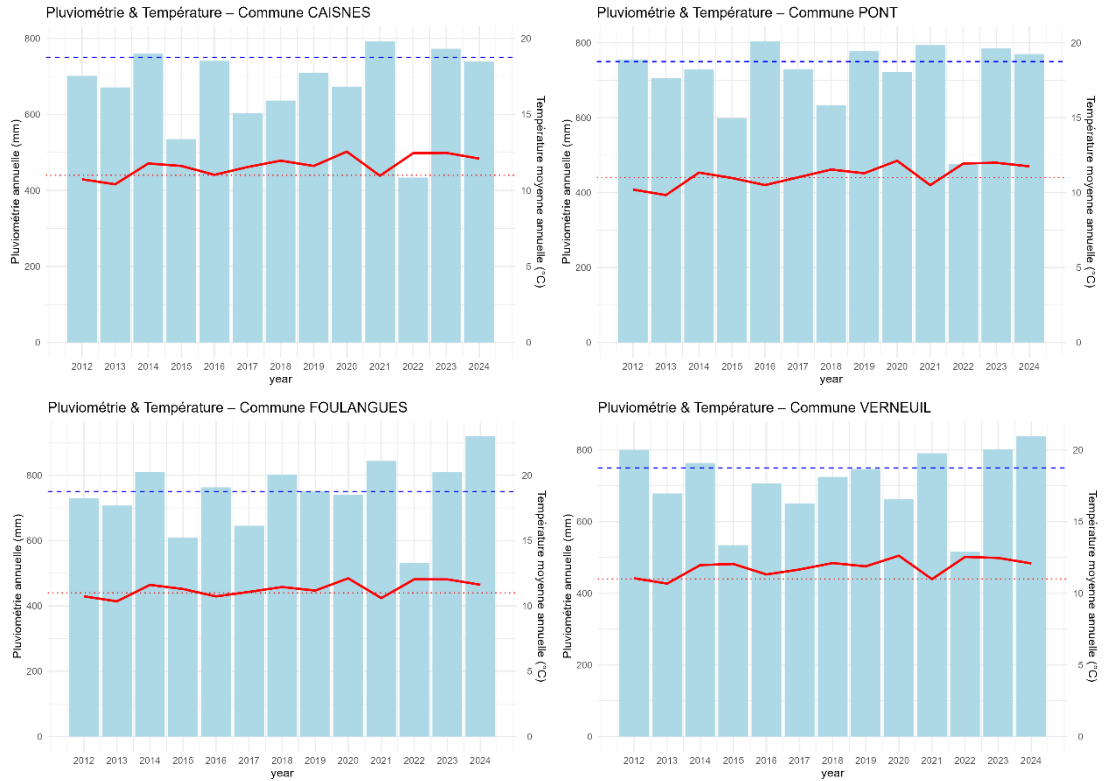
## Annexe 2 : Répartition des placettes OREF sur lesquelles du hêtre est présent



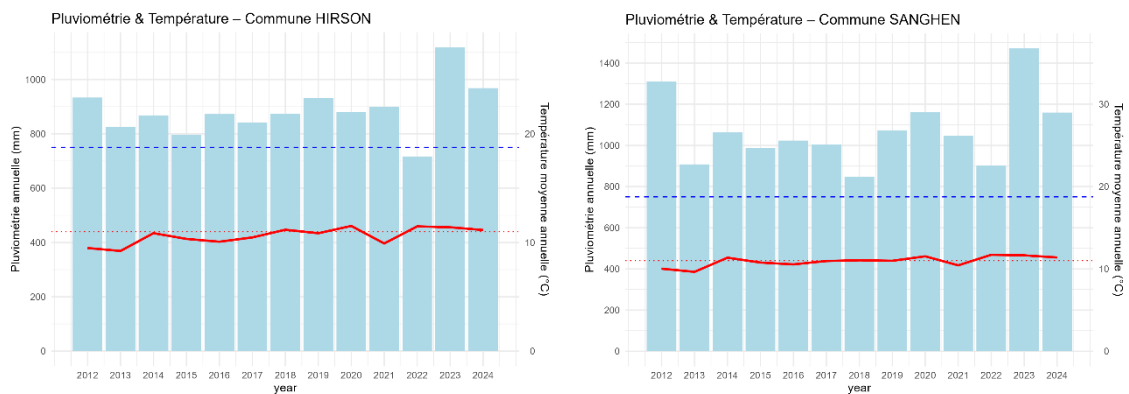
*Les nombres indiqués les effectifs de hêtre sur la placette*

## Annexe 3 : Diagrammes pluviométrie / température moyennes annuelles de quelques placettes OREF

### Diagrammes de pluviométries et températures moyennes annuelles pour 4 des communes avec le plus de notes DEPERIS D, E ou F



### Diagrammes de pluviométries et températures moyennes annuelles pour 4 des communes avec le moins de notes DEPERIS D, E ou F



## Annexe 4 : Compléments sur l'aspect sanitaire : apports phénologiques du réseau OREF

Indicateur également suivi par un réseau de propriétaires et d'agents forestiers dans le cadre de l'OREF, la phénologie est la science qui étudie, chez les êtres vivants, l'apparition des événements cycliques au cours de l'année, ainsi que les facteurs qui les influencent. Dans le cadre du changement climatique, cette science connaît un regain d'intérêt car elle permet de mieux comprendre certains mécanismes de sensibilité aux aléas, par rapport aux gels tardifs et précoces, à la vulnérabilité au stress hydrique ou à l'exposition à certains ravageurs par exemple.

En 2025, une étude pluriannuelle des données phénologiques récoltées entre 2007 et 2024 a été publiée. Sur la période étudiée, au printemps, le hêtre fait partie des essences assez tardive avec un début de débourrement moyen au 19 avril +/- 9 jours. **Aucune tendance d'évolution significative au fil des ans n'a été mise en évidence.** Ce constat est favorable car un débourrement qui tendrait vers la précocité, augmenterait les risques liés aux gels tardifs. Les données n'ont pas non plus su mettre en évidence un effet de gradient de longitude, de latitude ou de distance à la mer sur le débourrement ou le jaunissement du hêtre en région. Mais la délimitation des zones climatiques<sup>23</sup> a tout de même permis de souligner des différences significatives. En tant que zone de **débourrement précoce**, il y a notamment le **littoral Sud** (du Cap Gris-Nez à la Baie de Somme en passant par le Montreuillois), ainsi que le **Vexin-Compiégnais-Soissonnais**. Grâce à l'influence maritime pour l'une et à la situation méridionale pour l'autre, ces deux zones, profitent d'une situation plus douce, ce qui accélérerait la complétion des besoins en chaleur des bourgeons et expliquerait le débourrement précoce. **Si une vague de gel tardif touche la région, ces zones sont donc plus sensibles.** A l'inverse, la zone du **Boulonnais - Haut-pays d'Artois** constitue une zone de **débourrement tardif**, sûrement expliqué par un besoin en chaleur atteint plus tard à cause d'une exposition plus grande aux vents et aux nuits fraîches de plateaux, même de faible altitude (on pourrait d'ailleurs s'attendre à un débourrement tardif également du côté de l'Ardenne primaire, mais il n'y a pas assez de données sur cette zone pour mettre en évidence une tendance).

Le hêtre fait partie des essences dont le jaunissement est plutôt tardif, avec une fin moyenne située autour du 24 octobre +/- 13 jours. Contrairement au débourrement, une tendance significative d'évolution au fil des années a pu être mise en évidence : **le jaunissement retarde de 6 jours tous les dix ans.** Le risque direct concerne la **sensibilité aux gelées précoces d'automne** ; tandis que de façon plus indirecte, la saison de végétation est plus longue, ce qui augmente non seulement les risques qu'un **stress hydrique** survienne, mais également la période durant laquelle l'activité photosynthétique induit le besoin en eau. Il n'y a même pas un effet positif de croissance car 80% de sa croissance se font au printemps.

---

<sup>23</sup> Les zones citées ont été définies par MétéoFrance en 2013.

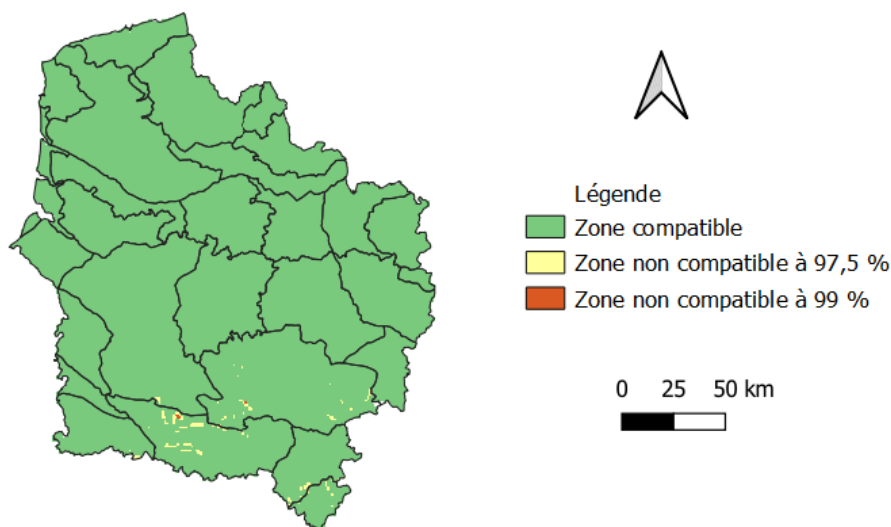
## Annexe 5 : Analyse détaillées des prédictions ClimEssence et BioClimSol

### Modélisation IKS de ClimEssence

Le modèle IKS, développé par l'ONF, permet de visualiser géographiquement la compatibilité climatique d'une essence, à échéance 2050 ou 2070, et en fonction des différents scénarios RCP 4.5 et 8.5 du GIEC<sup>24</sup>. Il repose sur trois indicateurs que sont le déficit hydrique annuel, la température minimale annuelle et la somme des degrés jours annuelle.

Les cartes suivantes présentent l'évolution, selon le modèle IKS, de la compatibilité du hêtre depuis aujourd'hui, jusqu'en 2070, en passant par 2050 ; et en fonction des modèles de RCP 4.5 et 8.5 moyens (le premier étant plus optimiste que le second). Les Sylvo-Eco-Régions (SER) y sont représentées.

#### Compatibilité actuelle du hêtre en Hauts-de-France (modèle IKS)



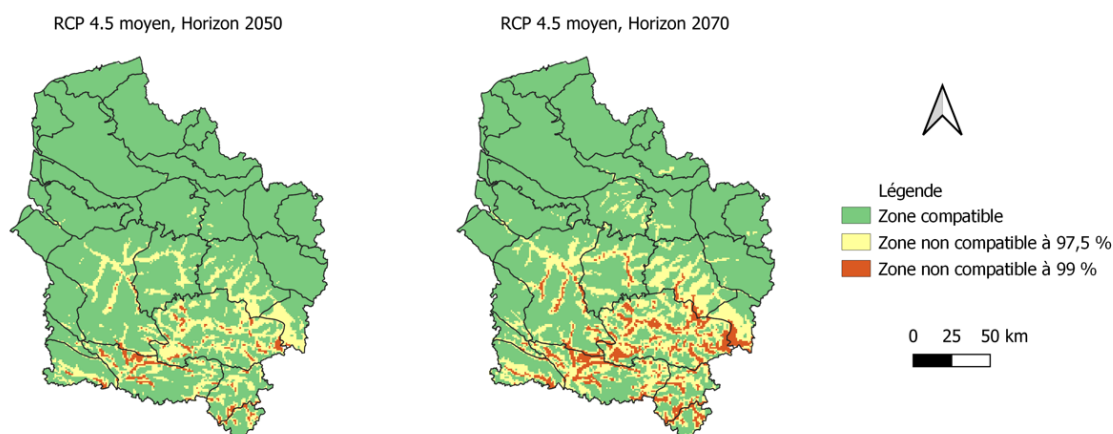
25

Aujourd'hui, le hêtre est presque entièrement compatible avec les conditions climatiques de notre région. Les rares traces d'incompatibilité se situent dans le sud de l'Oise et de l'Aisne, dans les régions forestières du Valois, du Soissonnais et de Brie - Tardenois.

<sup>24</sup> Les scénarios RCP du GIEC ne font pas directement référence à l'augmentation des températures qui auront lieu. Il font référence au changement du bilan radiatif (rayonnement sortant - entrant) au sommet de la troposphère entre l'année 2000 et 2100. Les scénarios 4.5 et 8.5 correspondent à des forcages respectif de 4.5 et 8.5 W.m-2. En termes de températures, chaque scénario n'est pas associé à une seule valeur mais à une gamme de valeurs. Un modèle moyen considère la moyenne de cette gamme.

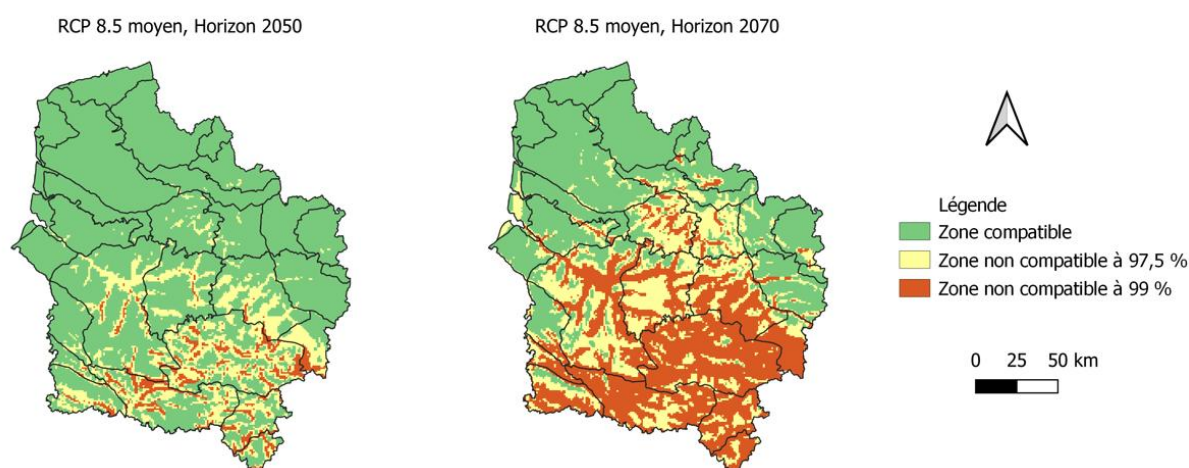
<sup>25</sup> Dans ces cartes, le critère de 99 % est plus restrictif que celui à 97,5 % : pour une localisation donnée, si on compare les conditions climatiques prévues dans le scénarios, avec celles de la répartition actuelle du hêtre en Europe, il s'avère que le hêtre est absent dans au moins 99 % des cas.

### Evolution de la compatibilité du hêtre en Hauts-de-France à échéance 2050 et 2070 pour le scénario RCP 4.5 (modèle IKS)



Dans le scénario plus optimiste, en 2050, l'incompatibilité du hêtre survient dans le sud central de la région (Aisne, Oise, Somme) ; l'amplitude est large, mais la surface couverte est plus restreinte, prenant une forme veineuse. Les régions forestières les plus touchées sont le Vexin, le Valois, le Brie, le Tardenois et le Soissonnais pour lesquelles l'incompatibilité monte à 99 % ; mais la Champagne crayeuse, le Santerre, le Saint-Quentinois et le plateau picard sont également concernées. Ces incompatibilités sont causées par le facteur « déficit hydrique » ; les formes qu'elles dessinent peuvent être mises en lien avec des vallées alluviales, et on peut raisonnablement supposer une différence marquée en fonction de l'exposition entre les versants frais (nord et est) et ceux secs (sud et ouest). 2070 marque une accentuation du précédent constat : les veines s'élargissent, s'intensifient (avec davantage d'incompatibilité à 99%) et parviennent à remonter discrètement sur le Cambrais et la plaine d'Artois.

### Evolution de la compatibilité du hêtre en Hauts-de-France à échéance 2050 et 2070 pour le scénario RCP 8.5 (modèle IKS)



Pour le scénario moins optimiste, dès 2050, la carte est similaire à l'échéance 2070 du scénario précédent. Pour sa propre échéance 2070, le constat s'aggrave alors : les régions forestières précédemment citées sont presque entièrement incompatibles, avec une percée dans le bassin Houllier et le long de la Somme jusqu'à la baie.

**ClimEssence n'a pas vocation à être interprété à une échelle fine** : ces cartes sont produites à des échelles régionales dans l'optique d'offrir des aides à l'orientation de décisions stratégiques -voire politiques. Globalement, on y voit une progression depuis le Sud vers le Nord de l'incompatibilité du hêtre à cause des conditions climatiques ; mais, comme ces cartes n'ont pas d'ambitions locales, elles **ne prennent pas en compte de potentiels effets compensateurs de la station (topo-climat voire micro-climat, régime hydrique, conditions édaphiques) ; ou même de la sylviculture**. Ce sont pourtant ces effets qui rendent possible l'implantation du hêtre dans des localisations auxquelles on associe communément un climat plus chaud, avec par exemple l'Espagne ou l'Italie. C'est pourquoi il est pertinent de coupler les constats de compatibilité climatique de ClimEssence avec des modélisations de risques de dépérissements de **BioClimSol**, car ce dernier **s'inscrit dans les spécificités stationnelles de chaque parcelle**.

---

## BioClimSol

Méthode de diagnostic estimant les risques de dépérissement des essences. Il est réalisée à l'échelle de la parcelle, et intègre non seulement des variables climatiques, mais aussi des propriétés édaphiques et topographiques ; ces dernières pouvant jouer un rôle aggravant ou compensateur vis-à-vis du climat.

---

Le **diagnostic BioClimSol** a vocation de prendre en compte les réalités du terrain, à très fine échelle ; et de ce fait, parallèlement, il ne propose **pas de carte à grande échelle**. Néanmoins, une étude<sup>26</sup>, menée dans les Hauts de France en 2022, a abouti à la création de cartes, de résolution 25 m, qui cherchent à **reconstituer un indice de vigilance BioClimSol** grâce à la **compilation de données cartographiques**<sup>27</sup> et au choix du **modèle BCS du hêtre le plus adapté pour la région**<sup>28</sup>. Il est important de souligner qu'elles ne constituent **pas une centralisation de relevés de terrain**, mais bien d'une modélisation qui tente d'approcher ce que pourrait donner une cartographie des indices IBS. Les imprécisions ne sont donc pas à négliger et il peut y avoir **une différence avec ce qui pourrait être observé par un vrai diagnostic de terrain**. Cette modélisation permet de considérer des hypothèses de travail différentes. Les cartes suivantes ne considèrent **que les massifs où le hêtre est majoritaire**<sup>29</sup> ; ce qui d'un côté fournit une visualisation pour les massifs actuels, mais ne permet pas d'envisager de potentiels

---

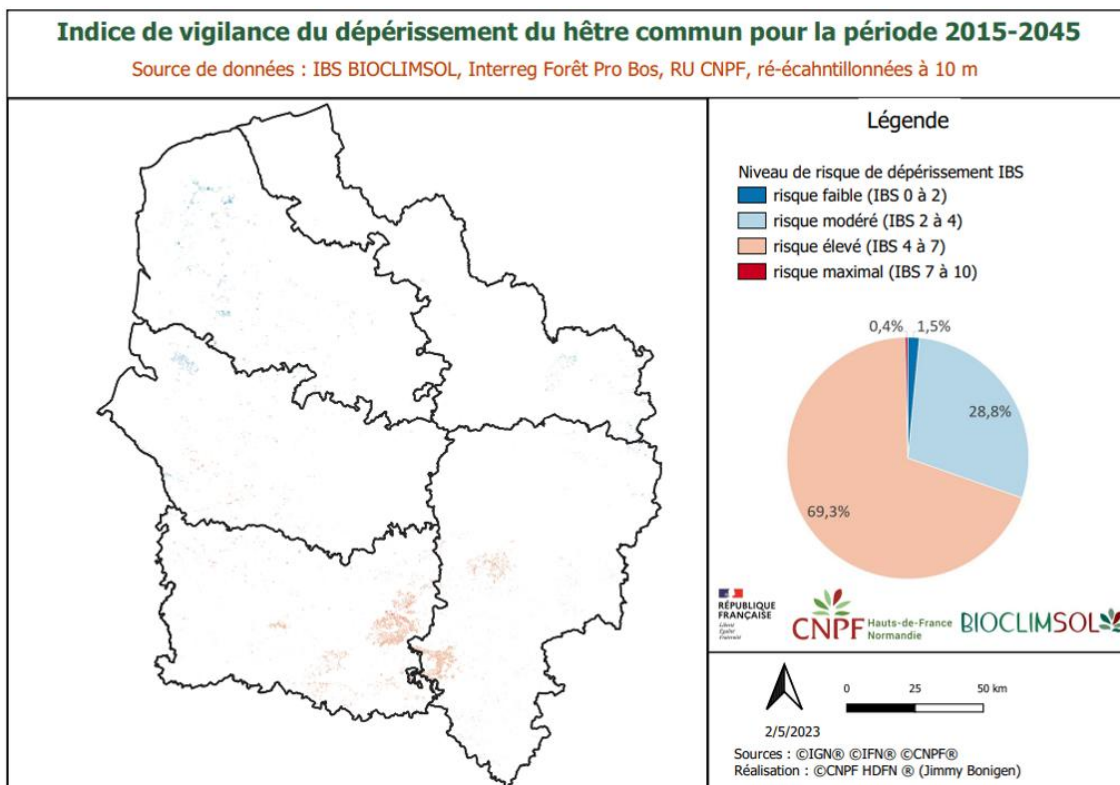
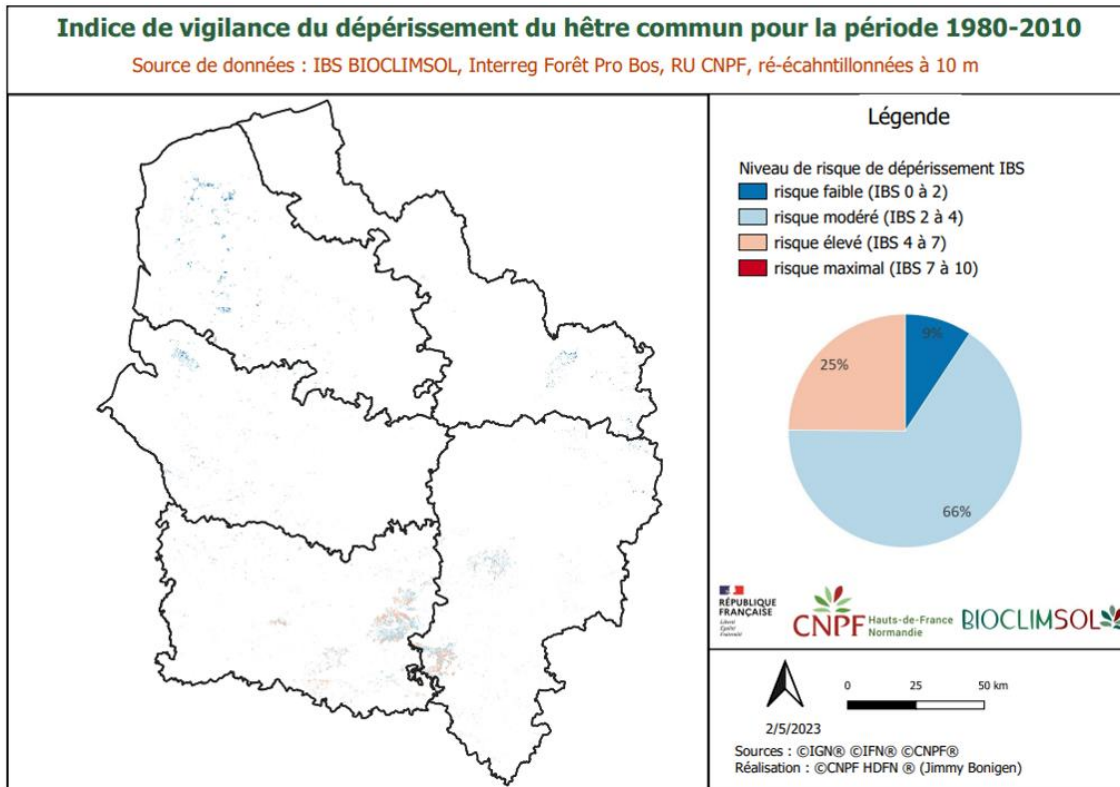
<sup>26</sup> Dans la continuité de son stage portant sur l'évaluation de l'état général des forêts régionales et leur adaptation aux contraintes climatiques actuelles et futures, Ayoub Sguigaa a pu travailler de façon plus précise sur certaines essences clés de la région, dont le hêtre fait partie.

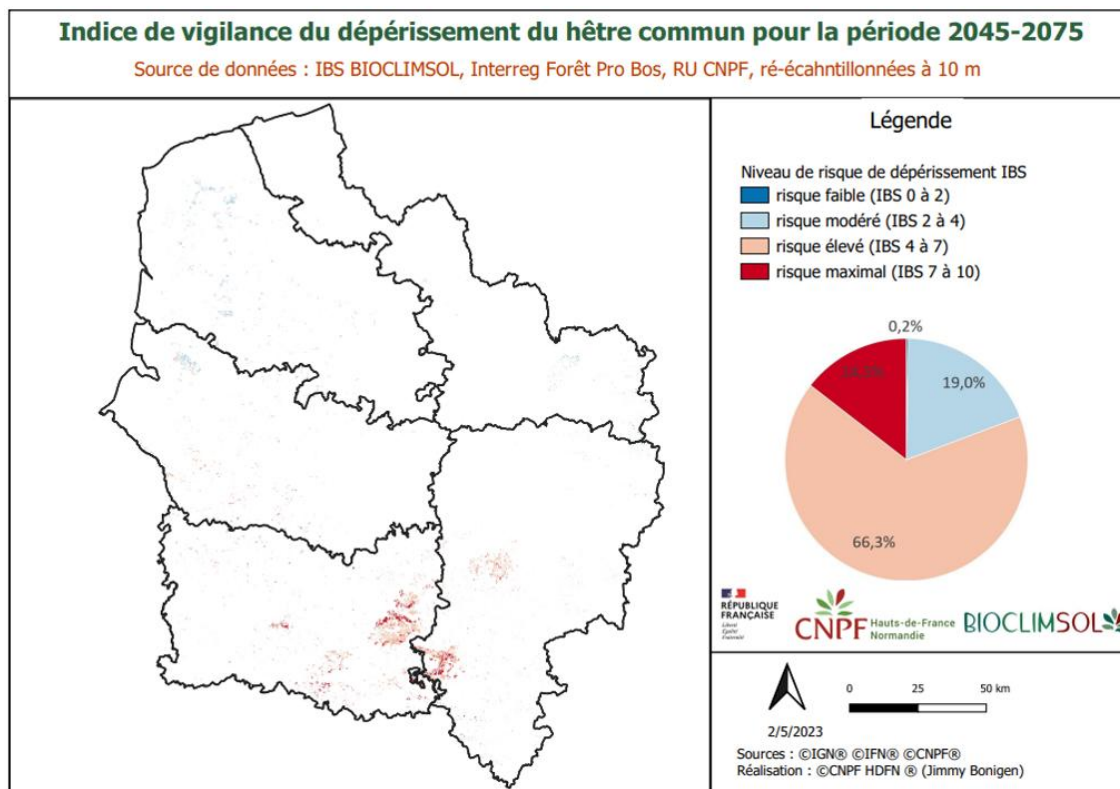
<sup>27</sup> Les données de réserve utile estimée sont issues de la carte prédictive des stations, développée en région Hauts-de-France Normandie.

<sup>28</sup> Il en existe plusieurs à l'échelle de la France.

<sup>29</sup> Etude de télédétection financée par le projet interreg ForêtProBos.

nouveaux massifs de hêtre. Chacune des trois cartes suivantes associe une augmentation des températures moyennes à une échéance temporelle : **la première carte, avec la période 1980-2010**, fait référence (soit, une augmentation de **+0°C**), **la deuxième avec la période 2015-2045**, est associée à **+1°C** ; et la **dernière, avec la période 2045-2075**, à **+2°C**.





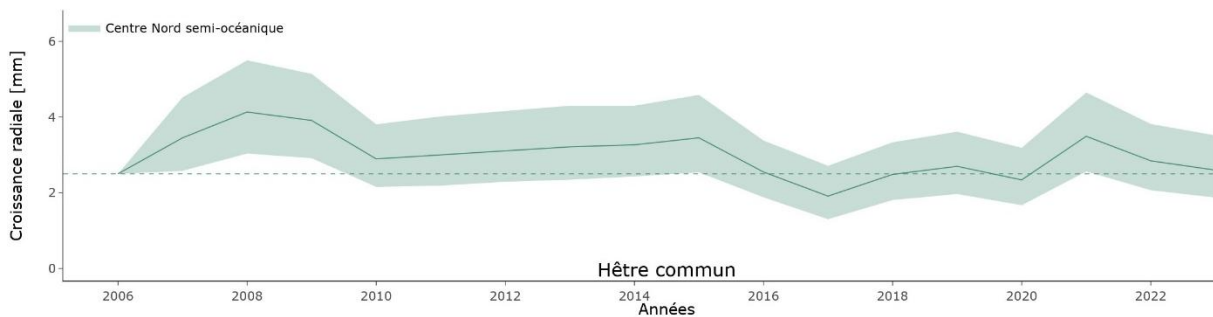
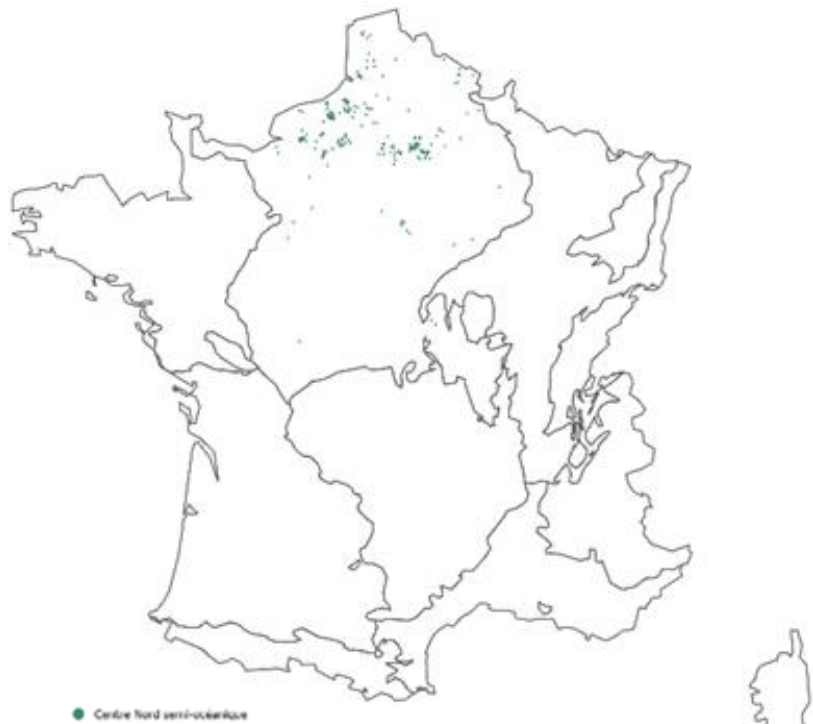
Pour les massifs relativement épargnés sur les trois échéances, on retrouve ceux du Boulonnais, de l'Artois, du Ponthieu et du Vimeu qui sont assez proches de la côte de la Manche et de la mer du Nord ; ainsi que dans le Hainaut, la Thiérarchie et le début des Ardennes. Même si le risque y augmente, il reste majoritairement modéré. Les régimes pluviométriques demeurent en fait bénéfiques grâce à l'influence océanique pour les premiers, et ardennaise pour les seconds.

En revanche, les massifs au sud de la région voient leur risque considérablement augmenter : les seuls massifs associés au risque élevé du scénario initial sont localisés dans le Soissonnais de l'Oise et le Valois de l'Aisne; il y sont encore épars, mais, au fur et à mesure de l'augmentation de température, ils basculent en risque maximal, tandis que les massifs initialement en risque modéré sont convertis au risque élevé. Ce sont les conditions de sécheresse ainsi que les caractéristiques édaphiques avec des sols plus sableux qui expliquent cette répartition.

Pour conclure, même si elles ne peuvent pas être directement comparées car ne correspondant pas aux mêmes hypothèses de travail, **les constats entre les deux modélisations vont dans le même sens.**

## Annexe 6 : Les tendances de croissances observées par l'IGN dans la sylvo-éco-région Centre Nord semi-océanique

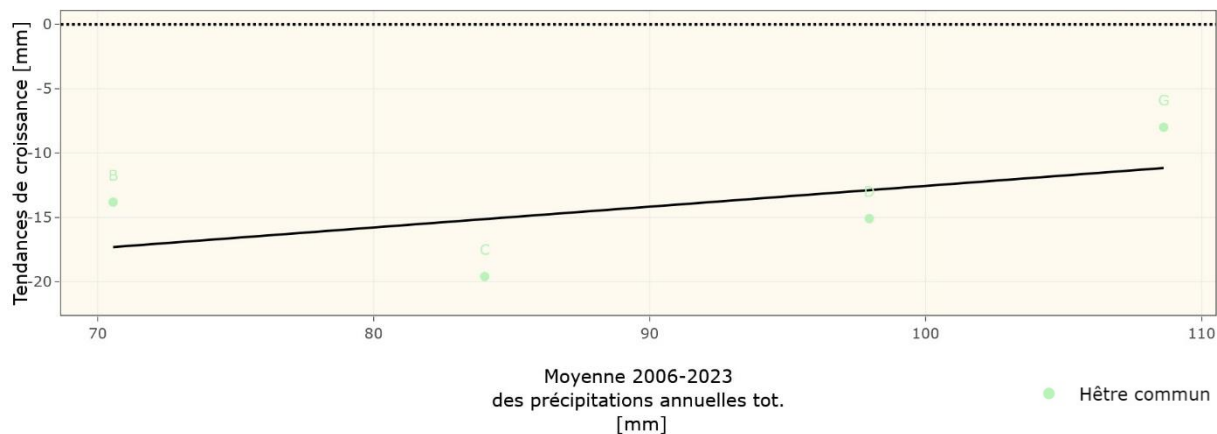
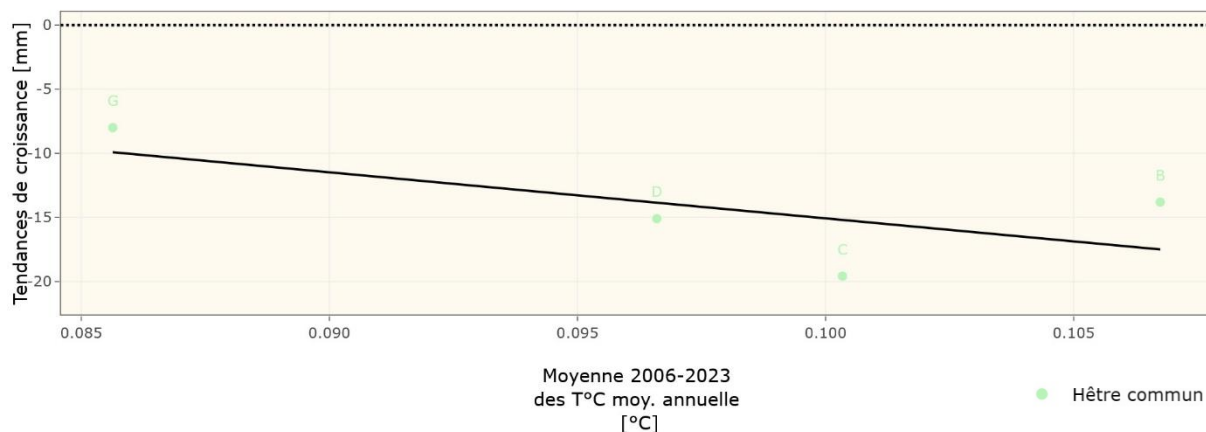
Sur station adaptée, la bibliographie indique qu'il est possible d'obtenir un accroissement annuel moyen sur la circonférence de 2 à 2,5 cm, ce qui équivaut à une largeur de cerne comprise entre 3 et 4 mm. Les données de l'IFN indiquent qu'au niveau de la Sylvo éco-région Centre Nord semi-océanique (carte des points ci-contre), les chiffres de croissances sont tout à fait similaires avec 2,99 cm par an. **Les tendances observées montrent cependant une instabilité de croissance ces dernières années.**



*Evolution de la croissance radiale du hêtre sur la région Centre Nord semi-océanique © IGN – Inventaire forestier national français, outil de visualisation des anomalies de croissance dans les forêts françaises, Campagnes annuelles 2006 à 2023, <https://inventif.ign.fr/croissance/?tab=Evolution%20spatio-temporelle>, consulté le 3 décembre 2025.*

*Observation des tendances de croissance du hêtre en fonction des températures moyennes annuelles (1) et des précipitations estivales (2) à partir des données de 2006 à 2023, (IGN)*

<https://inventif.ign.fr/croissance/?tab=Lien%20avec%20l%27environnement>, consulté le 3 décembre 2025.



Les **tendances de croissance** sont plus fortement liées à l'intensité des températures moyennes printanière et estivales ; et des précipitations printanières et automnales : lorsque les températures moyennes annuelles augmentent ou que les précipitations diminuent, la croissance aura tendance à diminuer.

## **CNPF Hauts-de-France Normandie**

**Site des Hauts-de-France**

**96 rue Jean Moulin – 80000 Amiens**

**Tél.03 22 33 52 00**

**Coordination** : Noémi Havet, Ingénieur référent changement climatique et expérimentation

**Rédaction** : Pauline Surmont, chargée de mission changement climatique et expérimentation

Nos remerciements à l'équipe du Centre National de la Propriété Forestière des Hauts-de-France pour son accompagnement, ses conseils précieux concernant le choix des placettes, ainsi que pour la qualité de ses retours sur ce travail ; mais également aux propriétaires et gestionnaires forestiers qui accueillent et entretiennent les placettes du réseau de démonstration, contribuant ainsi activement au suivi, au partage des connaissances et à la valorisation des pratiques forestières.

**Réalisation et édition** : 2025 – CNPF



Document réalisé avec l'appui financier de la région Hauts-de-France