



# Suivi de l'état sanitaire des arbres en forêt de Soignes bruxelloise 2023

**Réalisation**  
**Technicien**  
**Promoteur**

Hugues Titeux ; François Joussemet  
Frédéric Hardy  
Quentin Ponette

*Décembre 2023*

## Convention UCLouvain – Bruxelles Environnement 2023

**Institutions : UCLouvain**

*Earth and Life Institute*

*Environmental Sciences*

**Bruxelles-Environnement (BE-IBGE)**

Bruxelles Environnement

Div. Qualité de l'environnement et  
gestion de la nature

Dpt. Forêt

*Objet de l'action :*

**« Recherche scientifique d'intérêt général relative au suivi de l'état sanitaire en forêt de Soignes bruxelloise »**

**Promoteur :** Prof. Quentin Ponette

### Résumé

Dans le cadre des études relatives aux impacts des changements climatiques, la Région bruxelloise s'est dotée d'un système de suivi sanitaire dont les objectifs sont d'évaluer la vitalité actuelle de la forêt, d'analyser son évolution au fil des années et d'identifier les paramètres responsables d'éventuelles dégradations.

Depuis 2009, les peuplements, purs ou mélangés, des essences majoritaires à savoir le hêtre (*Fagus sylvatica* L.), le chêne sessile (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) et le chêne pédonculé (*Quercus robur* L.), sont observés chaque année en juillet et août. Les observations sont effectuées par les agents de Bruxelles Environnement, et les résultats sont contrôlés et analysés par l'équipe de l'UCLouvain.

Les campagnes d'observation 2022 et 2023 ont été effectuées selon un nouveau protocole et un nouveau plan d'échantillonnage. Les observateurs de Bruxelles-Environnement effectuent désormais des observations simplifiées, mais sur un échantillon plus large. En parallèle, l'équipe de l'UCLouvain continue à effectuer les observations détaillées sur un sous-échantillon d'arbres. En 2023, le suivi de 29 frênes a débuté, selon le protocole « simplifié ».

Les observations 2023 montrent que la situation sanitaire des chênes est bonne (80% des arbres en classes DEPERIS A ou B ; défoliation moyenne de 25%) et globalement stable depuis 2018, malgré la

forte dégradation d'un des arbres de l'échantillon. La situation des frênes est assez bonne (60% des arbres en classe DEPERIS A ou B, défoliation moyenne 35%), et l'on ne peut évaluer son évolution car leur suivi a débuté en 2023. Les hêtres sont plus dégradés (35% des arbres en classe DEPERIS A ou B, défoliation moyenne 34%) et ont subi une importante dégradation entre 2021 et 2022, caractérisée par une augmentation de la défoliation de 6%, expliquée par la mortalité de branches fines. Il pourrait s'agir d'une conséquence des sécheresses successives depuis 2018. En 2023, la défoliation est restée élevée et la ramification s'est légèrement détériorée, mais l'occurrence des branches mortes a diminué, ce qui suggère un arrêt de la dégradation et laisse espérer une amélioration au cours des prochaines années.

Cet été, nous avons mis à jour la sélection d'arbres du suivi photo et leurs points de prise de vue, en raison de l'évolution de la visibilité. Le suivi systématique de la croissance et la ramification des branches sur base des photos hivernales (cf protocole présenté dans le rapport 2022) sera initié à partir des photos prise sur cet échantillon adapté au cours de l'hiver 2023-2024 ; les premiers résultats seront présentés dans le rapport 2024.

**Date de fin** : Décembre 2023.

## Table des matières

Résumé.....	2
Table des matières .....	4
1. Contexte et objectifs .....	5
2. Description de la forêt de Soignes .....	7
2.1. Composition spécifique .....	7
2.2. Sols.....	8
2.3. Climat.....	10
3. Méthodologie .....	11
3.1. Mise au point du plan d'échantillonnage 2022-2025.....	11
3.2. Protocoles d'évaluation .....	16
3.3. Description de l'échantillon 2023.....	19
3.4. Encodage et traitement des données.....	23
3.5. Contrôle-qualité.....	23
4. Résultats .....	26
4.1. Evolution de la défoliation.....	26
4.2. Evaluation « DEPERIS » .....	36
4.3. Caractérisation détaillée selon le protocole « ICP ».....	39
5. Suivi photographique des houppiers à partir du sol .....	47
6. Discussion générale.....	52
7. Conclusions et perspectives .....	53

# 1. Contexte et objectifs

La vitalité d'un arbre est définie par sa capacité à assimiler les ressources, à survivre aux stress, à réagir aux changements de conditions et à se reproduire (Dobbertin et Brang, 2001). Le dépérissement est défini par Delatour en 1990 comme étant « un terme de symptomatologie, c'est-à-dire qu'il caractérise un ensemble d'anomalies perceptibles à l'œil sur le terrain. Ces anomalies correspondent à l'idée que l'on se fait d'une détérioration globale de la santé de l'arbre : réduction de la qualité et de la quantité du feuillage ou des pousses, mais surtout mortalité d'organes existants (rameaux en particulier). Le terme inclut aussi une certaine idée d'évolution dans le temps qui traduit le fait que l'issue naturelle pour l'arbre dépérissant est jugée problématique mais pas obligatoirement fatale. Le dépérissement, dont le constat est en fait basé sur un ensemble de symptômes variables selon les cas, ne suppose pas en lui-même des causes particulières et ne doit pas a priori être considéré comme une maladie ». Le dépérissement d'un arbre est causé par l'interaction de divers facteurs d'importance relative, variables dans l'espace et le temps. Les multiples causes du dépérissement sont généralement hiérarchisées selon trois classes de facteurs (Tableau 1).

Depuis 1976, des dépérissements ont été signalés dans les futaies de hêtre, souvent âgées, de la forêt périurbaine de Bruxelles. Ils se sont accentués dans les années 1990, gagnant également divers peuplements de chênes (Herbauts *et al*, 1998). Certains facteurs peuvent être impliqués dans la susceptibilité des arbres de la forêt de Soignes au dépérissement. Premièrement, la forêt de Soignes se situe à proximité du centre urbain de Bruxelles où la pollution atmosphérique est non négligeable. Par ailleurs, le sol limoneux de la forêt de Soignes est très sensible au tassement résultant d'exploitations forestières et d'une fréquentation intense. De plus, la présence d'un horizon compact en profondeur (*Fragipan*), en lien avec des processus périglaciaires limite l'enracinement et augmente la sensibilité aux chablis. Enfin, la composition de la forêt de Soignes est caractérisée par un déséquilibre de la structure des âges.

Plus globalement, la forêt de Soignes est également soumise aux changements climatiques. Les impacts attendus sur les écosystèmes forestiers sont les suivants : (i) une augmentation de la température et de la concentration en CO<sub>2</sub> combinée à un allongement de la période de végétation. Ces phénomènes peuvent occasionner une augmentation de la productivité des stations fertiles et une augmentation des carences dans les stations qui le sont moins, avec l'apparition de problèmes sanitaires ; (ii) une augmentation de la xéricité en période de végétation (air et sol) qui peut entraîner des stress hydriques puis des dépérissements ; (iii) une augmentation de la pluviosité en période hivernale susceptible de provoquer des engorgements et donc des dégâts racinaires ; (iv) une augmentation de la fréquence d'événements climatiques extrêmes occasionnant des chablis, des dégâts de gelées hors saison,... (v) une modification des relations hôtes/parasites et l'apparition de

nouveaux parasites qui provoquent des problèmes sanitaires et finalement (vi) une perturbation de la biodiversité (Laurent *et al.*, 2009).

**Tableau 1 : Caractéristiques et exemples de facteurs de dépérissement.**

	<b>Fact. prédisposants</b>	<b>Fact. déclenchants</b>	<b>Fact. aggravants</b>
<b>Caractéristiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stress permanent</li> <li>- Baisse relative de la productivité</li> <li>- Détermine le degré de résistance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Brusques et intenses</li> <li>- Aggravés par des facteurs prédisposants existants.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Amplification des facteurs déclenchants</li> <li>- Stade final du dépérissement</li> <li>- Mort de l'arbre</li> </ul>
<b>Exemples</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conditions stationnelles (sol, altitude, régime hydrique,...)</li> <li>- Génétique</li> <li>- Climat</li> <li>- Age élevé</li> <li>- Interventions sylvicoles (travaux et coupes)</li> <li>- Pollution atmosphérique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Attaque de défoliateurs ou de pathogènes foliaires (oïdium)</li> <li>- Gel</li> <li>- Sécheresse</li> <li>- Pic de pollution</li> <li>- Tempête</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ravageurs (insectes, champignons, virus, nématodes, etc.)</li> <li>- Incendies</li> <li>- Tornades</li> </ul>

Dans le but d'évaluer l'état de vitalité actuel de la forêt mais aussi son évolution au fil des années, la Région bruxelloise s'est dotée d'un système de suivi sanitaire depuis 2009. Un échantillon des essences majoritaires, à savoir le hêtre (*Fagus sylvatica* L.), le chêne sessile (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) et le chêne pédonculé (*Quercus robur* L.), est observé et évalué chaque année durant l'été. Le suivi d'un échantillon de frênes a également débuté en 2023. En outre, un sous-échantillon de chênes et de hêtres est systématiquement photographié en été et en hiver à partir de points fixes au sol.

Les objectifs principaux du suivi de l'état sanitaire sont, d'une part, d'évaluer la vitalité actuelle de la forêt de Soignes à l'aide de l'indicateur de défoliation et de divers critères d'observation et, d'autre part, d'analyser son évolution depuis 2009, afin de mettre en évidence des tendances et tenter de les expliquer.

## 2. Description de la forêt de Soignes

### 2.1. Composition spécifique

La forêt de Soignes, d'une superficie totale de 4383 ha, est administrée selon sa division territoriale à 56% par la Région flamande (Agentschap voor Natuur en Bos), à 6% par la Région wallonne (Division de la Nature et des Forêts) et à 38% par la Région de Bruxelles-Capitale (Bruxelles Environnement). En plus de ces trois administrations, certains domaines sont gérés par la Donation Royale, la Fondation Solvay et quelques propriétaires privés.

La superficie de la forêt de Soignes bruxelloise est de 1657 ha (Gryseels *et al.*, 2006). Les peuplements de hêtraies pures en recouvrent 64,1%. La chênaie pure quant à elle s'étend sur 9,4% de la superficie forestière. La hêtraie et la chênaie mélangées représentent toutes les deux un vingtième de la surface. Finalement, 5% de la superficie est occupée par des résineux et 11,4% par des peuplements divers.

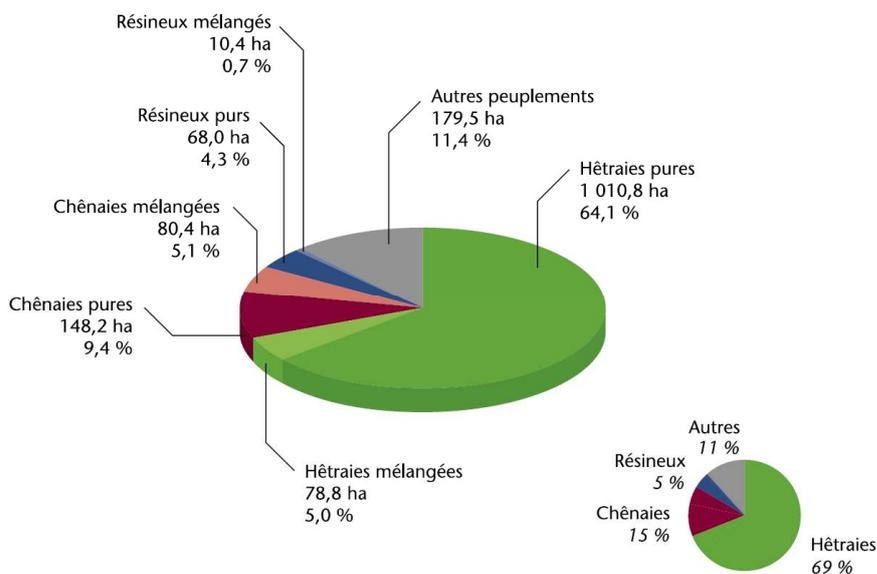
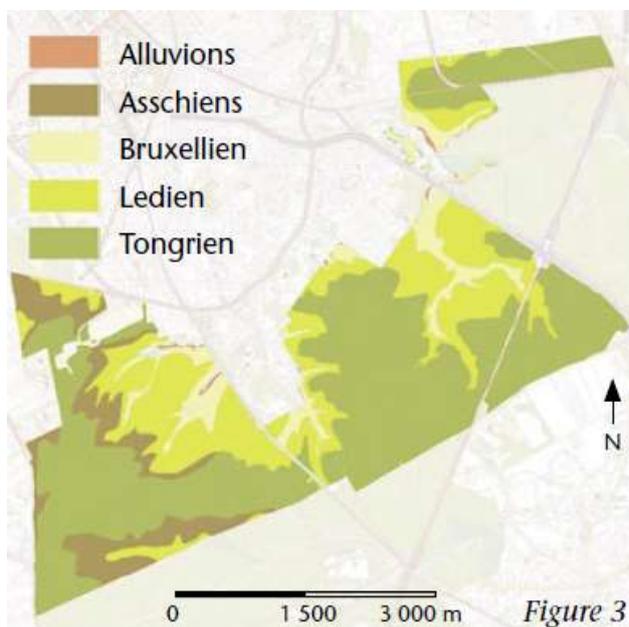


Figure 1: Proportion des types de peuplements en forêt de Soignes bruxelloise (Braem *et al.*, 2010)

## 2.2. Sols

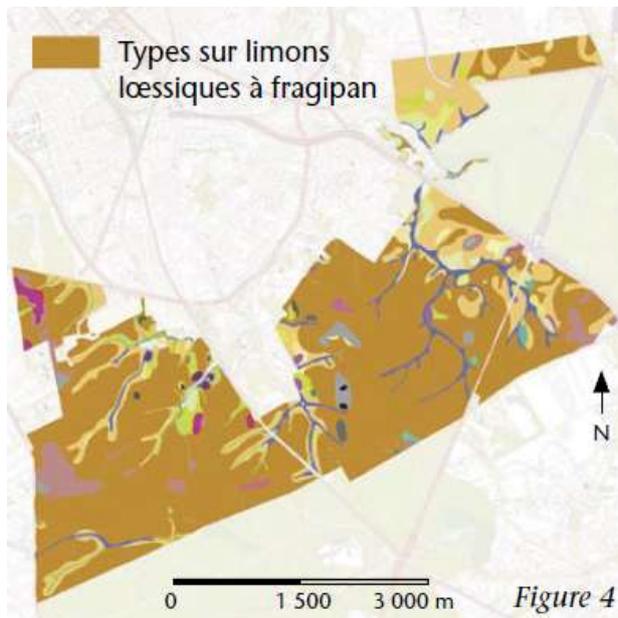
Le sous-sol, est constitué de sable (*bruxellien* et *lédien*) pour un tiers de la surface et d'argile (*asschien* et *tongrien*) sur deux tiers de la superficie (voir Figure 2). Ces argiles, et plus particulièrement les argiles du *tongrien*, entraînent la formation d'une nappe d'eau perchée responsable, pour une forte part, de la mauvaise stabilité du hêtre en forêt de Soignes (Vanwijnsberghe, 2003). Ces substrats sont recouverts d'une couche de loess éolien de texture limoneuse, dont l'épaisseur varie selon le relief. Au contact avec le substrat sous-jacent, les deux matériaux sont parfois mélangés sur une épaisseur de plusieurs dizaines de centimètres



**Figure 2: Roche-mère géologique présente sous le limon éolien. Les teintes jaunes présentent les assises à dominance sableuse (source: carte géologique de la Belgique, numérisation: BE-IBGE)**

Les sols soniens sont de type limoneux non gleyfiés sur près de 85% de la surface. Ces sols sont acides suite à la décarbonatation naturelle des limons de surface. Ce processus limite le développement de la pédofaune qui est nécessaire à une bonne structuration des sols (capacité de filtration et aération). Ils ont également subi un processus de lessivage d'argile conduisant à la formation d'un horizon appauvri en argile en surface, ce qui les rend très sensibles au tassement. Cette fragilité structurale accentuée par la surfréquentation et l'exploitation forestière a un effet dommageable sur les systèmes racinaires des ligneux et est à l'origine d'une réduction de leur pouvoir d'absorption en eau et en éléments nutritifs (Froehlich, 1990). En outre, dans ces sols à faible activité biologique, la restauration structurale spontanée est extrêmement lente (Herbauts *et al.*, 1998).

Par ailleurs, la fertilité chimique du sol est très faible en surface (pH H<sub>2</sub>O de l'ordre de 3,5 à 4,5) et plus élevée entre 2 et 4 mètres de profondeur (pH H<sub>2</sub>O de l'ordre de 5 à 7). Sur toute la surface de la forêt, à des profondeurs variables selon les endroits (de 40 à 120 cm de profondeur), se trouve un horizon induré appelé *fragipan* (Figure 3) : horizon d'accumulation des argiles par lessivage, qui a été fortement compacté par l'action du gel lors des dernières glaciations. Cette compaction n'est pas le résultat d'un tassement, mais d'une floculation (« contraction ») extrême des argiles suite à la très forte dessiccation liée à la ségrégation de l'eau dans des lentilles de glace. Au niveau du fragipan, les racines ne peuvent pénétrer que par des interstices plus meubles qui forment des polygones. Les racines qui parviennent à traverser l'horizon induré (au-delà de 120 cm) se ramifient de nouveau et permettent de puiser l'eau et les éléments nutritifs nécessaires aux arbres (Langohr, 2010). Par contre, à long terme, certaines de ces racines rencontrent une telle résistance latérale qu'elles ne peuvent grossir et sont progressivement asphyxiées.

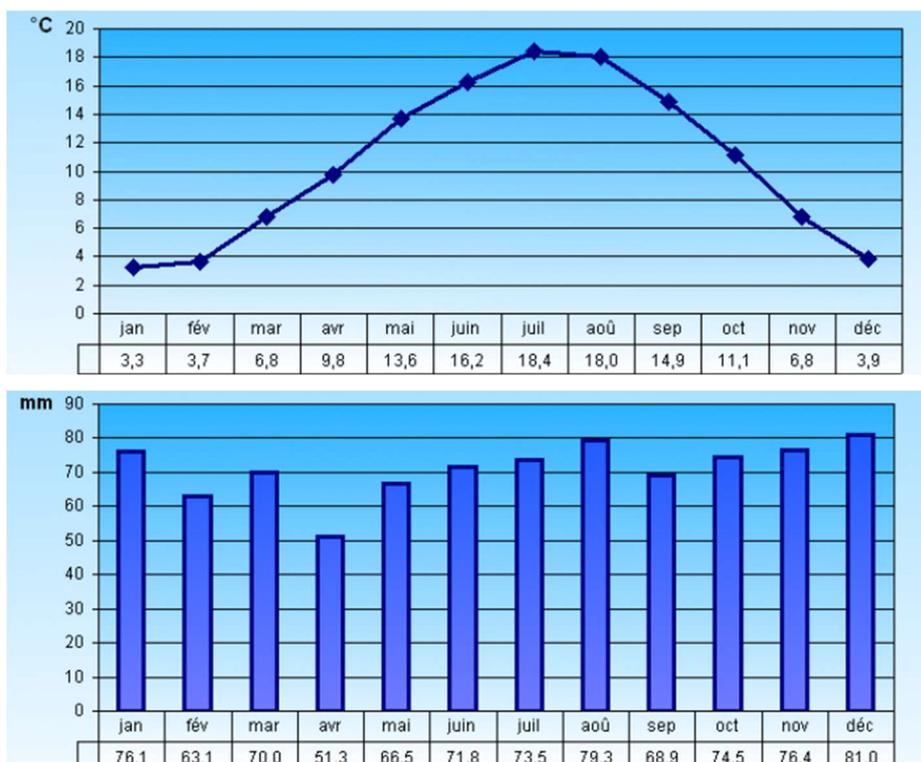


**Figure 3 : Les sols de la Forêt de Soignes sont dominés par le type Abc interprété comme étant un sol limoneux à fragipan (source: cartes des sols de Belgique; numérisation BE-IBGE)**

## 2.3. Climat

Le climat belge est de type tempéré atlantique. Sur base des moyennes calculées de 1981 à 2010, à Uccle, la température moyenne annuelle est de 10.5°C et les précipitations annuelles s'élèvent à 852 mm. Les températures du mois le plus chaud et le plus froid atteignent respectivement une moyenne de 18.4°C en juillet et de 3.3°C en janvier. Les précipitations mensuelles oscillent entre 51.3 mm et 81 mm comme illustré à la Figure 4.

### Uccle



**Figure 4 : Température et précipitations mensuelles mesurées à la station météorologique d'Uccle, 1981-2010 (IRM, 2011).**

## 3. Méthodologie

### 3.1. Mise au point du plan d'échantillonnage 2022-2025

#### 3.1.1. Plan initial (2009)

Le plan d'échantillonnage initial, établi en 2009, était constitué au départ de 34 placettes situées exclusivement dans les peuplements de chênes et de hêtres, purs ou mélangés, de plus de 60 ans (Braem, 2009). L'âge et le type de peuplement sont issus de la carte des peuplements élaborée par Grégory Timal (Centre de Développement Agro-Forestier à Chimay) en 2006. Ces placettes sont positionnées sur la grille systématique de l'Inventaire du Patrimoine Forestier de la Région de Bruxelles-Capitale, mis en place par Alderweireld (2007). Cette grille a une maille de 400m x 400m minimum. Pour réduire la charge de travail des adjoints forestiers, la sélection de 34 placettes du suivi sanitaire a été partagée en trois sous-échantillons. Le premier, visité tous les ans, était constitué des 6 placettes en chênaie. Les deux autres ont été formés en scindant la grille des 28 placettes en hêtraie et en ne retenant qu'une rangée de placettes d'alignement nord-sud sur deux. Ces deux sous-échantillons comportent chacun une quinzaine de placettes et sont visités alternativement d'une année à l'autre (années paires versus années impaires).

Les arbres sélectionnés pour le suivi de l'état sanitaire sont :

- les individus ayant une circonférence à 1m50 égale ou supérieure à 80 cm. Chaque année, les arbres atteignant ce seuil de circonférence sont localisés et observés.
- les arbres dominants ou co-dominants dont le houppier capte la lumière directe. Les arbres sur-cimés ne sont donc pas pris en compte car ils sont trop influencés par la concurrence.

Le protocole prévoit qu'en hêtraie, 10 arbres (hêtres ou chênes) au plus soient considérés dans un rayon maximum de 18 m à partir du centre de la placette. En chênaie, par contre, l'effectif ne doit pas excéder 15 chênes indigènes dans un rayon maximum de 30 m. De plus grandes placettes sont établies en chênaies afin de renforcer les effectifs en chênes et d'obtenir un échantillon représentatif de la forêt de Soignes bruxelloise.

Toutefois, avant 2013, le nombre d'arbres observés dans certaines placettes était supérieur à celui préconisé par le protocole. Par conséquent, la règle précédemment citée est appliquée uniquement pour les placettes sélectionnées après 2013. Les premières placettes, quant-à-elles conservent les mêmes effectifs afin, d'une part, de poursuivre le suivi de l'ensemble des arbres et, d'autre part, de

bénéficier d'un échantillon plus large qui permet d'augmenter la confiance que l'on tire de la généralisation des résultats. Le fait d'avoir des effectifs différents selon les placettes n'est pas problématique car l'objectif de l'étude n'est pas la comparaison inter-placette.

Enfin, il est à noter que la taille et le statut social des arbres peut évoluer au fil du temps. Dès lors, ces paramètres sont vérifiés et enregistré lors de chaque visite pour l'ensemble des arbres présents dans le rayon de sélection, mais seuls les arbres répondant aux critères précités font l'objet d'une évaluation sanitaire. L'échantillon analysé peut dès lors évoluer légèrement au cours du temps.

### **3.1.2. Modification du plan introduite en 2018**

L'alternance bisannuelle des observations en hêtraie permet de disposer d'un échantillon largement représentatif des situations (sol, âge, ...), tout en limitant le travail de terrain. Toutefois, cette alternance engendre des difficultés pour les analyses statistiques et l'interprétation du suivi photographique.

En 2018, nous avons introduit une première modification visant à compenser partiellement cette difficulté liée à la discontinuité des observations en hêtraie. Les 30 hêtres du suivi photographique (Annexe 1) sont désormais observés chaque année. L'intensification du suivi (transition de bisannuel à annuel) pour ces 30 arbres a été compensée par l'abandon du suivi (bisannuel) de certaines placettes totalisant environ 30 arbres : les 3188, 3509, 3511, 4151, 4307 et 4625. Ces dernières sont représentatives de l'ensemble de l'échantillon et sont réparties sur les deux brigades ainsi que dans les deux groupes (placettes « paires » et « impaires »).

### **3.1.3. Modifications du plan introduites en 2022**

L'adaptation du plan d'échantillonnage en 2018 a permis de faciliter l'interprétation du suivi photographique, mais les difficultés statistiques n'ont pas été totalement résolues en raison de la synchronisation entre les cycles de fructification et le cycle d'observation. Idéalement, l'ensemble des placettes devrait être observé annuellement. En outre, Bruxelles Environnement a exprimé le souhait d'étendre le suivi sanitaire à d'autres essences.

Afin de permettre ces évolutions, sans engendrer d'augmentation significative de la charge de travail pour les agents de terrain, une révision du plan d'échantillonnage, couplée à une adaptation des méthodes d'évaluation sanitaire, a été adoptée en 2022.

L'ensemble des arbres observés sur les placettes suivies de 2018 à 2021 a été repris dans le nouvel échantillon, que l'on nomme « **échantillon complet** ».

Un sous-échantillon, appelé « **échantillon ICP** », reprend 70 arbres (uniquement hêtres et chênes) répartis sur une douzaine de placettes. Il a été sélectionné de façon à inclure la plupart des arbres du **suivi photo** (cf §5) et être le plus représentatif possible de l'échantillon complet en termes de distribution des circonférences et des défoliations.

### **3.1.5. Consolidation et diversification**

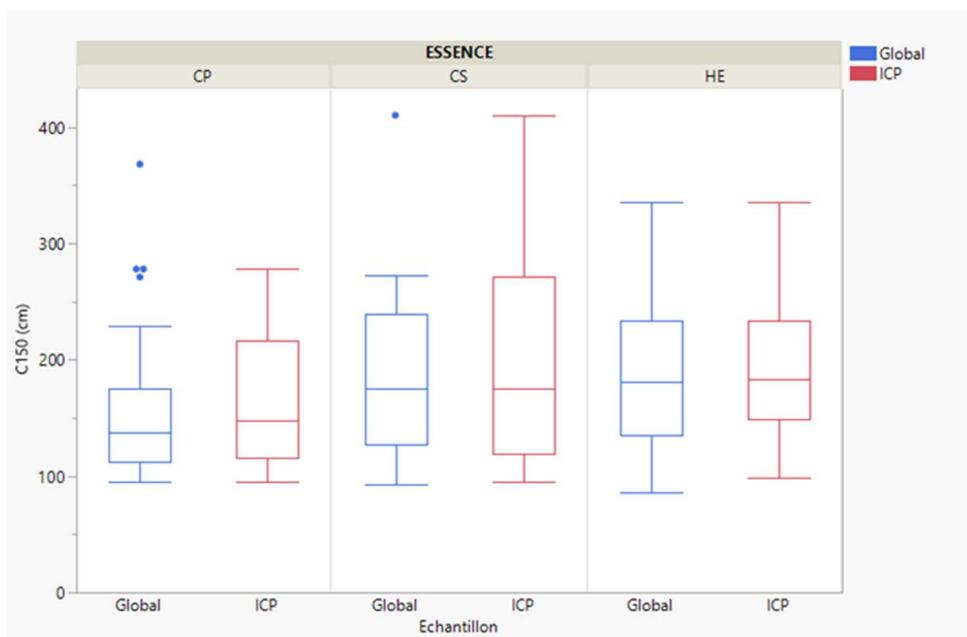
La convention 2022-2025 prévoit en outre un enrichissement progressif de l'échantillon. En 2022, nous avons ajouté une dizaine de chênes sessiles afin de palier au faible nombre d'individus précédemment suivis. Ensuite, de nouvelles essences seront ajoutées : les frênes en 2023, les pins en 2024 et les érables en 2024.

En 2023, l'échantillon complet a donc été enrichi des 29 frênes. Nous avons sélectionné les arbres suivis depuis 2021 pour la chalarose. Ils n'appartiennent pas à des placettes permanentes, mais chacun a été rattaché à la placette la plus proche afin de faciliter le stockage des résultats dans la base de données.

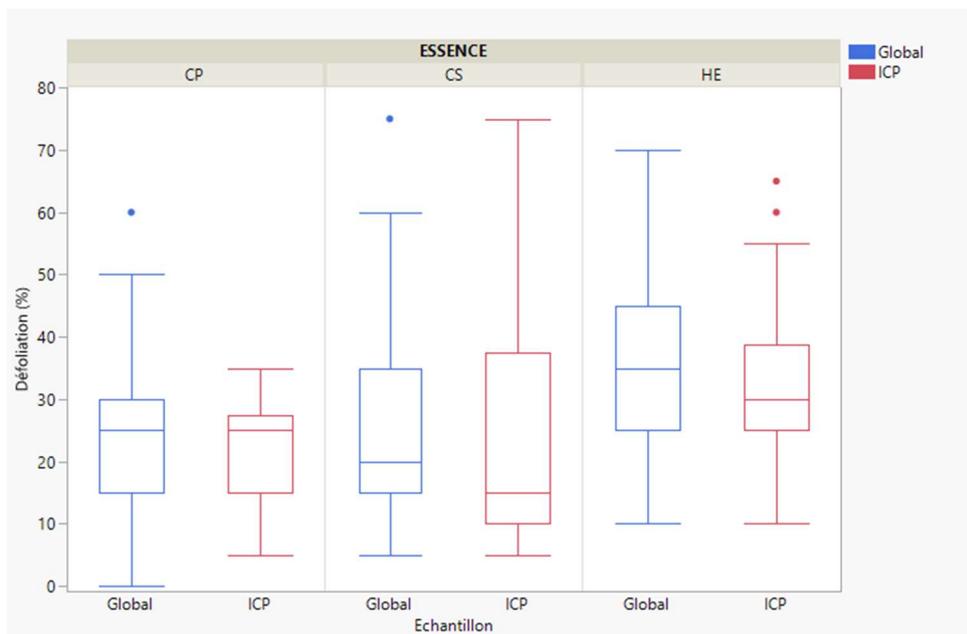
Nous avons en outre légèrement adapté l'échantillon « ICP » (Tableau 4) afin de sélectionner plus de chênes (surtout sessiles), de corriger les biais par rapport à l'échantillon complet constatés en 2022 (pour la circonférence et la défoliation) et d'inclure tous les arbres du suivi photo. Les correspondances des distributions des circonférences sont presque parfaites (Figure 5) tandis que de légers décalages subsistent pour les défoliations (Figure 6). Etant donné qu'à terme, les défoliations des différents arbres peuvent évoluer dans des sens divergents, affectant les distributions des sous-échantillons, nous avons accordé plus d'importance au critère « circonférence » et considérons que ces sélections sont satisfaisantes.

**Tableau 2 : Evolution du nombre d'arbres, dans les différents échantillons en fonction du protocole appliqué et de l'essence.**

Type de suivi	Essence	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Protocole rapide	Chêne pédonculé														39	38
	Chêne sessile														22	23
	Frêne															29
	Hêtre														153	163
	<b>TOTAL</b>														<b>214</b>	<b>253</b>
Protocole ICP	Chêne pédonculé	9	46	1	37	47	45	45	45	43	40	42	39	37	11	14
	Chêne sessile	1	7		10	7	10	8	10	7	10	9	10	9	4	9
	Hêtre	119	94	70	112	102	124	106	119	106	110	104	116	104	55	55
	<b>TOTAL</b>	<b>129</b>	<b>147</b>	<b>71</b>	<b>159</b>	<b>156</b>	<b>179</b>	<b>159</b>	<b>174</b>	<b>156</b>	<b>160</b>	<b>155</b>	<b>165</b>	<b>150</b>	<b>70</b>	<b>78</b>
Suivi photos	Chêne pédonculé							4	7	7	7	7	7	7	7	5
	Chêne sessile							2	3	3	3	3	3	3	3	5
	Hêtre							15	30	30	30	30	30	30	30	30
	<b>TOTAL</b>							<b>21</b>	<b>40</b>							



**Figure 5 : Comparaison des distributions (box-plots représentant les percentiles 25, 50 et 75) des circonférences en 2023 entre l'échantillon complet et l'échantillon ICP (CP : Chêne pédonculé ; CS : chêne sessile ; HE : hêtre). Les effectifs correspondants sont renseignés dans le Tableau 2**



**Figure 6 : Comparaison des distributions (box-plots représentant les percentiles 25, 50 et 75) des valeurs de défoliation en 2023 entre l'échantillon complet et l'échantillon ICP (CP : Chêne pédonculé ; CS : chêne sessile ; HE : hêtre). Les effectifs correspondants sont renseignés dans le Tableau 2**

## 3.2. Protocoles d'évaluation

A partir de 2022, la modification du plan d'échantillonnage s'accompagne de la mise sur pied de 3 protocoles différents : le protocole « rapide » appliqué à l'échantillon complet, le protocole « ICP » appliqué au sous-échantillon « ICP » et le suivi photographique.

### 3.2.1. Protocole « rapide »

Afin de permettre le suivi annuel de l'ensemble des arbres de l'échantillon complet, sans engendrer de surcharge de travail pour les agents, nous avons adopté un protocole simplifié pour l'évaluation sanitaire.

L'évaluation sanitaire sera désormais basée sur 3 critères : la **défoliation**, la **mortalité de branches** et le **manque de ramification**.

La défoliation est le critère central de la méthode ICP-forests. Il est maintenu dans le but de pouvoir relier les futures observations avec celles de la période 2009-2021 et analyser les tendances à long terme.

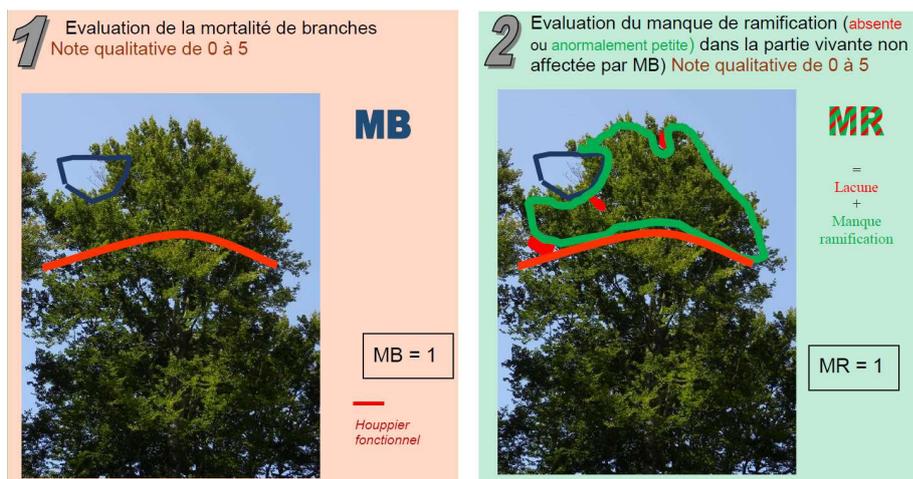
La mortalité de branches et le manque de ramification sont les critères de base de la méthode « DEPERIS »<sup>1</sup>, développée en France. Au même titre que la défoliation, ils sont évalués sur la partie du houppier non soumise à la concurrence (avec les voisins ou avec les branches supérieures du même arbre), appelé « houppier fonctionnel ». La mortalité de branches, notée dans un premier temps, est une estimation des espaces vides laissés par les branches/ramilles mortes **encore présentes**, en proportion du houppier fonctionnel. Le manque de ramification, noté ensuite, est une estimation des espaces vides attribués à des branches/ramilles manquantes, en proportion du total des branches **vivantes** du houppier fonctionnel. Les branches/ramilles manquantes incluent celles qui ont été cassées, celles qui sont mortes **et** disparues (pas de résidu visible) et celles qui ne se sont jamais développées. Ces critères sont notés sur une échelle de 0 à 5 sur base de définitions semi-quantitatives (Tableau 3) et de photographies fournies dans les fiches de référence (Figure 7).

---

<sup>1</sup> <https://agriculture.gouv.fr/la-methode-deperis-comment-quantifier-et-mesurer-letat-de-sante-dune-foret-et-son-evolution>

**Tableau 3 : Critères semi-quantitatifs associés aux notes DEPERIS**

Note	Intensité	Fréquence	Nombre	% indicatif
0	Absence ou trace	Nulle à très faible	0 à quelques rares	0 à 5
1	Légère	Faible	Quelques à peu nombreux	6 à 25
2	Assez forte	Modérée	Assez nombreux	26 à 50
3	Forte	Importante	Nombreux	51 à 75
4	Très forte	Très importante	Très nombreux	76 à 95
5	Total	Toute la partie notée concernée	Total	96 à 100



**Figure 7 : Illustration des critères « mortalité de branches » (MB) et « manque de ramification » (MR) (source : Département santé des forêts / ministère de l’agriculture français)**

Ces deux critères seront analysés séparément et seront également combinés en une note synthétique, comme le prévoit le protocole « DEPERIS » (Figure 8). Un arbre est qualifié de « sain » si sa note est « A » ou « B », « intermédiaire » si sa note est « C » et « dégradé » si sa note est D, E ou F. Le peuplement est qualifié de « dépérissant » si plus de 20% des arbres sont dégradés.

		Manque de Ramification (feuillus)					
		Manque d'Aiguilles (résineux sauf mélèze)					
Mortalités de Branches	0	A	B	C	D	E	F
	1	B	B	C	D	E	F
	2	C	C	D	D	E	F
	3	D	D	D	E	F	F
	4	E	E	E	F	F	F
	5	F	F	F	F	F	F

**Figure 8 : Abaque pour l’obtention d’une note synthétique « DEPERIS » à partir des critères « mortalité de branches » et « manque de ramification » (source : Département santé des forêts / ministère de l’agriculture français ; il est classiquement estimé que les notes D, E et F correspondent à des arbres dégradés (E et F très dégradés), alors que les arbres très peu symptomatiques (A et B) sont considérés comme sains. ;**

### **3.2.2. Caractérisation détaillée selon le protocole « ICP »**

Le protocole d'évaluation complet développé par « ICP-forests » a été appliqué jusqu'en 2021 par les agents « Bruxelles-Environnement » sur l'échantillon complet (avec alternance bisannuelle pour les hêtraies). Il continue à être appliqué, mais uniquement sur le sous-échantillon ICP-forests. Cette évaluation, effectuée par le spécialiste de l'équipe « UCLouvain », permet de comparer les méthodes, de fournir des interprétations plus fines en ce qui concerne les causes des dégradations et de fournir des données détaillées pour l'interprétation des photos. C'est pour cette raison que l'échantillon « ICP » doit inclure l'échantillon « Photos ».

### **3.2.3. Suivi photographique**

En 2015, nous avons débuté le suivi de l'état sanitaire d'un sous-échantillon d'arbres sur base de photographies prises au sol chaque année à partir de points fixes. Ce sous-échantillon est actuellement constitué de 30 hêtres et 10 chênes (cf §5).

Plusieurs types de prises de vue sont effectuées :

- Le houppier observable, selon une prise de vue à 45° (= prise de vue « H ») : cette prise de vue correspond aux conditions d'observation pour l'évaluation de la défoliation.
- La partie sommitale du houppier (cime), selon une prise de vue à 45° (= prise de vue « C ») : cette photo est prise du même point que pour « H », mais avec une distance focale plus grande (zoom), afin d'obtenir une résolution optimale pour l'observation de l'architecture des branches sommitales.

Les prises de vue sont effectuées 2 fois par an, en été et en hiver.

### **3.3. Description de l'échantillon 2023**

#### **3.3.1. Effectifs**

L'échantillon observé en 2023 (Tableau 4) est composé de 163 hêtres, 38 chênes pédonculés, 23 chênes sessiles et 29 frênes. Parmi ceux-ci, 77 arbres (54 hêtres, 14 chênes pédonculés et 9 chênes sessiles), constituent le sous-échantillon « ICP », et 41 ont été photographiés. Il est toutefois important de noter que ces effectifs incluent des arbres qui ne sont pas évalués en raison d'un manque de visibilité (cf §3.3.4). Ces derniers restent toutefois intégrés dans les différents échantillons car la visibilité peut évoluer au cours du temps ; la décision de les évaluer ou pas est prise au cas par cas chaque année par les observateurs.

**Tableau 4 : Nombre d'arbres par placettes repris dans les différents échantillons en 2023 (CP : Chêne pédonculé ; CS : chêne sessile ; FR : frêne ; HE : hêtre).**

Placette	Nombre d'arbres									
	Ech. complet				Ech. ICP			Ech. Photos		
	CP	CS	FR	HE	CP	CS	HE	CP	CS	HE
2791	4	7		6						
2877	1			8	1		4	1		4
2879				1						
2949			10							
2950			1							
2952			1							
3031				7			4			4
3033	1	4		6						
3197	3			7						
3345				8			4			2
3349				4			3			2
3595	3			1	3					
3668	1			5						
3831				6						
3989				5			2			1
4145				8			3			2
4147		3		9		3	5		3	
4309				5			5			5
4449	12		2		1			1		
4458				4						
4460			2							
4467				6						
4469				4			3			3
4529	9	1	3		9	1		3		
4536			2							
4539			3							
4541	1			9						
4618				11			9			2
4620			5							
4778				13			12			4
4781	3									
4783				9						
4785				5						
4928				12						
5022				4			1			1
5248		4				3			2	
5328		4				2				
Totaux	38	23	29	163	14	9	55	5	5	30
	253				78			40		

### 3.3.2. Distribution en classes de circonférence

Les distributions des arbres en classes de circonférence sont présentées à la Figure 9. Nous observons pour les chênes pédonculés une proportion élevée d'arbres de circonférence comprise entre 100 et 160 cm, et une dominance de frênes entre 180 et 240 cm.

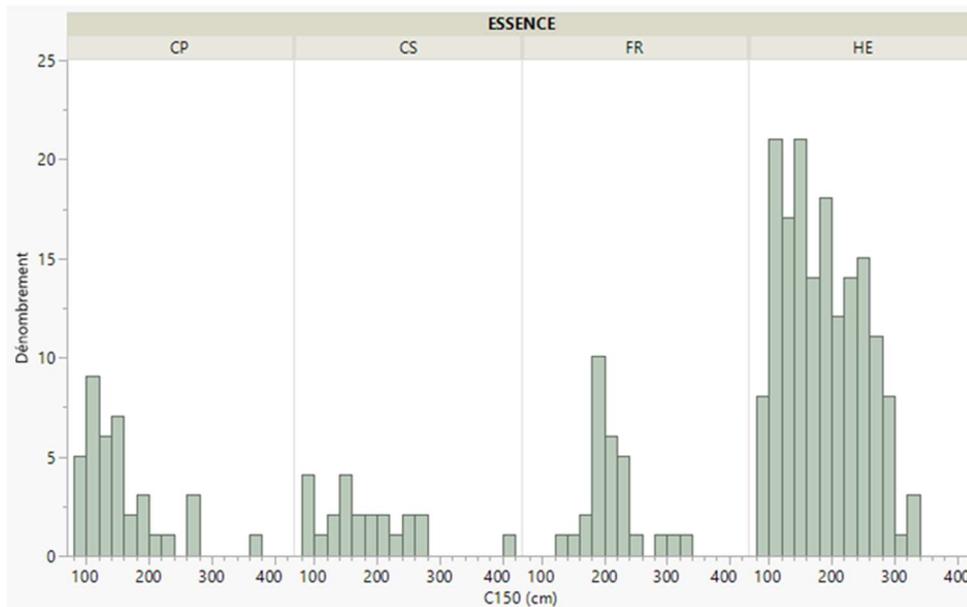


Figure 9 : Répartition des arbres de l'échantillon complet en classes de circonférences (CP : Chêne pédonculé ; CS : chêne sessile ; FR : frêne ; HE : hêtre)

### 3.3.3. Statut social

La grande majorité des arbres ont le statut « co-dominant », sauf dans le cas des frênes où l'on observe plus de 50% d'arbres dominants.

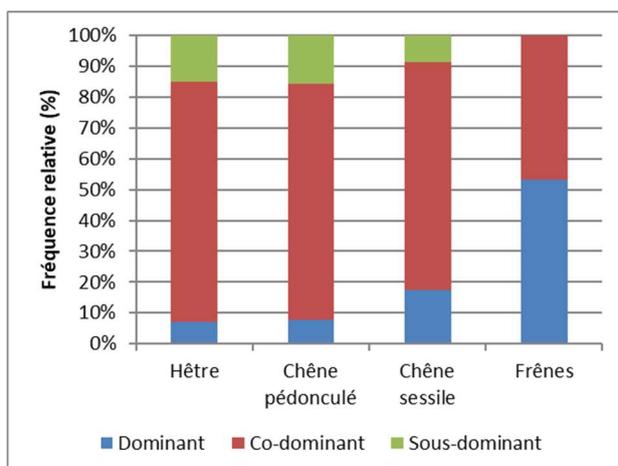


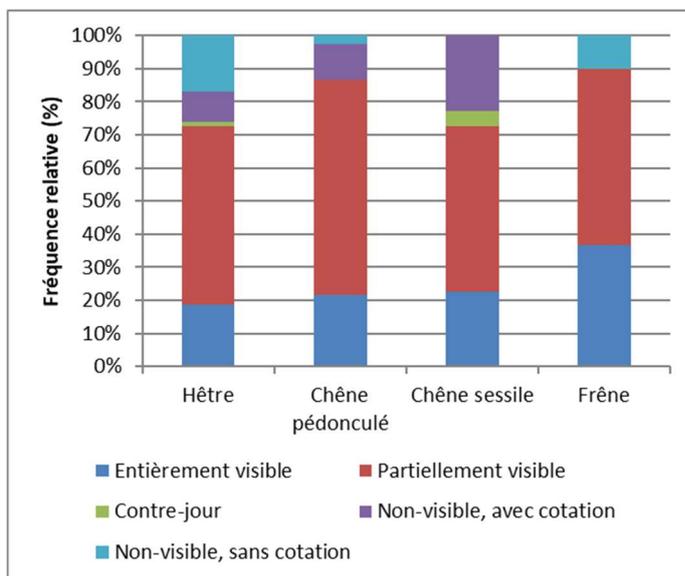
Figure 10 : Répartition des arbres selon leur statut social

### 3.3.4. Visibilité

La visibilité concerne la possibilité d’observer le houppier de façon optimale, soit en vue latérale, sous un angle d’environ 45°. Quatre catégories sont définies :

- i. Couronne entièrement visible ;
- ii. Couronne partiellement visible ;
- iii. Couronne partiellement visible mais à contre-jour ;
- iv. Couronne non visible due à la présence des houppiers voisins : le houppier est observable uniquement par le dessous.

La visibilité est un facteur limitant et une source d’erreur pour la caractérisation de la couronne. De fait, lorsque la visibilité de la couronne est réduite à cause des houppiers voisins, soit la partie observable est extrapolée à l’ensemble de la couronne, soit les observations sont réalisées par le bas, ce qui n’est pas idéal. Dans certains cas de non visibilité, les observateurs se sont abstenus de toute cotation, ce qui n’est pas idéal non-plus. En effet, la plupart des arbres « non visibles » sont généralement localisés dans les peuplements les plus jeunes. Leur exclusion conduit donc à une sous-représentation des arbres jeunes (et donc moins dégradés). Il n’y a donc pas de bonne solution générale ; la décision est prise au cas par cas par l’observateur.



**Figure 11 : Répartition des arbres selon leur visibilité**

Nous pouvons noter que les arbres bien visibles représentent 20% des hêtres et chênes et plus de 35% des frênes (Figure 11). A l’opposé, les arbres non visibles représentent près de 30% des hêtres, plus de

20% des chênes sessiles, 12% des hêtres et 10% des frênes. Parmi les individus non visibles, plus de la moitié des hêtres et la totalité des chênes pédonculés ne reçoivent pas de cotation.

Suite à l'exclusion de ces arbres en raison de leur très mauvaise visibilité, les analyses statistiques pour l'échantillon complet portent en 2023 sur **136** hêtres, **37** chênes pédonculés, **23** chênes sessiles et **27** frênes.

### **3.4. Encodage et traitement des données**

L'ensemble des données recueillies durant la campagne 2023 ont été encodées dans la base de données MS Access. Les traitements statistiques ont été effectués via l'interface *JMP pro 17.1*, qui fait appel au système SAS.

### **3.5. Contrôle-qualité**

#### **3.5.1. Méthodes**

La méthode de diagnostic de l'état sanitaire étant basée sur des estimations visuelles, le résultat est susceptible d'être influencé par l'appréciation et l'expérience de l'observateur. Afin de s'assurer de la fiabilité des données dans ces conditions, le protocole prévoit des mécanismes d'ajustement qui s'effectuent à deux niveaux : (i) en amont, la « calibration » des observateurs avant la campagne d'observation ; (ii) en aval, le « contrôle » des observations de terrain par une équipe de référence qui participe elle-même à des calibrations au niveau européen.

Les adjoints forestiers BE-IBGE sont formés chaque année depuis 2009. Depuis 2012, la formation se focalise sur l'application du protocole *ICP Forests* plutôt que sur l'aspect théorique. Les arbres d'entraînement sont les mêmes depuis 2016, sélectionnés sur la 2<sup>e</sup> brigade. Cette méthode assure l'observation d'arbres présentant des morphologies et des états sanitaires variés en minimisant le temps de déplacement. Le protocole prévoit qu'au moins 5% des arbres échantillonnés pour le suivi de l'état sanitaire soient observés une première fois par les observateurs (ici, BE-IBGE) et une deuxième fois par une équipe de référence (ici, l'UCLouvain). L'objectif est que 70% des arbres observés deux fois aient la même cotation de défoliation à 10% près (Eichhorn *et al.*, 2010).

A partir de 2022, ces doubles observations sont effectuées exclusivement sur le sous-échantillon ICP, et concernent les 3 paramètres évalués par les agents : « défoliation », « mortalité de branches » et

« manque de ramification ». L'échantillon « contrôle » comporte en 2023 un total de 69 arbres (48 hêtres, 12 chênes pédonculés et 9 chênes sessiles), soit respectivement 29%, 32% et 39% des effectifs retenus pour le diagnostic sanitaire (voir Tableau 2 : Evolution du nombre d'arbres, dans les différents échantillons en fonction du protocole appliqué et de l'essence.). Notons que cet échantillon ne correspond pas exactement à l'échantillon ICP, car certains arbres n'ont pas reçu de cotation de la part d'au moins une des deux équipes, pour cause de mauvaise visibilité.

### 3.5.2. Défoliation

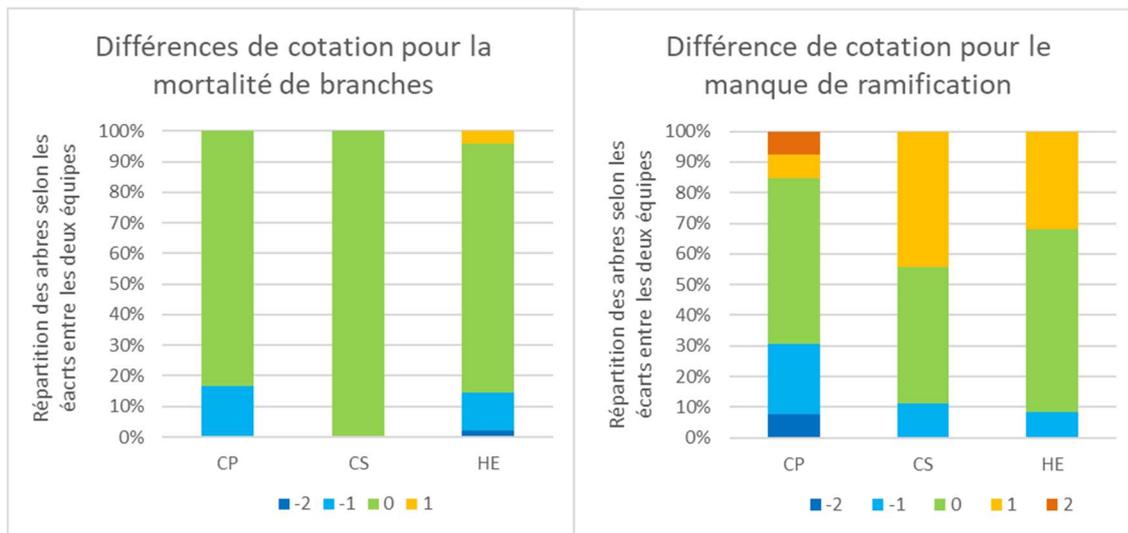
La proportion de cote de défoliation ne variant pas de plus de 10% entre les deux équipes atteint 85% pour les hêtres, 67% pour les chênes pédonculés et 89% pour le chêne sessile. De plus, les moyennes des écarts entre équipes ne sont significatives pour aucune essence (Tableau 5). Nous pouvons donc conclure que les résultats des 2 équipes sont similaires.

**Tableau 5 : Comparaison des résultats des deux équipes pour la défoliation**

	Effectif de contrôle	Proportion contrôlée (%)	Défoliation moyenne UCL (%)	Défoliation moyenne BE- (%)	Moyenne des écarts BE - UCL(%)	Résultat test t de Student
<b>Hêtres</b>	48	29	32.7	32.5	+0.2	Prob.>  t  = 0.86 (n.s.)
<b>Chênes pédonculés</b>	12	32	22.9	23.7	+0.8	Prob.>  t  = 0.84 (n.s.)
<b>Chênes sessiles</b>	9	39	25.0	18.6	-6.4	Prob.>  t  = 0.056 (n.s.)

### 3.5.3. Paramètres « DEPERIS »

Nous avons comparé les cotations des critères « DEPERIS » (mortalité des branches et manque de ramification) des deux équipes pour chaque arbre de l'échantillon « contrôle » en effectuant une simple différence (BE - UCLouvain) entre les deux cotations (nb : ces critères sont évalués sur une échelle de 0 à 6). Nous avons ensuite calculé la fréquence de chaque écart pour chaque essence (Figure 12).



**Figure 12 : Comparaison des cotations pour la mortalité de branches et le manque de ramification entre les deux équipes ; les écarts (= séries des graphes) représentent la différence entre la cote de l'équipe « Bruxelles-Environnement » et l'équipe « UCLouvain ; les proportions (= axe y des graphes) représentent la fréquence de chacun des écarts pour une essence donnée (CP : chêne pédonculé ; CS : chêne sessile ; HE : hêtre).**

En ce qui concerne la mortalité de branches, la différence entre les cotations est nulle pour 100% des chênes sessiles et 80% des autres essences ; lorsqu'une différence est observée, la cotation de l'équipe « Bruxelles Environnement » est généralement plus faible que celle de l'UCLouvain.

Pour le manque de ramification, les résultats sont moins bons. Les arbres ne présentant pas d'écart de notation sont moins nombreux et nous observons pour les chênes sessiles et les hêtres que les arbres présentant un écart positif sont plus nombreux que ceux qui présentent un écart négatif. Dans le cas des chênes pédonculés, les écarts positifs et négatifs sont plus « équilibrés », mais quelques arbres présentent un écart de 2 classes, ce qui est fort élevé étant donnée l'amplitude des classes.

## 4. Résultats

### 4.1. Evolution de la défoliation

Cette analyse est effectuée sur base des données récoltées par les agents de « Bruxelles Environnement ». En 2022 et 2023, elles concernent l'échantillon complet, alors qu'elles étaient effectuées sur deux sous-échantillons en alternance bisannuelle entre 2009 et 2021.

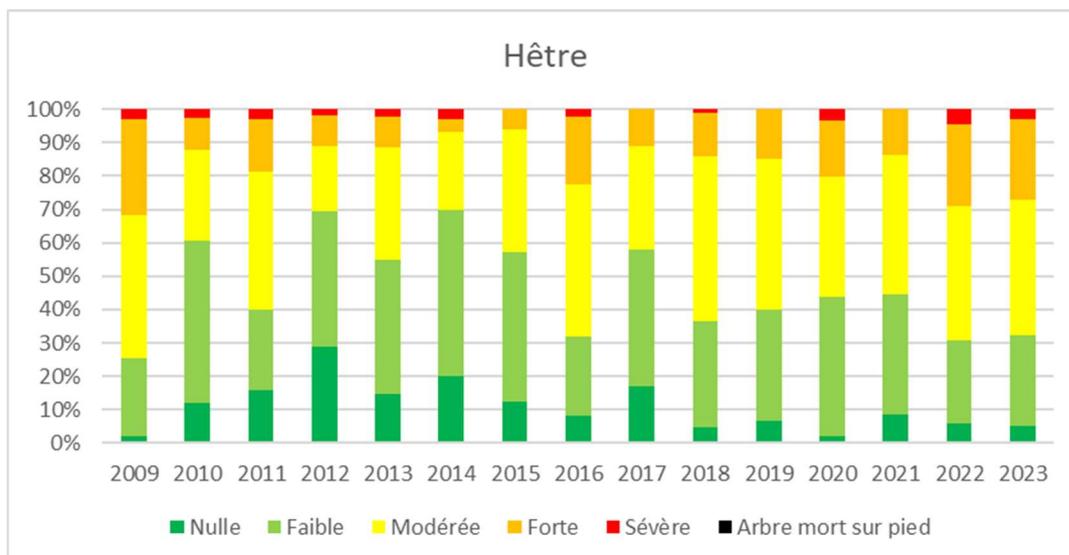
#### 4.1.1. Répartition par classe de défoliation

Ces classes de défoliation sont définies au niveau du groupe d'experts d'ICP-forests pour correspondre à différents niveaux de dégradation :

- 0-10% : dégradation « nulle »
- 11-25% : dégradation faible
- 26-40% : dégradation modérée
- 41-60% : dégradation forte
- 61-99% : dégradation sévère
- 100% : arbre mort sur pied

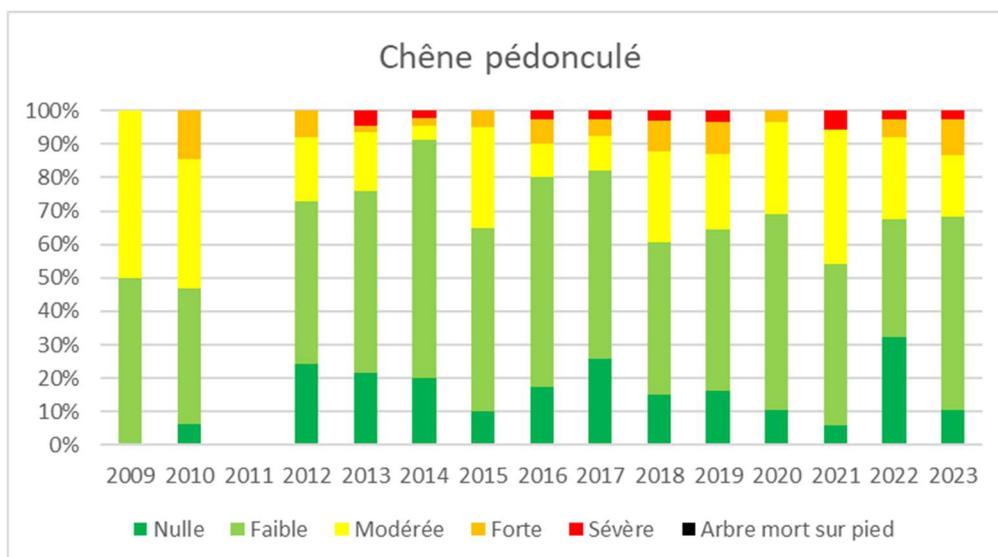
L'ancienne classe « dégradation modérée » qui s'étendait de 26% à 60% est désormais scindée en deux sous-classes (<https://www.icp-forests.org/pdf/TR2018.pdf>), car elle englobait des situations trop contrastées en termes de risque de dépérissement à moyen terme. Aucun nom officiel n'a été donné aux deux sous classes, mais nous estimons que le terme « modéré » ne peut s'appliquer qu'à la première. Au-delà de 40% de défoliation, nous estimons que la dégradation doit être qualifiée de « forte ».

Pour les hêtres (Figure 13), 75% des arbres présentent une défoliation supérieure à 25% (modérée, forte ou sévère) en 2022 et 2023, mais seuls 30% du total présentent une dégradation forte ou sévère (supérieure à forte ou sévère). Ces proportions sont nettement plus élevées qu'en 2020 et 2021 et sont proches de celles observées en 2009 et 2016, années de très forte fructification. En 2022 et 2023, la fructification des hêtres n'a pas été forte (cf § 4.3.2) et ne peut donc expliquer la dégradation observée par rapport à 2020 et 2021.



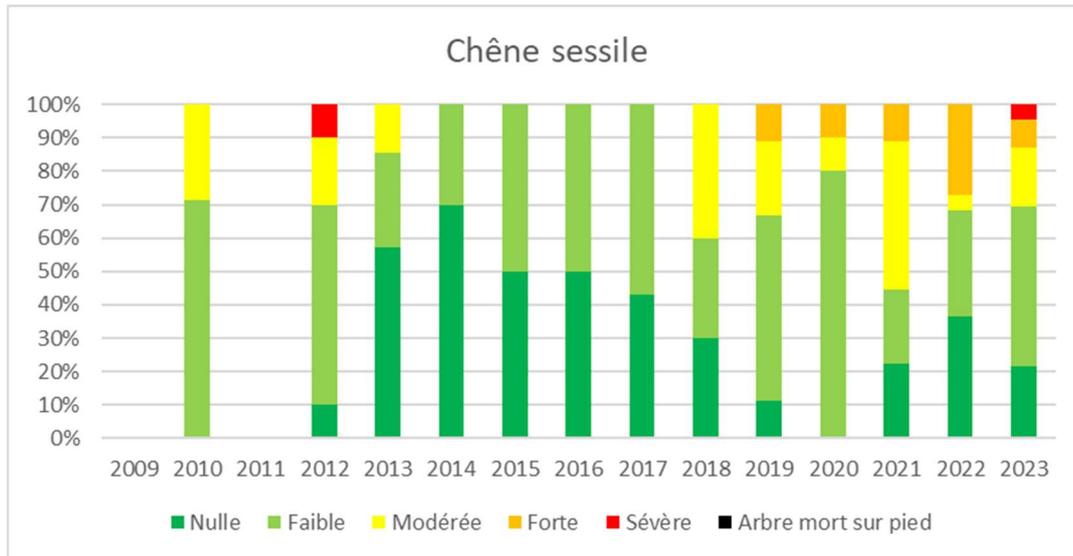
**Figure 13 : Evolution de la répartition des hêtres selon les classes de défoliation [Nulle (0-10%) ; Faible (11-25%) ; Modérée (26-40%) ; Forte (41-60%) ; Sévère (61-99%) ; Arbre mort sur pied (100%)]**

Pour les chênes pédonculés, 31% des arbres présentait une défoliation supérieure à 25% (dégradation modérée ou forte) en 2023, et 2% du total présentent une dégradation sévère. Ces proportions ne présentent pas d'évolution claire par rapport à 2022.



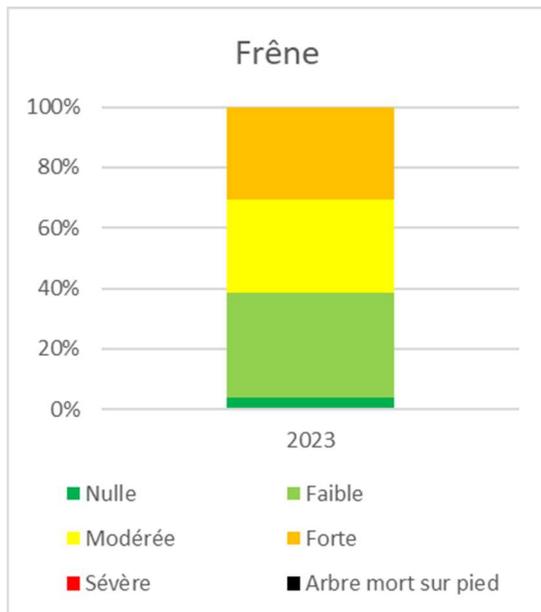
**Figure 14 : Evolution de la répartition des chênes pédonculés selon les classes de défoliation [Nulle (0-10%) ; Faible (11-25%) ; Modérée (26-40%) ; Forte (41-60%) ; Sévère (61-99%) ; Arbre mort sur pied (100%)]**

La proportion des chênes sessiles présentant une défoliation « modérée » ou « forte » est de 31% en 2023. Pour la première fois depuis 2012, un arbre sévèrement dégradé est observé (=3% de l'échantillon).



**Figure 15 : Evolution de la répartition des chênes sessiles selon les classes de défoliation [Nulle (0-10%) ; Faible (11-25%) ; Modérée (26-40%) ; Forte (41-60%) ; Sévère (61-99%) ; Arbre mort sur pied (100%)]**

Chez les frênes, nous observons une répartition des arbres quasiment identique entre les classes de dégradation « faible », « modérée » et « forte ». Rappelons que l'évaluation des frênes selon les critères de cette étude a débuté cette année.



**Figure 16 : Répartition des frênes selon les classes de défoliation en 2023 [Nulle (0-10%) ; Faible (11-25%) ; Modérée (26-40%) ; Forte (41-60%) ; Sévère (61-99%) ; Arbre mort sur pied (100%)]**

## 4.1.2. Evolution de la défoliation

### 4.1.2.1. Méthodes statistiques

Nous avons opté depuis 2019 pour une nouvelle approche statistique permettant d'analyser les évolutions sur l'ensemble du jeu de données, en incluant simultanément les deux sous-échantillons de hêtres, les arbres qui ont été exploités en cours d'étude, les placettes qui ne sont plus suivies pour d'autres raisons et les arbres qui n'étaient pas suivis au départ, mais ont atteint le seuil de 80 cm de circonférence. Cette approche tire également parti du fait que certains hêtres sont mesurés chaque année depuis le début du suivi (ceux qui sont situés en chênaie) ou depuis 2018 (ceux qui font partie du sous-échantillon « suivi photo »).

Elle est basée sur un « modèle linéaire mixte », dans lequel on considère l'individu (arbre), comme une variable aléatoire (variable catégorielle non contrôlée). Le modèle va en quelque sorte déduire la variabilité attribuée aux individus de la variabilité globale afin de mieux isoler les effets des facteurs fixes (= facteurs que l'on veut étudier). Tous les individus sont pris en compte, mais leur influence sur le résultat est proportionnelle au nombre de mesures (et donc au nombre d'années d'observation).

Cette méthode nous permet de calculer une variable dérivée appelée « **défoliation corrigée** », obtenue en soustrayant les effets « individus » de la valeur brute de défoliation. Notons que cette opération ne modifie pas fortement la moyenne globale ni la pente globale (car la moyenne de chacun de ces deux effets aléatoires est de zéro), mais réduit fortement la dispersion autour de ces paramètres et conduit à de légers ajustements, en raison du fait que l'échantillon varie chaque année. Cette opération vise en particulier à corriger l'éventuel biais lié à l'alternance bisannuelle des visites en hêtraie, mais également les effets de l'abandon ou de l'ajout de certains arbres en cours d'étude.

Pour étudier de l'évolution à long terme, nous considérons l'année comme une variable continue et nous intéressons au coefficient qui s'y rapporte dans les résultats de l'analyse statistique. Pour étudier les fluctuations, nous considérons l'année comme une variable catégorielle et nous intéressons aux différences entre les différentes combinaisons d'années (comparaison multiple, méthode de Student) pour les valeurs moyennes de « défoliation corrigée » (cf. ci-dessus).

#### 4.1.2.2. Evolution à long terme

Les résultats des régressions linéaires sur les valeurs de défoliation sont présentés aux Tableau 6 .

En ce qui concerne les chênes, le coefficient associé à l'année n'est pas significatif pour aucune des 2 essence. Cela signifie qu'il n'y a aucune évolution linéaire sur le long terme, mais n'exclut pas de possibles fluctuations (*cf.* ci-dessous).

Pour le hêtre, le coefficient associé à l'année est significatif : l'augmentation moyenne de la défoliation est de **0.48% par an** sur l'ensemble de la période. Ce coefficient est nettement supérieur à l'estimation de l'effet du vieillissement des arbres au cours du suivi sur la défoliation (+0.11% par an), effectuée pour le rapport 2021.

**Tableau 6 : Estimations des coefficients « année » et intervalles de confiance**

Essence	Coefficient	Prob. >  t	IC95 (min)	IC95 (max)
Hêtres	<b>0.48</b>	<b>&lt;0.0001 (***)</b>	0.36	0.61
Chênes pédonculés	0.02	0.88 (n.s.)	-0.22	0.24
Chênes sessiles	0.44	0.06 (n.s.)	-0.02	0.90

#### **4.1.2.3. Fluctuations**

L'évolution des valeurs moyennes de la « défoliation corrigée » est présentée à la Figure 17, et les comparaisons statistiques (ANOVA avec comparaisons multiples de Student) sont détaillées au Tableau 7.

Pour les hêtres, nous observons de fortes fluctuations de la défoliation corrigée, notamment d'importantes hausses en 2011, 2016 et 2022. Les deux premières hausses, liées à des pics de fructification, ont été suivies d'une baisse. Par contre, après la hausse de 2022, nous observons une stabilisation en 2023.

Les chênes pédonculés et sessiles présentent également des fluctuations assez marquées de la défoliation corrigée. Les valeurs observées en 2023 ne sont pas statistiquement différentes de celles de 2018 à 2022 (Tableau 7).

Les frênes présentent une défoliation moyenne de 35% en 2023 et la tendance n'est pas analysée vu que le suivi a débuté cette année.



Figure 17 : Evolution des valeurs moyennes annuelles de la « défoliation corrigée » pour les 3 essences étudiées depuis 2009 (CP : chêne pédonculé ; CS : chêne sessile ; HE : hêtre).

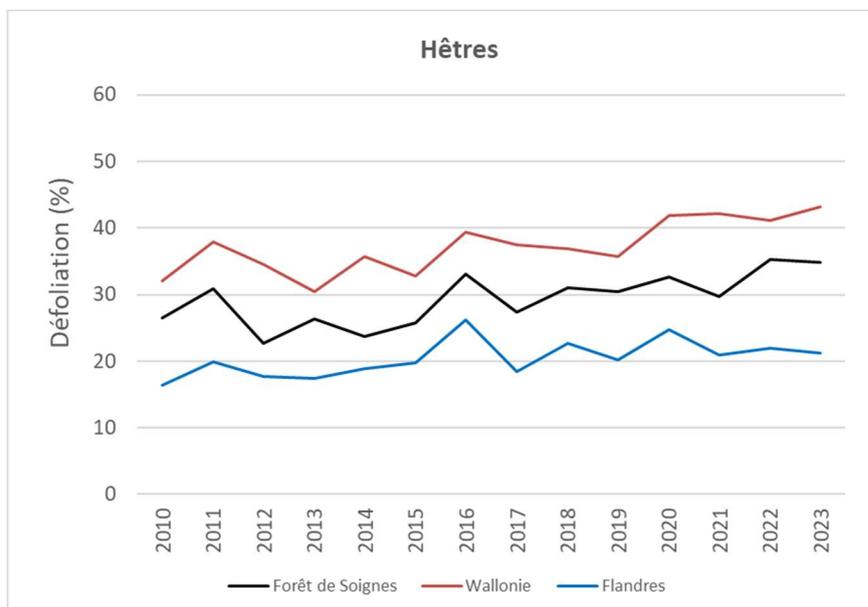
Tableau 7 : Valeurs moyennes annuelles pour la défoliation corrigée (%) des 3 essences étudiées ; pour une colonne donnée, deux moyennes sont significativement différentes si elles ne sont accompagnées d'aucune lettre commune ; les couleurs représentent le classement des moyennes annuelles (vert foncé = valeur la plus basse ; rouge foncé = valeur la plus élevée)

Année	Hêtres	Chênes pédonculés	Chênes sessiles
2009	33.5 ab	20.9 bcdef	
2010	25.6 efg	30.6 a	27.9 a
2011	31.1 bc		
2012	21.7 h	23.5 bcde	26.9 a
2013	26.3 def	22.1 def	15.3 cde
2014	23.1 gh	19.7 ef	10.2 e
2015	24.7 fg	25.4 bcd	15.6 cde
2016	32.6 ab	21.5 def	13.2 de
2017	25.7 efg	19.0 f	16.1 bcde
2018	29.9 c	25.0 bcd	20.7 abcd
2019	28.4 cde	27.0 abc	24.1 abc
2020	30.8 bc	23.6 bcde	24.7 ab
2021	28.7 cd	27.7 ab	26.3 a
2022	34.5 a	22.8 cdef	24.7 a
2023	33.9 a	25.4 bcd	24.3 ab

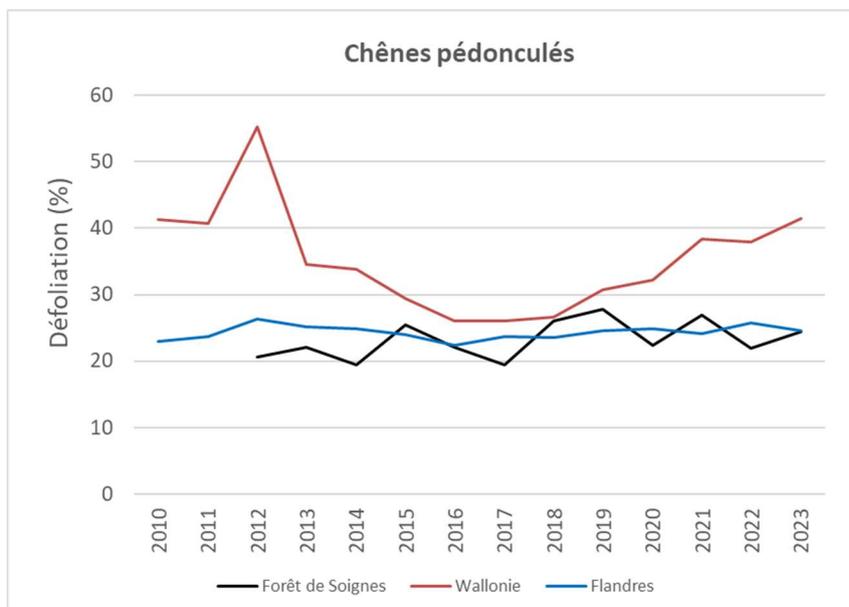
#### 4.1.2.4. Comparaisons avec la Flandre et la Wallonie

Les évolutions de la défoliation moyenne brute (non corrigée pour les variations de l'échantillon § 4.1.2.1) sont comparées à celles observées en Wallonie et en Flandre.

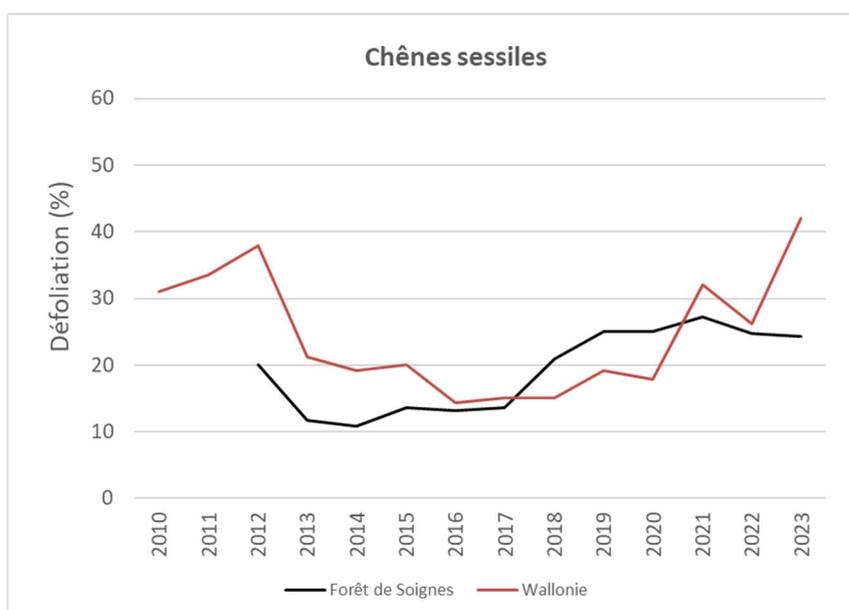
Pour les hêtres (Figure 18), les valeurs en forêt de Soignes sont situées entre celles des régions voisines les fluctuations présentent des similitudes avec les deux régions, mais plus particulièrement avec la Flandre. Pour les chênes pédonculés, les valeurs en forêts de Soignes sont très similaires à celles observées en Flandres, mais fluctuent plus. Pour les chênes sessiles, les valeurs fluctuent à Bruxelles et en Wallonie, mais il semble que l'on se situe actuellement dans une phase descendante à Bruxelles alors qu'une forte dégradation est observée en Wallonie.



**Figure 18 : Comparaison de l'évolution de la défoliation moyenne des hêtres en forêt de Soignes, en Flandre et en Wallonie**



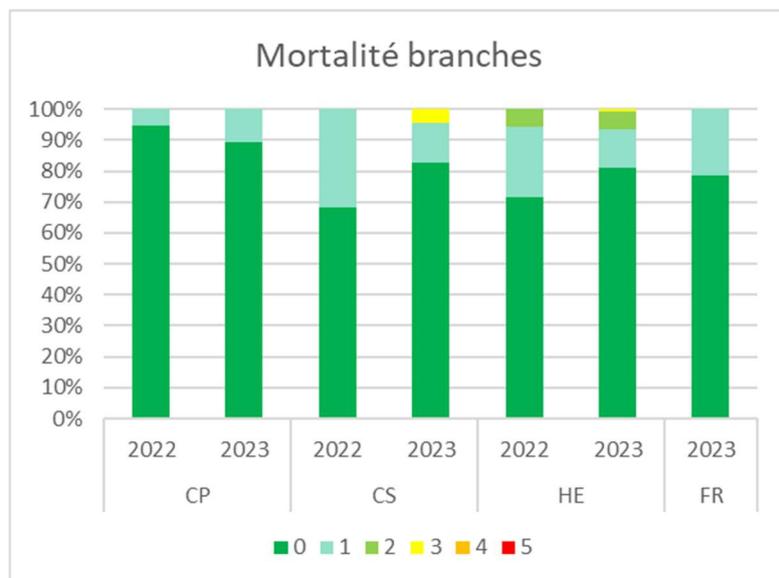
**Figure 19 : Comparaison de l'évolution de la défoliation moyenne des chênes pédonculés en forêt de Soignes, en Flandre et en Wallonie**



**Figure 20 : Comparaison de l'évolution de la défoliation moyenne des chênes sessiles en forêt de Soignes et en Wallonie**

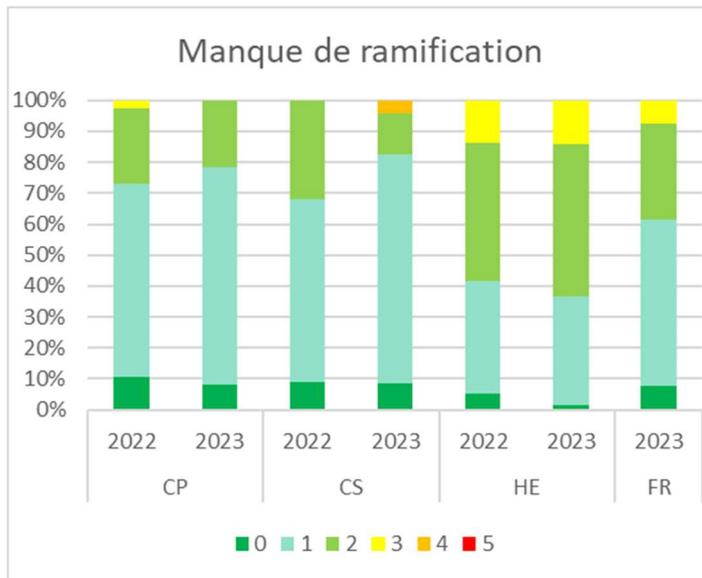
## 4.2. Evaluation « DEPERIS »

En 2023, plus de 90% des arbres se situent dans les classes 0 ou 1 pour le critère « mortalité de branches » (Figure 21). Seul 1 individu de chêne sessile (~ 5%) et un individu de hêtre (~ 1%) se situent en classe 2. Par rapport à 2022, il n’y a pas d’évolution claire ; nous avons observé moins d’arbres en classes 0, mais aucun arbre n’était en classe 2.



**Figure 21 : Répartition des arbres (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles ; HE : hêtres ; FR : frênes) selon les valeurs des critères « mortalité de branches »**

Concernant le « manque de ramification », nous observons en 2023 une dominance de la classe 1 pour les chênes et les frênes et des classes 1 et 2 pour les hêtres. Pour cette dernière essence, 15% des individus se situent dans la classe 3, mais aucun dans les classes 4 et 5. Nous observons par contre un chêne sessile (~5%) en classe 4. Par rapport à 2022, la situation s'est légèrement améliorée pour les chênes pédonculés et légèrement détériorée pour les hêtres (diminution des proportions des classes 0 et 1).

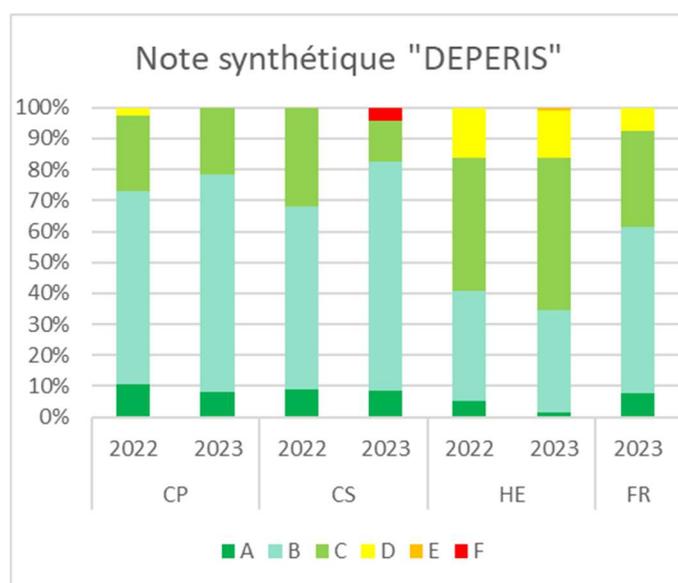


**Figure 22 : Répartition des arbres (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles ; HE : hêtres ; FR : frênes) selon les valeurs des critères « manque de ramification »**

En combinant ces 2 critères (Figure 8), nous obtenons une note synthétique pour chaque arbre. Les classes B et C sont les mieux représentées (Figure 23), avec une dominance de la classe B chez les chênes et les frênes, et un équilibre entre ces deux classes chez les hêtres. En 2023, la classe E comporte un individu de hêtre (~1%) et la classe F comporte un individu de chêne sessile (~5%). La somme des classes D, E et F représente 5% des chênes sessiles et 17% des hêtres. Le seuil de 20% fixé par les concepteurs de la méthode, n'est donc pas atteint. La hêtraie ne peut donc être qualifiée de dépérissante selon ce critère, même si nous n'en sommes pas loin. Cette observation relativement inquiétante doit toutefois être nuancée. D'une part, le paramètre le plus défavorable est le « manque de branches ». Or, le manque de branche est fortement influencé par des perturbations anciennes (branches mortes qui sont aujourd'hui disparues) et par la simplification liée à la production de fruits. D'autre part, seul 1 hêtre se situe en classe E et aucun en classe F. La dégradation des hêtres est relativement étendue, mais pas extrême.

Pour les frênes, 60% des arbres sont considérés comme « sains » (classes A ou B) et la proportion d'individus « dégradés » (classe D, E ou F) s'élève à 8%.

Par rapport à 2022, la situation s'est légèrement améliorée pour les chênes, si l'on exclut l'individu de chêne sessile qui s'est fortement dégradé. Pour les hêtres, la situation s'est légèrement détériorée : le pourcentage d'arbres dégradés (de classe D, E ou F) est identique, mais les classes A et B sont moins bien représentées, au profit de la classe C.



**Figure 23 : Répartition des arbres (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles ; HE : hêtres ; FR : frênes) selon la note synthétique DEPERIS (cf. Figure 8) [nb : un arbre est considéré comme « dégradé » s'il reçoit une note « D », « E » ou « F »]**

## 4.3. Caractérisation détaillée selon le protocole « ICP »

### 4.3.1. Introduction

A partir de 2022, cette évaluation est effectuée sur le sous-échantillon ICP (Tableau 2) par l'équipe UCLouvain. Auparavant, elle était réalisée par l'équipe Bruxelles Environnement sur l'ensemble des chênes chaque année, et sur une moitié des hêtres (en alternance). Il y a donc depuis le début du suivi des différences inter-annuelles au niveau de l'échantillon analysé. Pour les paramètres présentés dans cette section, les comparaisons interannuelles sont donc limitées à des représentations graphiques.

### 4.3.2. Fructification

L'abondance de la fructification des arbres considérée dans ce point se réfère à la fructification évaluée au sein du houppier observable et non à celle estimée pour l'ensemble du houppier. La fructification est contrôlée par de nombreux facteurs (photopériode, humidité, température, pollinisation, etc.).

Les données brutes, selon le protocole ICP sont des données catégorielles, que nous convertissons en une variable continue, appelée « indice de fructification ». A cet effet, nous avons associé, à chacune des classes d'intensité, une valeur sur une échelle de 0 à 1 (Tableau 8). Ces valeurs ont été définies via une conversion des codes ICP-forests en classes de pourcentages sur base de notre perception de terrain. Nous avons ensuite représenté graphiquement l'évolution de la moyenne annuelle de ce paramètre pour chaque essence (Figure 24).

Nous observons une évolution en dents de scie pour le hêtre depuis 2016 et pour les chênes depuis 2018. Toutefois, les valeurs atteintes en 2022 sont bien plus faibles qu'en 2018 et 2020. En 2023, la fructification est pratiquement absente pour le hêtre et absente pour les chênes.

**Tableau 8 : Table de correspondance entre les classes de fructification selon ICP-forests et l'indice de fructification intégré**

Code ICP	Description	Indice de fructification
1	absente/rare	0.05
2	visible	0.5
3	abondante	1

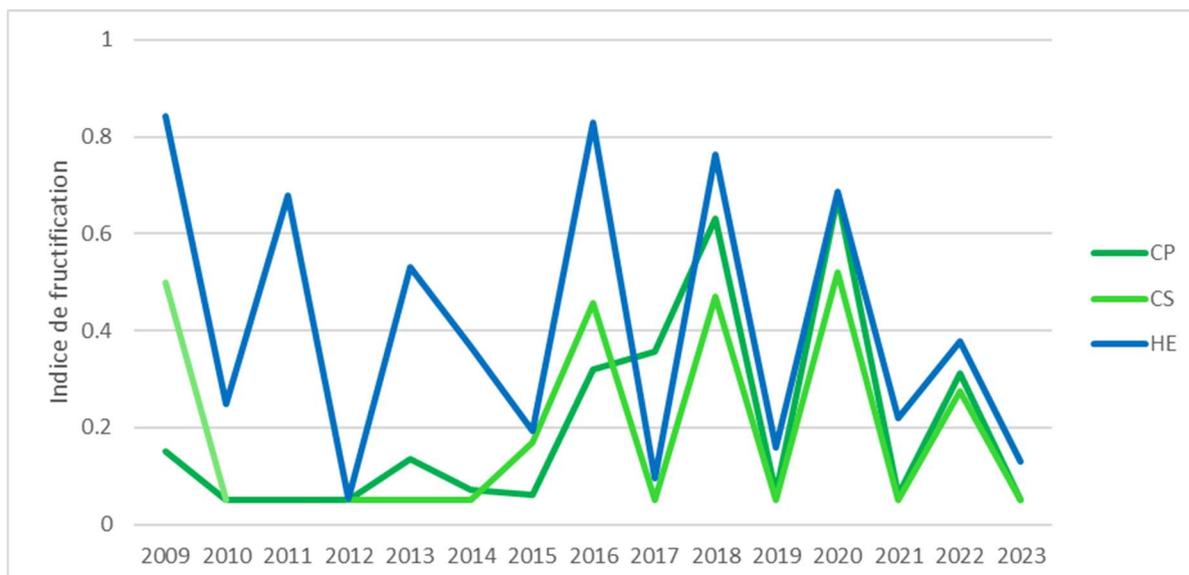


Figure 24 : Evolution des valeurs moyennes annuelles de l'indice de fructification (cf Tableau 8).

#### 4.3.2. Structure de la couronne

D'après le protocole standardisé, la structure de la couronne est définie comme l'architecture des organes aériens de l'arbre. Celle-ci varie en fonction du stade de développement atteint par l'arbre et des stress subis au cours du temps. Afin d'évaluer la vitalité du houppier des chênes, quatre formes de houppier ont été définies (voir Figure 25), sur base du développement des rameaux de la partie supérieure de la couronne et de la mortalité des branches fines.

Ce critère est lié aux deux critères « DEPERIS » (mortalité de branches et manque de ramification), mais n'est cependant équivalent à aucun d'entre eux, ni à la combinaison des deux. Contrairement au critère « manque de ramification » de la méthode DEPERIS, les « grosses » lacunes laissées par la disparition de branches moyennes ou grosses ne sont pas intégrées dans cette évaluation.

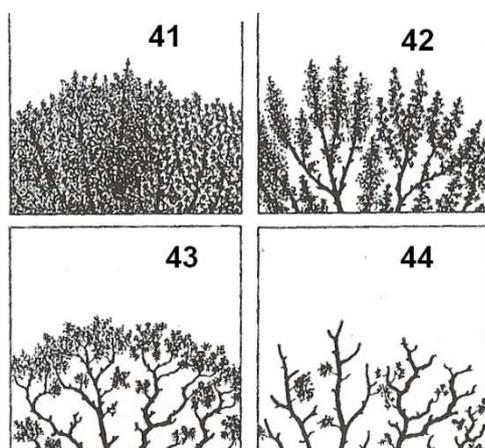


Figure 25 : Les quatre formes de houppier des chênes, avec leurs codes (Eichhorn et al., 2010)  
 41 : ramification dense ; 42 : simplification légère ; 43 : simplification importante ; 44 : déclin

En ce qui concerne le hêtre, la forme du houppier était notée selon ces 4 classes, de manière similaire à celle du chêne jusqu'en 2013. En 2013, cette classification a évolué en 8 classes conformément au protocole *ICP forests* afin d'analyser plus finement l'évolution de la ramification. Seule la partie sommitale du houppier doit être évaluée (rameaux apicaux). La Figure 26 illustre une fiche de terrain utile aux observateurs pour différencier les formes sur base de critères et de photos prises en Belgique.

## Architecture des rameaux apicaux

méthode: déterminer la forme **dominante** dans la **cime** sur base de 3 zones d'observation (« 11h », « 12h » et « 13h » sur horloge)

**Forme 1** : les pousses apicales et les bourgeons latéraux forment de longs rameaux en éventails



**Forme 2** : les rameaux latéraux se raccourcissent.



**Forme 3** : seules les pousses apicales forment de longs rameaux, les rameaux latéraux sont chétifs. Formation de baguettes, dagues



**Forme 4** : moindre croissance des rameaux latéraux dont la majorité n'est pas courbée en forme de « griffe ».



**Forme 5** : croissance unilatérale des rameaux sur la branche, les rameaux sont majoritairement courbés, « griffes »



**Forme 6** : présence de « griffes » et mortalité des rameaux apicaux et latéraux



**Forme 7** : mortalité



**Forme 8** : récupération (« gourmands »)



Figure 26: Fiche de terrain différenciant les 8 formes du houppier du hêtre

Nous observons une dégradation de la structure des chênes pédonculés de 2017 à 2021, suivie d'une nette amélioration de 2021 à 2022 et d'une légère dégradation en 2023 (Figure 27). La structure des chênes sessiles (Figure 28) s'est brusquement dégradée en 2018 et est restée stable jusque 2022. En 2023, nous observons pour la première fois depuis le début du suivi un arbre (~11% de l'échantillon) très fortement dégradé.

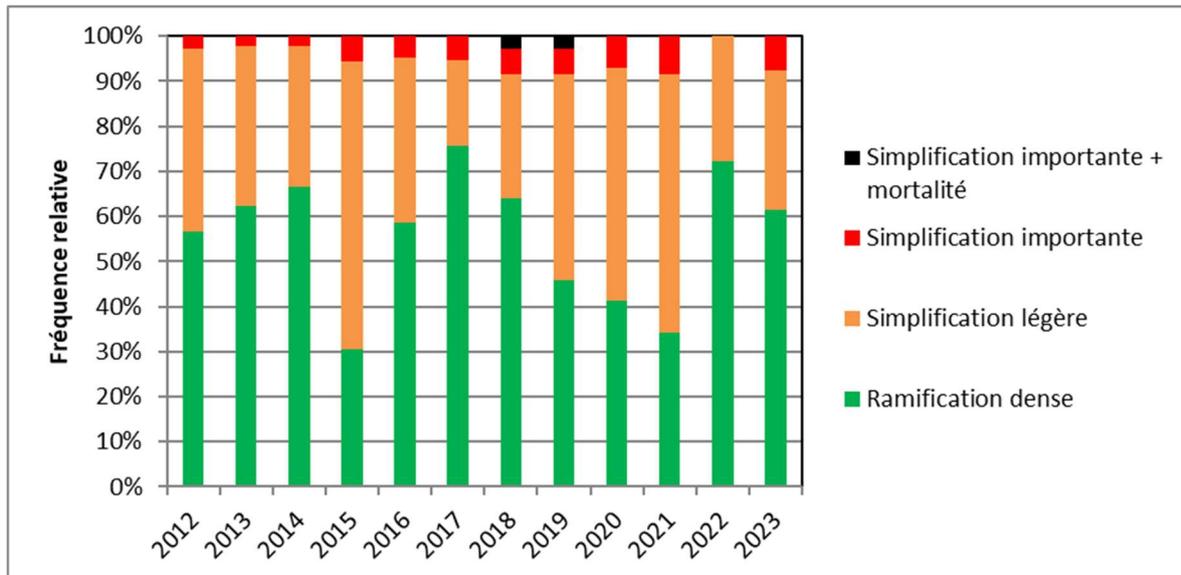


Figure 27 : Distribution des chênes pédonculés selon la structure de la couronne

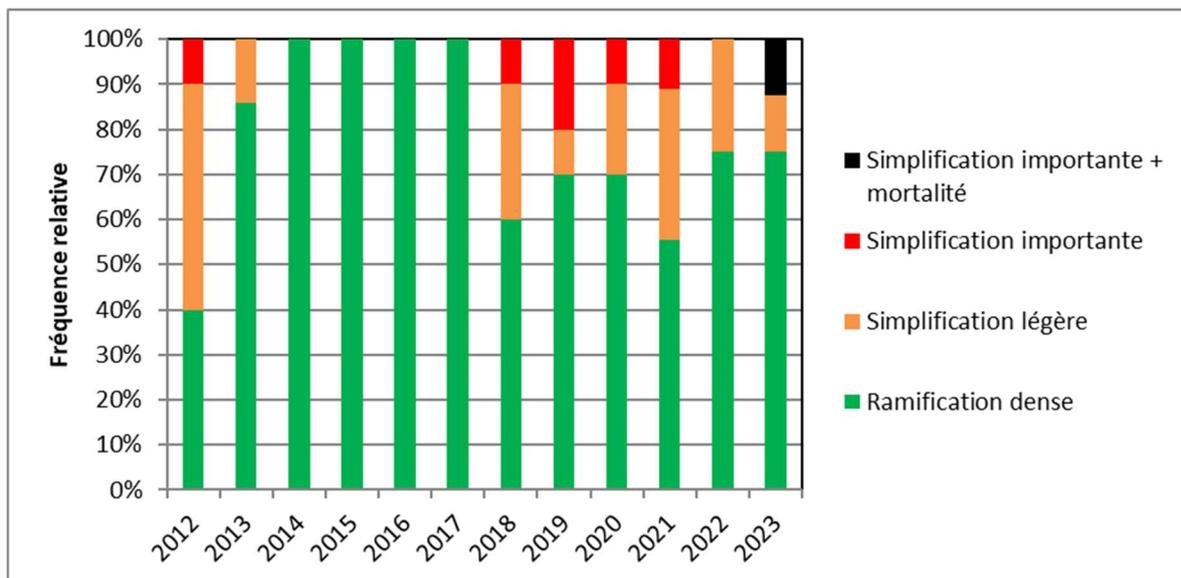


Figure 28 : Distribution des chênes sessiles selon la structure de la couronne

Suite à l'instauration de nouvelles classes pour le hêtre en 2013, les résultats antérieurs ne sont pas présentés. Les variations interannuelles peuvent être en partie expliquées par l'alternance bisannuelle des placettes visitées et par la sélection d'un sous-échantillon en 2022. Nous pouvons toutefois observer entre 2013 et 2020 une nette augmentation de la fréquence de la classe 4 (apparition de « griffes ») au détriment des classes 1 et 2 (ramification optimale ou sub-optimale) (Figure 29). Par contre, nous observons une nette augmentation de la fréquence cumulée des classes 1 à 3 entre 2020 et 2022. En 2023, la somme des fréquences des classes 1 à 3 a diminué par rapport à 2022, et la fréquence de la classe 6 a nettement augmenté.

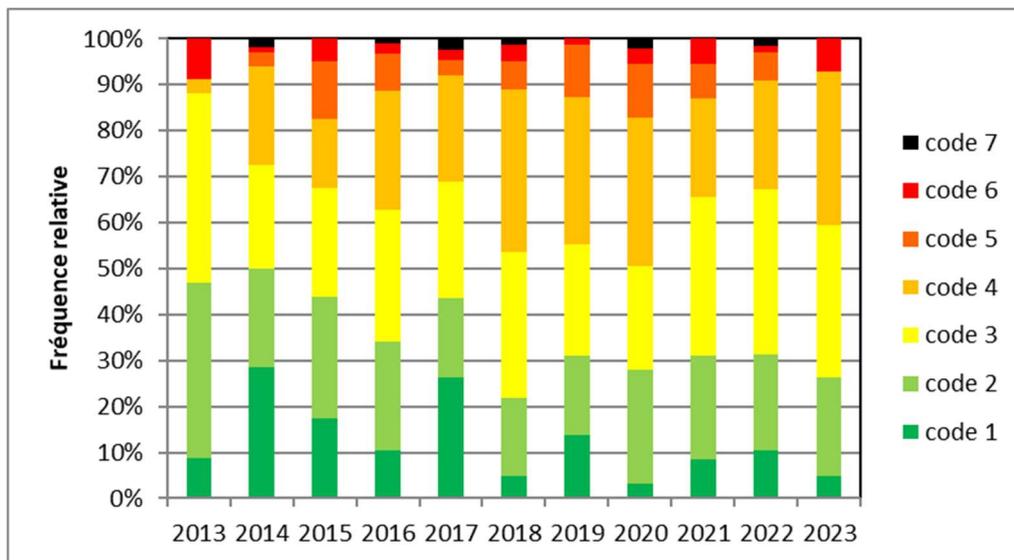


Figure 29 : Distribution des hêtres selon la structure de la couronne ; la signification des codes est donnée à la Figure 26.

### 4.3.6. Dommages

Les dommages sont recherchés pour chacun des arbres observés. Les différentes parties de l'arbre (feuilles, branches et tronc) sont diagnostiquées pour chacun des symptômes.

Pour le hêtre, le principal dommage observé est la mortalité de branches fines et de diamètre intermédiaire. Par rapport aux années précédentes, la proportion d'arbres présentant une mortalité de branches fines mortes était en forte augmentation en 2022, mais a diminué en 2023 (Figure 30). En ce qui concerne la mortalité de branches de diamètre moyen, la fréquence et l'intensité du dommage ont diminué entre 2021 et 2023. Une telle diminution peut s'expliquer par la chute des branches mortes des années précédentes, non compensée par la mortalité de nouvelles branches.

Chez les chênes pédonculés, aucun arbre ne présentait de feuilles dévorées en 2023, mais près de 15% des arbres présentaient des branches fines mortes (Figure 31).

Chez les chênes sessiles, la présence de feuilles dévorées (vraisemblablement par des chenilles) a été signalée pour 1 arbre (sur 9) en 2021 et en 2023.

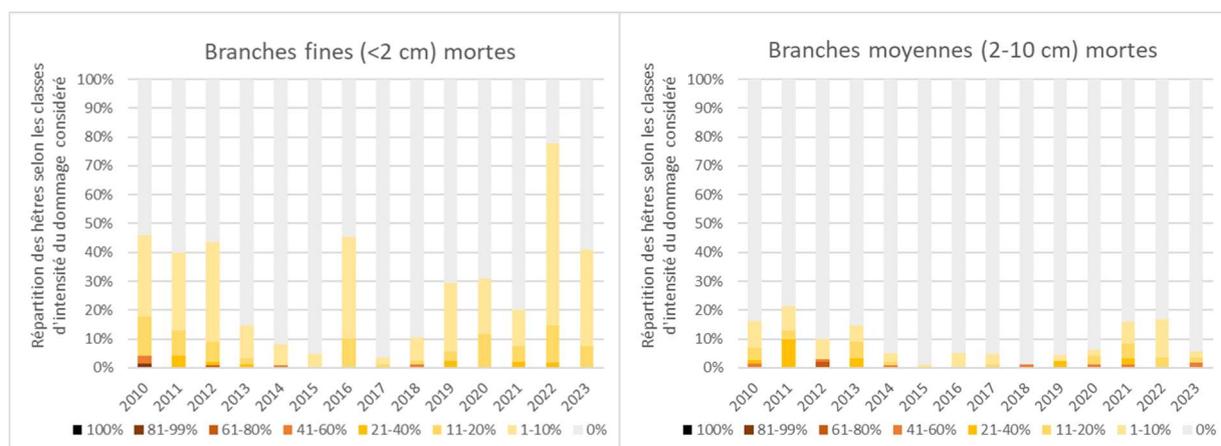
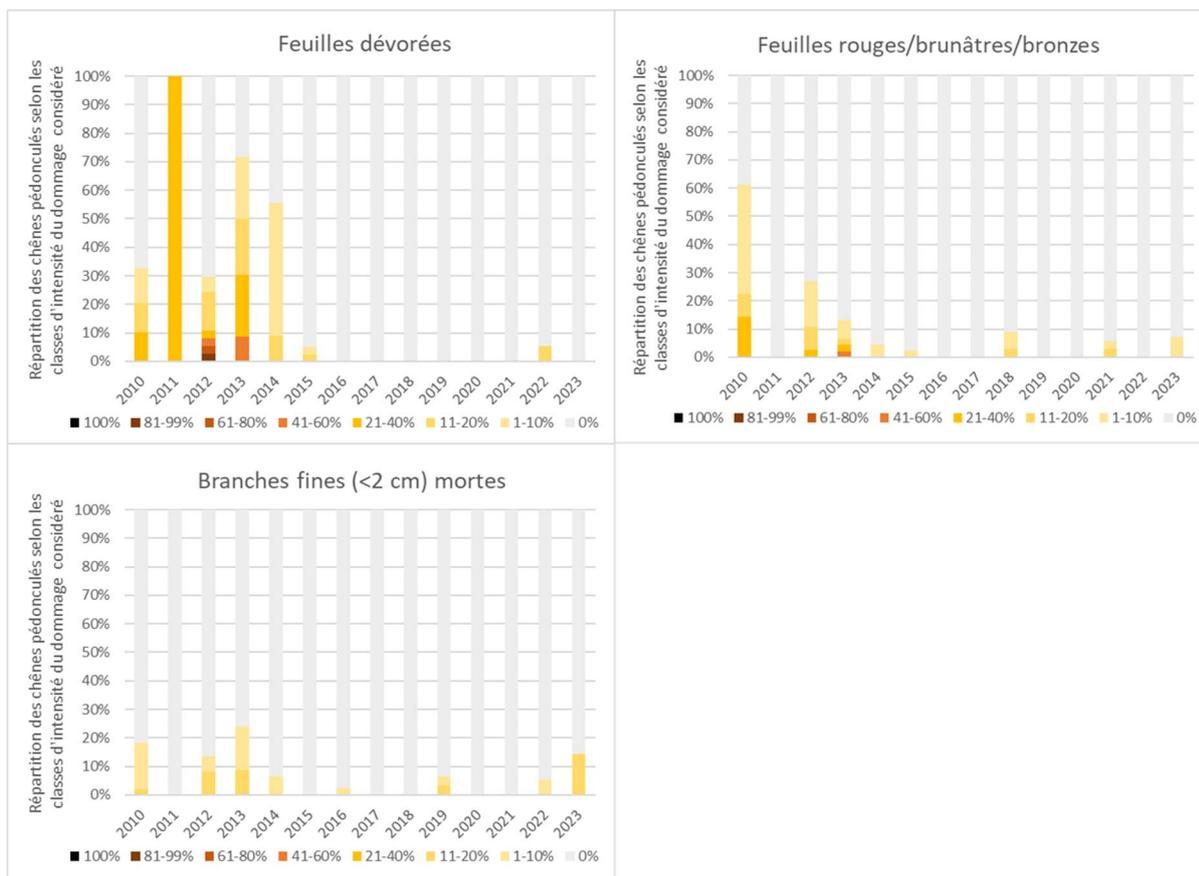
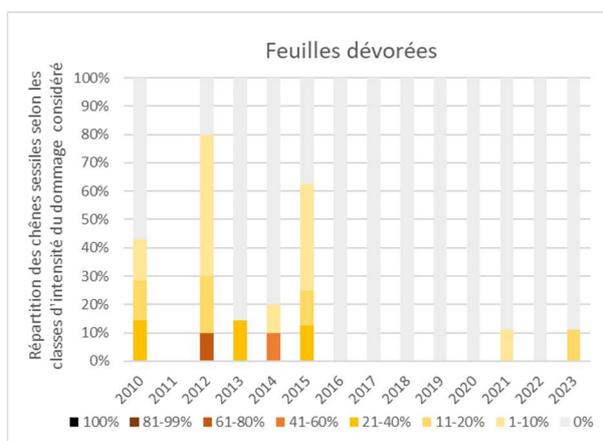


Figure 30 : Evolution des principaux dommages affectant les hêtres



**Figure 31 : Evolution des principaux dommages affectant les chênes pédonculés**



**Figure 32 : Evolution des principaux dommages affectant les chênes sessiles**

## 5. Suivi photographique des houppiers à partir du sol

La collecte de clichés se poursuit avec beaucoup de soin, pour la 8<sup>e</sup> année consécutive. L'observation visuelle de ces clichés permet de mieux comprendre les processus liant défoliation et dégradation de la structure via l'identification et le suivi individuel de chaque branche morte (Cf Rapport d'activité 2019).

En janvier 2022, un protocole d'analyse de ces images a été élaboré (Cf Rapport d'activité 2022 – partie 2). Il est basé sur le suivi pluriannuel de branches sélectionnées, et vise à quantifier la production et l'allongement des rameaux, au moyen d'un logiciel d'analyse d'image conçu pour étudier la croissance des racines (Figure 33).

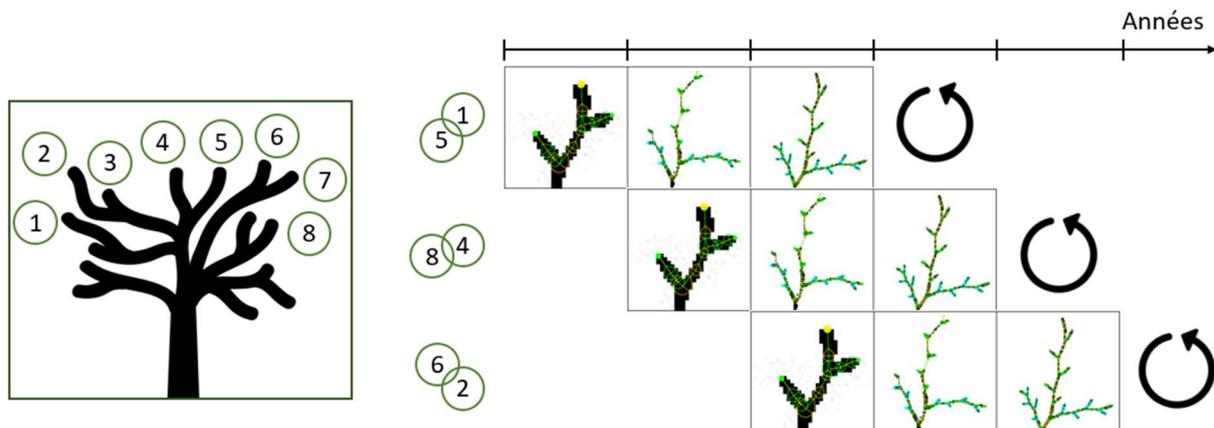


**Figure 33: Évolution du tracé, réalisé avec SmartRoot sous ImageJ, de la branche n°1 de l'arbre 3031\_6 entre 2015 (à gauche) et 2018 (à droite).**

Après analyse de l'évolution d'une sélection de branches, nous avons constaté qu'il est compliqué de suivre une branche durant plus de 3 années consécutives, car les ramifications s'entrecroisent et d'autres branches peuvent venir les masquer. Nous avons formulé une proposition de protocole pour le choix des branches et leur suivi :

Chaque année, et ce pour chaque arbre de l'échantillon, l'ensemble des apex bien visibles des cimes sont numérotés ; 2 d'entre eux sont ensuite tirés au sort aléatoirement afin d'effectuer leur suivi pour une durée de 3 ans ; si une branche est déjà en cours de suivi elle ne peut pas être à nouveau choisie avant la fin de cette période de 3 ans. Le suivi prend la forme d'une rotation sur une période plus courte assurant l'étude de 6 branches par arbre et par an, qui nous semble être un minimum pour bien illustrer la variabilité inter et intra-arbre, sur une période totale non définie (Figure 15). Il est également

envisageable de modifier le point de vue pour la prise des photos si la fenêtre de visibilité venait à se fermer à cause de la compétition et qu'une autre fenêtre s'avérait plus adaptée. Dans ce cas, il est nécessaire durant 2 années de prendre la photographie de l'ancien point de vue et du nouveau, afin de permettre une transition sans interrompre les suivis en cours.



**Figure 34 : Mise en place d'un roulement pour le suivi de la croissance et de la mortalité des jeunes branches chez le hêtre. Chaque année, pour chaque arbre, 2 apex bien visibles (et pas en cours de suivi) des cimes sont choisis aléatoirement et suivis pour une durée de 3 ans. Une fois cette période écoulée, le suivi recommence sur 2 apex (qui peuvent correspondre aux mêmes axes, mais dans ce cas il redémarre à l'extrémité). Chaque année, et ce à partir de la 3<sup>ème</sup> année à partir de la mise en place de cette méthode, le suivi concerne donc un total de 6 apex par arbre. En considérant l'ensemble des hêtres du suivi photographique, cela correspondrait au maximum au suivi de 87 branches simultanément.**

En parallèle, nous avons constaté sur le terrain qu'un certain nombre d'arbres, sélectionnés au départ pour la bonne visibilité de leur houppier, ne remplissent plus ce critère, en raison de la croissance des voisins ou du sous-étage.

Nous avons également mis en avant la nécessité d'ajuster le sous-échantillon photos afin d'assurer une meilleure représentativité de la distribution des circonférences et de la défoliation de l'échantillon global (surtout pour les chênes sessiles). Enfin, il était souhaitable de s'assurer que tous les arbres du suivi photos soient également inclus dans l'échantillon ICP.

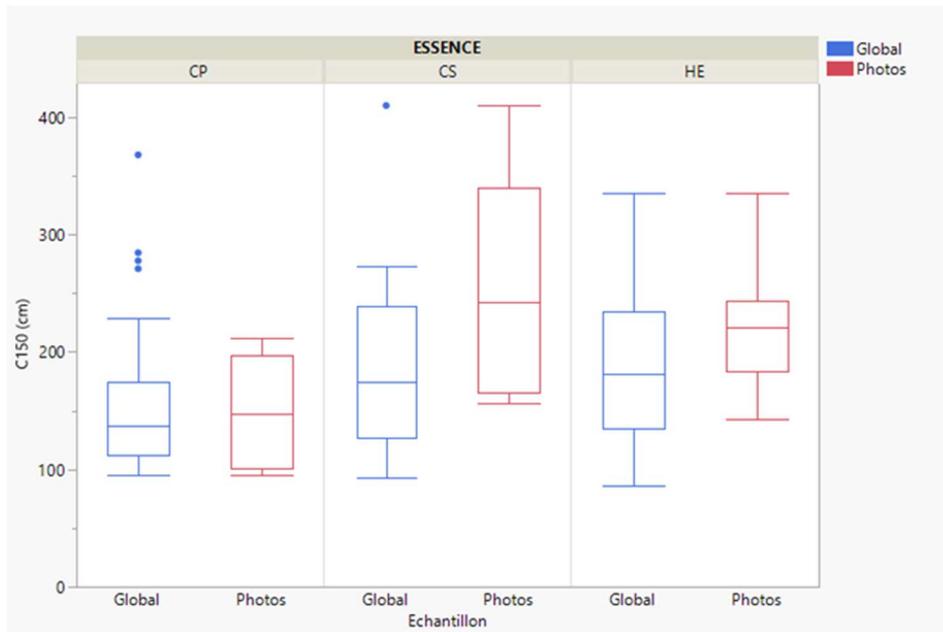
Nous avons donc effectué avant l'été 2023 une mise-à jour de la sélection d'arbres pour le suivi photos. Pour certains arbres, nous avons trouvé un nouveau point de prise de vue plus dégagé que le point initial. D'autres arbres ont été abandonnés car il n'était pas possible de trouver en point satisfaisant pour photographier leur cime. Ces derniers ont été remplacés par des nouveaux, choisis pour leur bonne visibilité et en fonction de leurs circonférence et défoliations, afin d'améliorer la correspondance des distributions avec l'échantillon complet. Afin que tous les arbres photographiés soient également inclus dans l'échantillon « ICP », les nouveaux arbres ont été sélectionnés en priorité

dans cet échantillon, mais ce dernier a également été enrichi de quelques arbres de l'échantillon « photos ». La comparaison des échantillons photos 2022 et 2023 est présentée au Tableau 9.

**Tableau 9 : Modifications de l'échantillon photo entre 2022 et 2023**

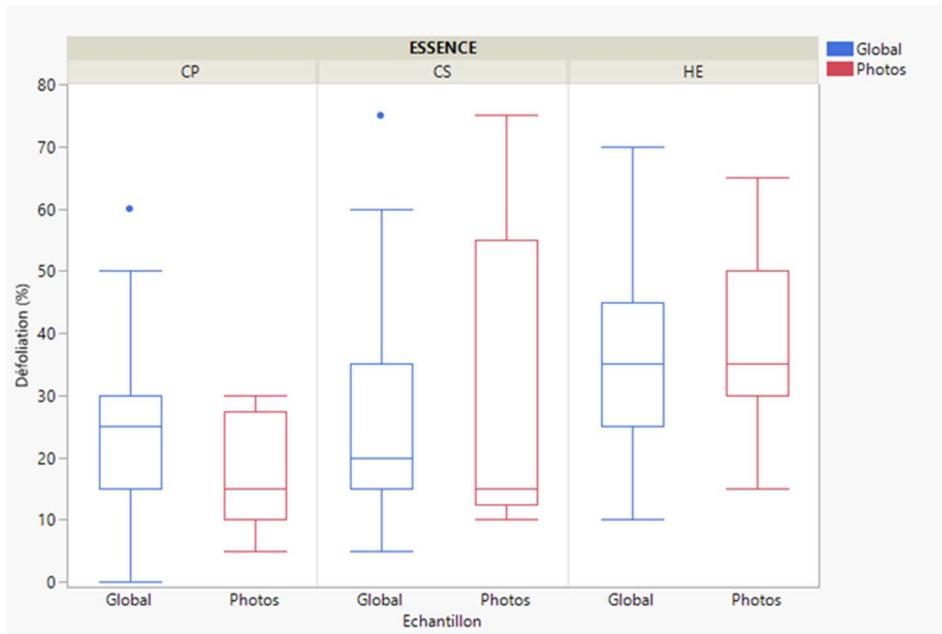
ID_UE	N_ARBRE	Essence	Sélection 2022	Sélection 2023	Remarque
2791	104	CP	O	N	Invisible
2877	1	He	N	O	Nouvel arbre
2877	5	He	O	O	
2877	7	He	O	O	
2877	9	He	O	O	Nouveau point de vue
2877	10	CP	O	O	
2879	1	He	O	N	
3031	2	He	O	O	
3031	4	He	O	O	
3031	5	He	O	O	
3031	6	He	O	O	
3031	9	He	O	N	Invisible
3197	5	Ch	O	N	Invisible
3345	2	He	O	O	
3345	4	He	O	O	
3349	2	He	O	O	
3349	3	He	O	O	
3989	2	He	O	O	
4145	1	He	O	O	
4145	8	He	O	O	
4147	18	He	O	N	Invisible
4147	19	CS	O	O	
4147	20	CS	O	O	
4147	22	CS	N	O	Nouvel arbre
4309	1	He	O	O	Nouveau point de vue
4309	2	He	O	O	
4309	3	He	O	O	
4309	4	He	O	O	
4309	5	He	O	O	
4449	11	CP	O	O	
4469	2	He	O	O	
4469	3	He	O	O	
4469	4	He	O	O	
4529	5	CP	O	O	
4529	105	CP	O	O	
4529	107	CP	O	O	Nouveau point de vue
4618	7	He	O	O	Nouveau point de vue
4618	11	He	O	O	
4778	4	He	N	O	Nouvel arbre
4778	5	He	N	O	Nouvel arbre
4778	6	He	N	O	Nouvel arbre
4778	8	He	N	O	Nouvel arbre
4778	15	He	O	N	Invisible
4781	102	CP	O	N	Invisible
5022	2	He	O	O	
5248	1	CS	N	O	Nouvel arbre
5248	3	CS	N	O	Nouvel arbre

Les distributions des circonférences de l'échantillon photos 2023 correspondent très bien à celles de l'échantillon complet pour les chênes pédonculés, mais les arbres de diamètres élevés sont sur-représentés pour les hêtres et surtout pour les chênes sessiles (Figure 35). Ce biais est lié au fait que le critère de sélection prioritaire était la visibilité, or la cime des arbres de faibles diamètres (généralement plus jeunes) est plus souvent masquée par leurs voisins.



**Figure 35 : Comparaison des distributions (box-plots représentant les percentiles 25, 50 et 75) des circonférences en 2023 entre l'échantillon complet et l'échantillon « photos » (CP : Chêne pédonculé ; CS : chêne sessile ; HE : hêtre)**

Pour la défoliation, une bonne correspondance des distributions (Figure 36) est observée pour les hêtres et les chênes sessiles, mais une sur-représentativité des faibles valeurs est notée pour les chênes pédonculés. Comme pour l'échantillon ICP, nous accordons moins d'importance à ce critère, car les distributions sont susceptibles d'évoluer au fil des ans.



**Figure 36 : Comparaison des distributions (box-plots représentant les percentiles 25, 50 et 75) des défoliations en 2023 entre l'échantillon complet et l'échantillon « photos » (CP : Chêne pédonculé ; CS : chêne sessile ; HE : hêtre)**

Etant donné que cette modification de l'échantillon a été effectuée après la prise de photos hivernale pour la campagne 2022, nous avons décidé de ne pas traiter ces dernières. Nous préférons mettre en place le nouveau protocole d'analyse des images sur les photos prises durant l'hiver 2023-2024, qui incluront tous les arbres du nouvel échantillon. L'analyse de ces images sera incluse dans le rapport de l'exercice 2024.

## 6. Discussion générale

La grande majorité des chênes présente une note DEPERIS « B », sur une échelle qui s'étend de A à F. Seul un individu de chêne sessile (soit 5 % de l'effectif) présente une note « F », qui correspond à l'état le plus dégradé. La situation sanitaire globale des chênes peut donc être qualifiée de « bonne » selon les critères DEPERIS, à une exception près. Par rapport à 2022, la situation des chênes en 2023 est légèrement meilleure.

Le diagnostic DEPERIS pour les hêtres est nettement moins favorable, car les individus dégradés (note « D » ou supérieure) représentent 17% de l'effectif, tandis que les arbres présentant un état sanitaire « bon » (C) ou « très bon » (B) représentent moins de 50% de l'effectif. Notons toutefois qu'aucun arbre n'a reçu la note « F » et qu'un seul a reçu la note « E », ce qui indique que les dégradations ne sont généralement pas « extrêmes ». Par rapport à 2022, la situation des hêtres s'est très légèrement détériorée, selon l'évaluation DEPERIS.

La comparaison avec les années précédentes peut également être effectuée sur base de l'évolution de la défoliation et des paramètres « ICP ». Les niveaux de défoliation des chênes oscillent depuis 2018, mais aucune augmentation significative n'est observée entre 2018 et 2023. Pour les hêtres, nous avons observé une augmentation significative de la défoliation (+ 6%) de 2021 à 2022, mais aucune évolution significative n'est notée entre 2022 et 2023. L'absence d'évolution entre ces deux années n'est pas forcément une bonne nouvelle, car cela signifie que les valeurs restent plus élevées que lors des années 2018 à 2021. Il pourrait s'agir d'une conséquence différée de la sécheresse de 2022. La diminution de l'occurrence de branches mortes entre 2022 et 2023 suggère tout de même que la situation ne continue pas à se détériorer. Les résultats 2024 nous indiqueront si les arbres ont été durablement affectés par les sécheresses à répétition, ou s'ils sont capables de restaurer une bonne densité de feuillage.

Pour les frênes, le suivi DEPERIS et la mesure de défoliation ont débuté cette année, ce qui ne permet pas la comparaison avec les années précédentes. En 2023, la situation est assez bonne selon les critères DEPERIS (plus de 60% des frênes sont très peu dégradés), mais la défoliation moyenne est relativement élevée (35%). Cette valeur élevée de défoliation est principalement liée à une dégradation de la structure, car les branches mortes sont peu abondantes.

## 7. Conclusions et perspectives

Les observations 2023 montrent que la situation sanitaire des chênes et des frênes est bonne à l'exception d'un individu de chêne sessile. Les hêtres ont par contre subi une importante dégradation entre 2021 et 2022, qui pourrait être la conséquence des sécheresses à répétitions depuis 2018. En 2023, la défoliation est restée au même niveau, mais une plus faible occurrence de branches mortes a été observée, ce qui suggère un début de récupération.

La poursuite du monitoring permettra de mieux comprendre les effets des épisodes climatiques extrêmes sur l'état sanitaire des hêtres et d'identifier la cause des fluctuations chez les chênes. Les liens avec la croissance, la fructification et les possibles stress liés aux passages en coupes devront également être investigués.