



# Suivi de l'état sanitaire des arbres en forêt de Soignes bruxelloise 2022

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

Hugues Titeux  
Frédéric Hardy  
Quentin Ponette

*Décembre 2022*

## Convention UCLouvain – Bruxelles Environnement 2022

**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.

La campagne d'observation 2022 a été effectuée 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.

Les observations 2022 montrent que la situation sanitaire des chênes est bonne et s'améliore après quelques années moins favorables. Les hêtres ont par contre 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 2018 et/ou 2022. Par contre, l'architecture des branches vivantes s'est améliorée cette année, ce qui est plutôt rassurant pour la suite.

**Date de fin** : Décembre 2022.

# Table des matières

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 .....	19
3.3. Description de l'échantillon 2022 .....	22
3.4. Encodage et traitement des données.....	25
3.5. Contrôle-qualité.....	25
4. Résultats .....	28
4.1. Evaluation de la défoliation .....	28
4.2. Evaluation « DEPERIS » .....	37
4.3. Caractérisation détaillée selon le protocole « ICP ».....	39
4.4. Relations entre les variables.....	50
5. Suivi photographique des houppiers à partir du sol .....	54
6. Discussion générale .....	55
7. Conclusions et perspectives .....	56
ANNEXE 1 : Liste des arbres du suivi photographique.....	57

# 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. De plus, un sous-échantillon d'arbres 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.

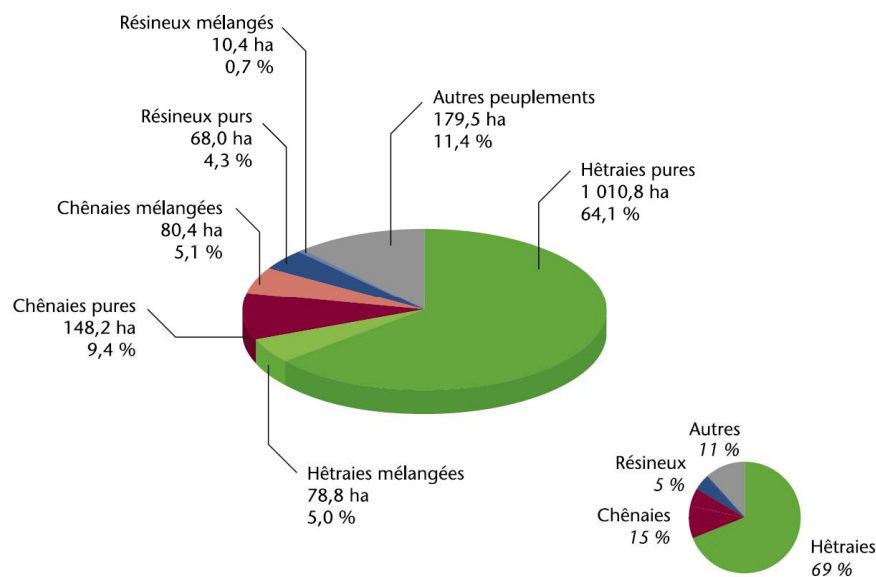
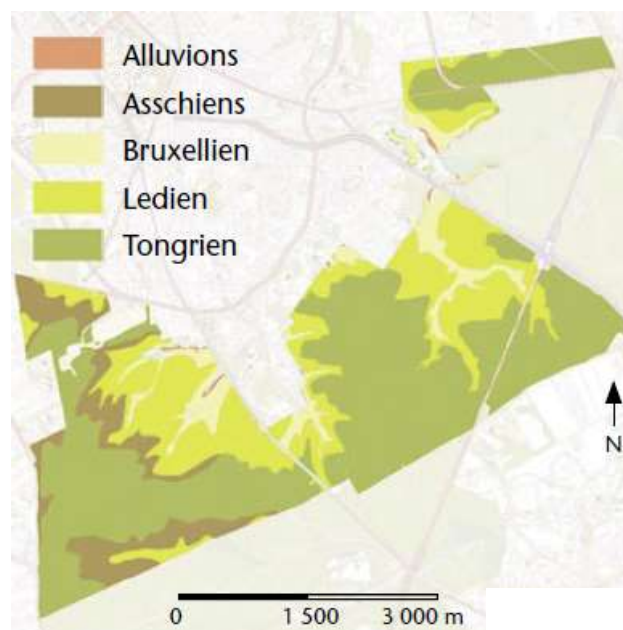


Figure 1: Proportion des types de peuplements en forêt de Soignes bruxelloise (Braem *et al.*, 2010)

## 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

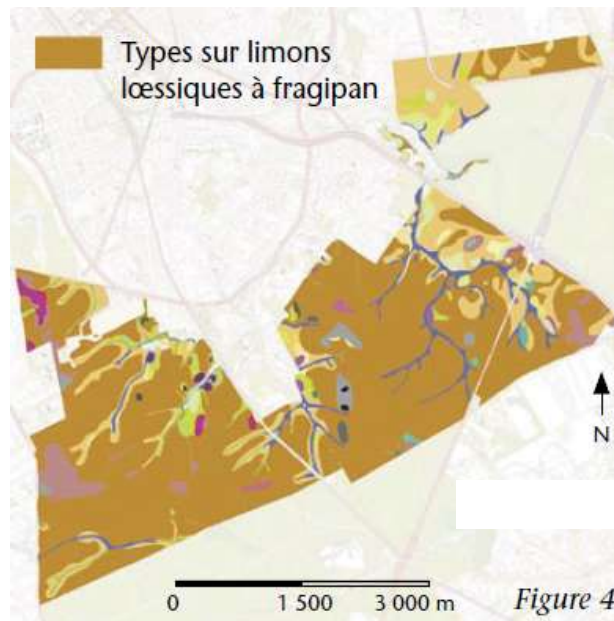


**Figure 2: Roche-mère géologique présente sous le limon éolien. Les teintes jaunes présentent les assises à dominance sableuse (source: carte géologique de la Belgique, numérisation: BE-IBGE)**

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).



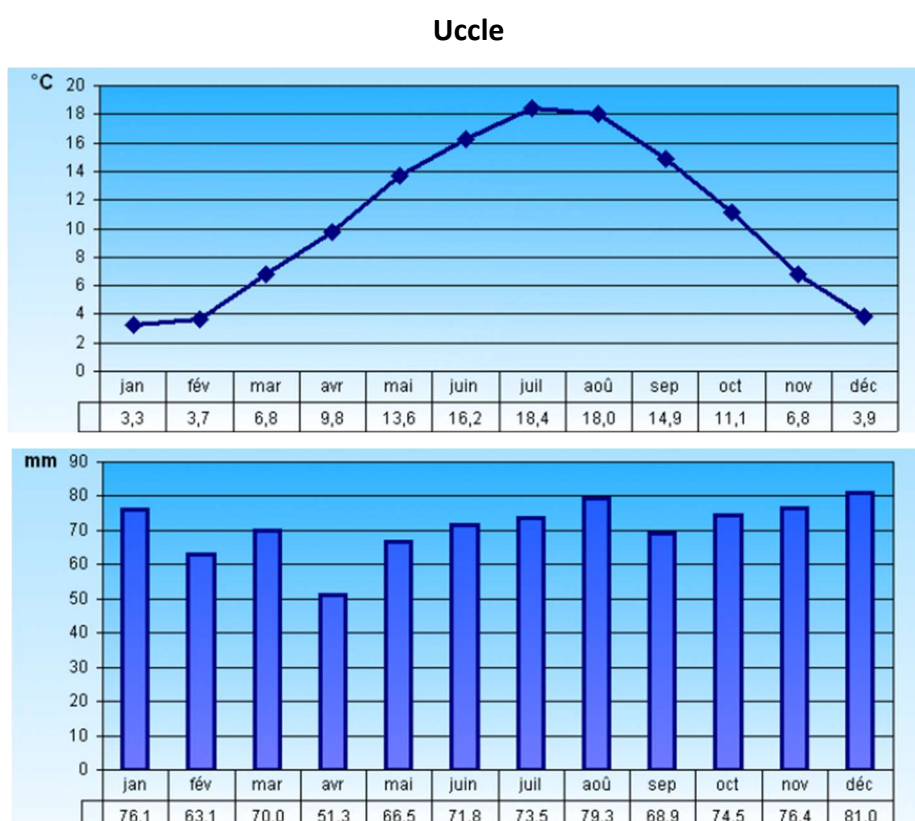
Par ailleurs, la fertilité chimique du sol est très faible en surface (pH H<sub>2</sub>O de l'ordre de 3,5 à 4,5) et plus élevée entre 2 et 4 mètres de profondeur (pH H<sub>2</sub>O de l'ordre de 5 à 7). Sur toute la surface de la forêt, à des profondeurs variables selon les endroits (de 40 à 120 cm 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.



**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**

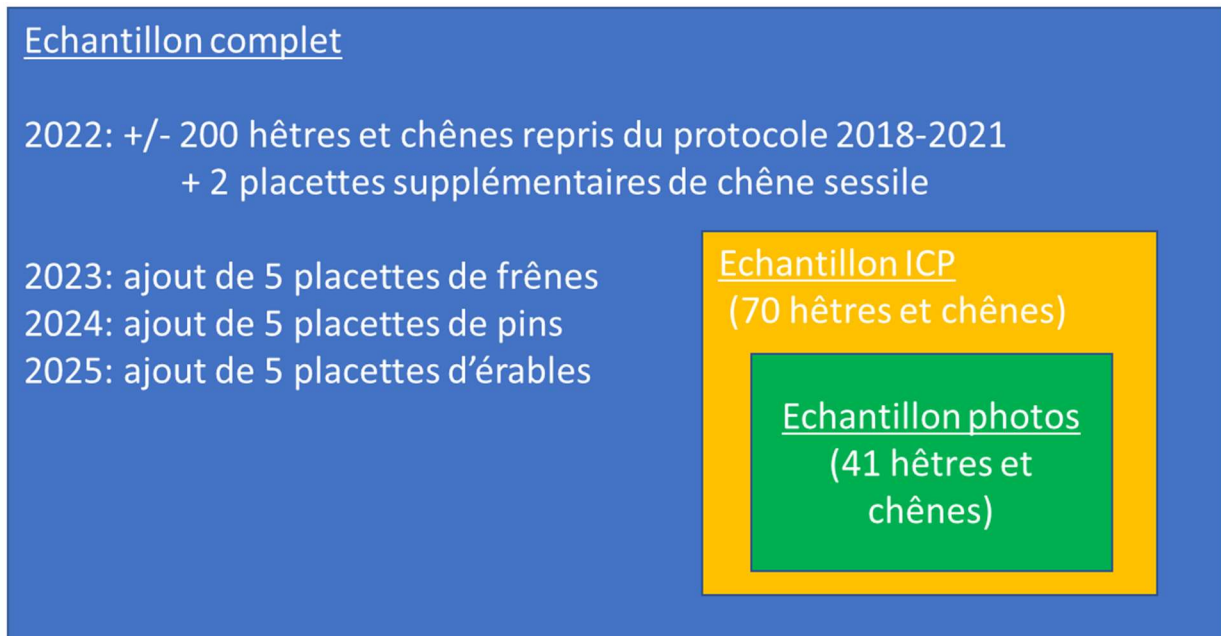
L'alternance bisannuelle des observations en hêtraie permet de disposer d'un échantillon largement représentatif des situations (sol, âge, ...), tout en limitant le travail de terrain. Toutefois, cette alternance engendre des difficultés pour les analyses statistiques et l'interprétation du suivi photographique.

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 (Figure 5)



**Figure 5 : Représentation schématique des différents échantillons sélectionnés**

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** » (Tableau 3). Cet échantillon a été complété en 2022 par l'ajout de 3 placettes de chênes sessiles et d'autres essences seront ajoutées au fil des prochaines années (cf § 3.1.4).

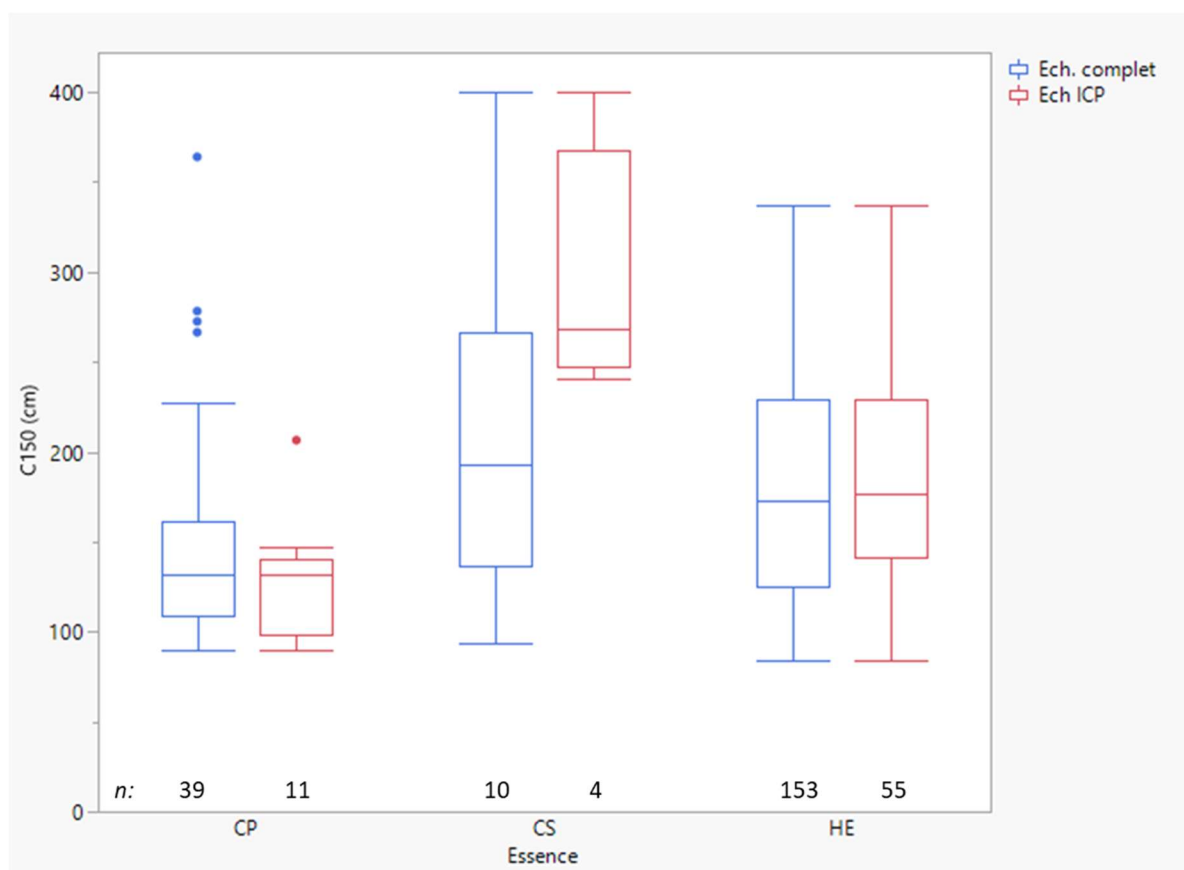
**Tableau 3 : Placettes sélectionnées et nombre d'arbres par placette, pour les différents échantillons (Ech ICP : sous-échantillon sur lequel le protocole ICP est appliqué ; Ech. Photos : sous-échantillon sur lequel est effectué le suivi photographique)**

Placette	Nombre d'arbres								
	Ech. complet			Ech. ICP			Ech. Photos		
	HE	CP	CS	HE	CP	CS	HE	CP	CS
2791	6	4	6						1
2877	8	1		3	1		3	1	
2879	1						1		
3031	7			5			5		
3033	6	1	4						
3197	7	3						1	
3345	8			4			2		
3349	4			3			2		
3595	1	3							
3668	5	1							
3831	5								
3989	5			2			1		
4145	7			3			2		
4147	9		3	5		3	1		2
4309	5			5			5		
4449		12						1	
4458	4								
4467	5								
4469	4			3			3		
4529		10	1		10	1		3	
4541	9	1							
4618	11			10			2		
4778	12			12			3		
4781		3						1	
4783	4								
4785	5								
4928	12								
5022	3						1		
5248			4						
5328			4						
Totaux	153	39	22	55	11	4	31	7	3
	214			70			41		

Un sous-échantillon, appelé « **échantillon ICP** », reprend 70 arbres (uniquement hêtres et chênes) répartis sur une douzaine de placettes (Tableau 3). Il a été sélectionné de façon à inclure la plupart des arbres du **suivi photo** (cf Annexe 1) et être le plus représentatif possible de l'échantillon complet en termes de distribution des circonférences et des défoliations.

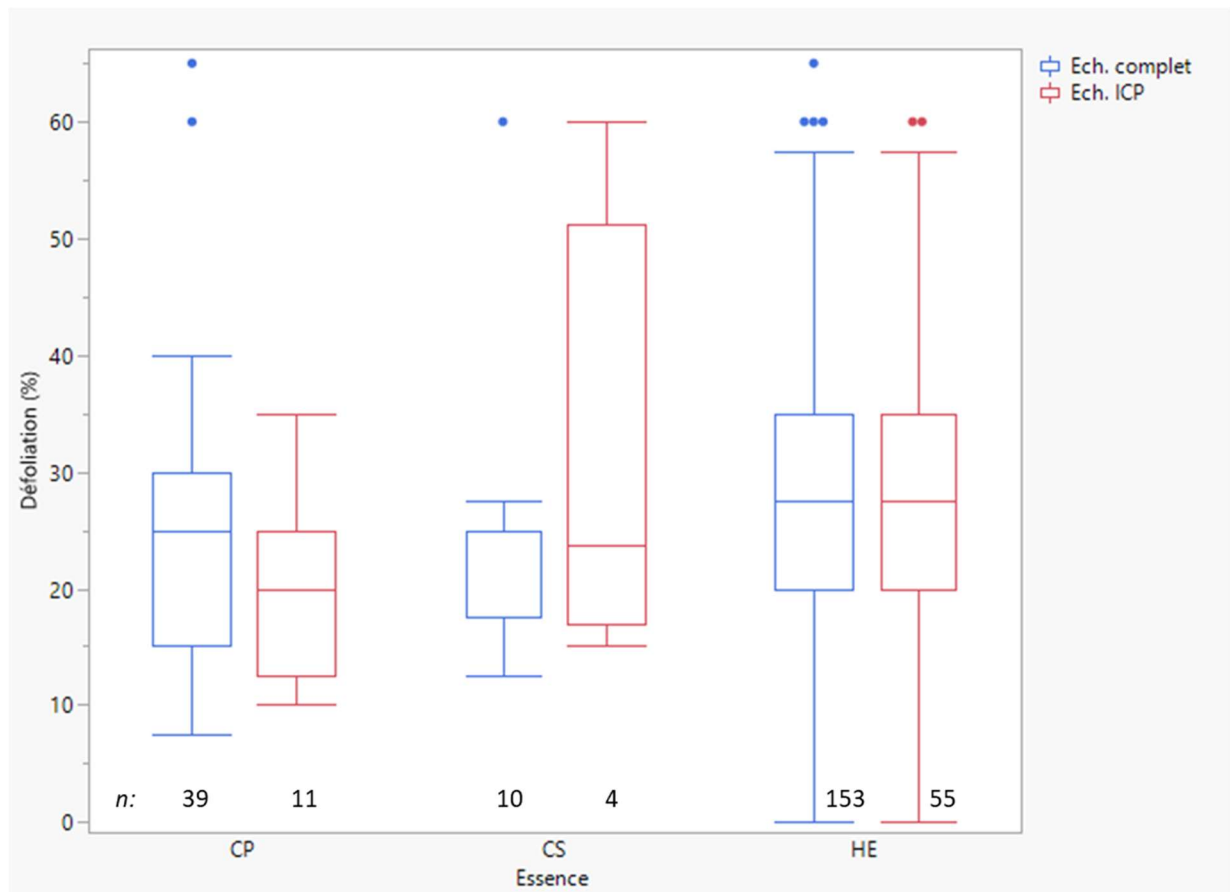
Au niveau des circonférences (Figure 6), les distributions du sous-échantillon « ICP » sont très similaires à celles de l'échantillon complet pour le hêtre, similaires pour le chêne pédonculé et très différentes pour le chêne sessile. Les défoliations (Figure 7) présentent quant-à-elles des distributions pratiquement identiques pour le hêtre, légèrement différentes pour le chêne pédonculé et très différentes pour le chêne sessile. Les différences pour les chênes, et plus particulièrement pour le chêne sessile, s'expliquent par le faible nombre de chênes sur les placettes du suivi photographiques (ciblées lors de cette sélection). Ces biais seront corrigés l'année prochaine, par l'ajout dans l'échantillon ICP de chênes se trouvant sur des placettes non incluses (actuellement) dans le suivi photos, en particulier les nouvelles placettes de chênes sessiles sélectionnées cet été (cf ci-dessous). Etant donné que ces comparaisons ont été effectuées avant l'été 2022, elles sont basées sur les données 2020-2021. Les chênes sessiles supplémentaires sélectionnés en 2022 ne sont donc pas encore intégrés dans l'échantillon complet à ce stade.

Par ailleurs, le critère d'inclusion de l'échantillon « photo » dans l'échantillon « ICP » n'est pas parfaitement rempli. Certaines placettes du suivi photos ont été exclues de la sélection ICP lorsque le seul arbre photographié est actuellement peu visible. Il est probable que ces arbres soient exclus de l'échantillon « photos » lors d'une prochaine révision, ce qui permettra d'inclure la totalité de l'échantillon « photo » dans l'échantillon « ICP ».



**Figure 6 : Comparaison des distributions (box-plots représentant les percentiles 25, 50 et 75) des circonférences (valeurs de 2020 ou 2021 pour les placettes précédemment visitées un sur deux ; moyenne des valeurs 2020 et 2021 pour les placettes précédemment visitées chaque année) entre l'échantillon complet et l'échantillon ICP (CP : Chêne pédonculé ; CS : chêne sessile ; HE : hêtre) [nb : étant donné que ces évaluations sont basées sur les données 2020-2021, les chênes sessiles supplémentaires sélectionnés en 2022 ne sont pas intégrés dans ce graphe]**





**Figure 7 : Comparaison des distributions (box-plots représentant les percentiles 25, 50 et 75) des valeurs de défoliation (valeurs de 2020 ou 2021 pour les placettes précédemment visitées un an sur deux ; moyenne des valeurs 2020 et 2021 pour les placettes précédemment visitées chaque année) entre l'échantillon complet et l'échantillon ICP (CP : Chêne pédonculé ; CS : chêne sessile ; HE : hêtre) [nb : étant donné que ces évaluations sont basées sur les données 2020-2021, les chênes sessiles supplémentaires sélectionnés en 2022 ne sont pas intégrés dans ce graphe]**

#### **3.1.4. Consolidation et diversification**

La convention 2022-2025 prévoit en outre un enrichissement progressif de l'échantillon. En 2022, il était prévu d'ajouter une dizaine de chênes sessiles afin de palier au faible nombre d'individus actuellement suivis. Ensuite, de nouvelles essences seront ajoutées : 5 placettes de frêne en 2023, 5 placettes de pin en 2024 et 5 placettes d'érable en 2024.

La sélection de nouveaux chênes sessiles a été effectuée en 2 étapes. Au départ, nous avons sélectionné, sur base des données de l'inventaires ; nous avons ciblé les chênaies de plus de 60 ans dans lesquelles la présence de minimum 4 chênes sessiles était mentionnée et les agents sont allés vérifier sur place. Malheureusement seules 2 d'entre elles (5248 et 5328) comportaient effectivement plusieurs chênes sessiles. De plus, elles ne comptent, ensemble, qu'un total de 5 individus dans le rayon de 30m. Nous avons dès lors décidé d'élargir le rayon de sélection à 50m, ce qui a permis de sélectionner 8 individus sur ces 2 placettes, et 4 individus supplémentaires sur la placette 3033 (déjà dans l'échantillon).

## 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 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 les 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 2) et de photographies fournies dans les fiches de référence (Figure 8).

---

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

Tableau 2 : 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

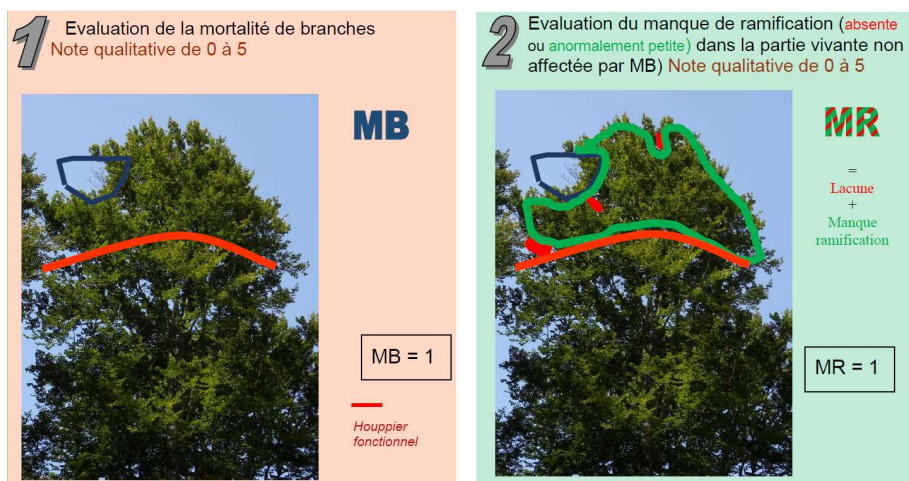


Figure 8 : Illustration des critères « mortalité de branches » (MB) et « manque de ramification » (MR) (source : Département santé des forêts / ministère de l'agriculture français)

Ces deux critères seront analysés séparément et seront également combinés en une note synthétique, comme le prévoit le protocole « DEPERIS » (Figure 9). Un arbre est qualifié de « dégradés » 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	1	2	3	4	5
	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 9 : Abaque pour l'obtention d'un note synthétique « DEPERIS » à partir des critères « mortalité de branches » et « manque de ramification » (source : Département santé des forêts / ministère de l'agriculture français)

### 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 continuera à être appliqué, mais uniquement sur le sous-échantillon ICP-forests. Cette évaluation, effectuée par le spécialiste de l'équipe « UCLouvain », permettra 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 constitué de 31 hêtres et 10 chênes (cf Annexe 1).

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.
- Le houppier observé par le dessous : deux prises de vue verticales à proximité du tronc sont effectuées pour chaque arbre, l'une (« V1 ») du côté du point correspondant aux prises de vue « H » et « C », l'autre (« V2 ») du côté opposé. La distance par rapport au tronc est dépendante de la forme du houppier et de la présence de branches basses. Elle est généralement comprise entre 2 m et 4 m.

Les prises de vue « H » et « C » sont effectuées chaque année, en été et en hiver.

Les prises de vue « V1 » et « V2 » sont effectuées en hiver, tous les 3 ans à partir de l'hiver 2015-2016, ainsi que l'année qui suit une éclaircie.

Actuellement, une petite dizaine d'arbres ne peuvent plus être photographiés car ils sont tombés ou sont désormais invisibles en raison de la croissance d'arbres voisins ou du sous-étage. Il est prévu de procéder à une mise à jour de cet échantillon avant la campagne 2023.

### 3.3. Description de l'échantillon 2022

#### 3.3.1. Effectifs

L'échantillon observé en 2022 (Tableau 1) est composé de 153 hêtres, 39 chênes pédonculés et 22 chênes sessiles. Parmi ceux-ci, 70 arbres (55 hêtres, 11 chênes pédonculés et 4 chênes sessiles), constituent le sous-échantillon « ICP », et 41 ont été photographiés. Par rapport aux années précédentes (Tableau 4), le nombre total d'arbres observés a augmenté en 2022, mais le nombre d'arbres évalués selon le protocole ICP a été réduit. Il est toutefois important de noter que ces effectifs incluent les arbres qui reçoivent une évaluation et les arbres qui ne sont pas évalués en raison d'un manque de visibilité (cf §3.3.4). Ces deniers 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 3 : Effectifs des différents échantillons en 2022.**

Echantillon 2022	Type de suivi	Hêtres	Chênes pédonculés	Chênes sessiles	Total
Complet	Protocole rapide	153	39	22	214
ICP	Protocole ICP	55	11	4	70
Suivi photo	Suivi photo	31	7	3	41

**Tableau 4 : 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
Protocole rapide	Chêne pédonculé														39
	Chêne sessile														22
	Hêtre														153
	<b>TOTAL</b>														<b>214</b>
Protocole ICP	Chêne pédonculé	9	46	1	37	47	45	45	45	43	40	42	39	37	<b>11</b>
	Chêne sessile	1	7		10	7	10	8	10	7	10	9	10	9	<b>4</b>
	Hêtre	119	94	70	112	102	124	106	119	106	110	104	116	104	<b>55</b>
	<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>
Suivi photos	Chêne pédonculé							4	7	7	7	7	7	7	7
	Chêne sessile							2	3	3	3	3	3	3	3
	Hêtre							15	30	30	30	30	30	30	30
	<b>TOTAL</b>							<b>21</b>	<b>42</b>	<b>42</b>	<b>42</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>41</b>

### 3.3.2. Distribution en classes de circonférence

Suite à une mauvaise communication, la circonférence n'a été mesurée que sur une partie de l'échantillon. Nous ne présentons donc pas les distributions actualisées. Néanmoins, les distributions basées sur les observations des années 2020 et 2021 sont visibles sur la Figure 6. Entretemps, les circonférences elles-mêmes ont certainement très peu évolué, mais les distributions ont pu être modifiées, en raison de la disparition de certains arbres (chutes ou exploitation) ou de leur changement de statut social (les arbres dominés étant exclus de l'échantillon). Le protocole de prise de mesure des circonférences sera ré-évalué et rediscuté avant la prochaine saison d'observation 2023.

### 3.3.3. Statut social

La grande majorité des arbres de l'échantillon complet ont le statut « co-dominant ». Nous observons par ailleurs une sur-représentation des arbres dominants dans les échantillons « ICP » et « Photos ». Ceci devra être corrigé lors de la consolidation de ces échantillons avant l'été 2023.

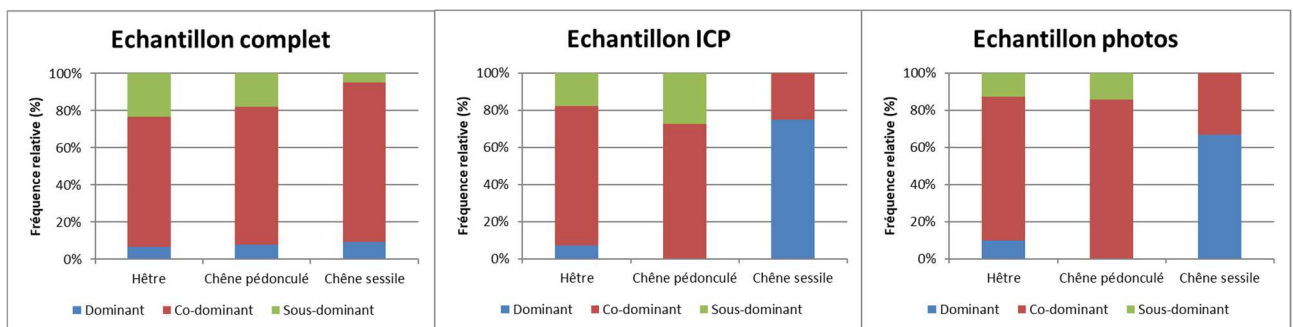


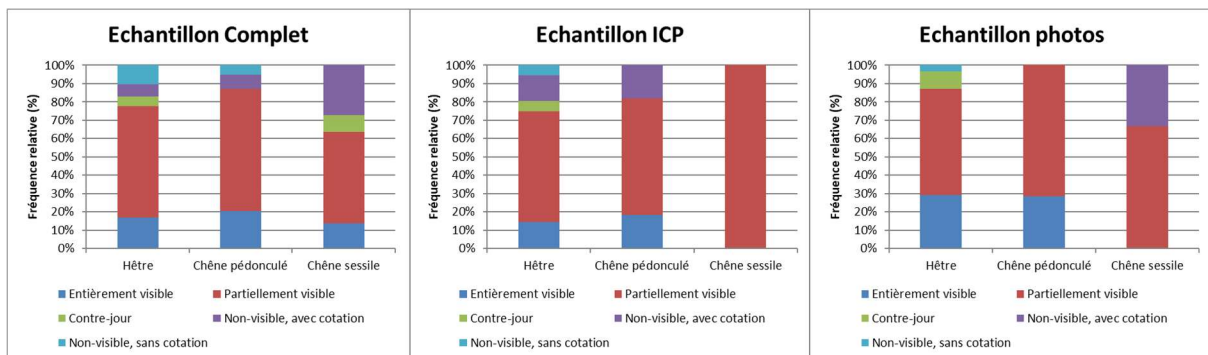
Figure 10 : Répartition des arbres selon leur statut social pour les différents échantillons considérés

### 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 pour les différents échantillons considérés**

Nous pouvons noter que les arbres bien visibles représentent moins de 20% des individus de hêtres et chênes pédonculés, et à peine 10% des chênes sessiles (Figure 11). A l’opposé, les arbres non visibles représentent 20% des hêtres et près de 30 40% des chênes sessiles de l’échantillon complet. Parmi les individus non visibles, la moitié des hêtres et chênes pédonculés ne reçoivent pas de cotation. Au niveau de l’échantillon ICP, les proportions d’arbres non visibles sont similaires à celles de l’échantillon complet pour les hêtres et les chênes pédonculés, mais une plus grande proportion reçoit une cotation (observateur différent). Pour les chênes sessiles, la répartition est très différente, selon l’échantillon considéré, mais le nombre d’individu est extrêmement faible pour les échantillons « ICP » (4) et « photos » (3). Au niveau de l’échantillon « photos », la visibilité est généralement meilleure que pour les autres échantillons, ce qui est logique car la visibilité était un critère de sélection de cet échantillon en 2015-2016. Depuis lors, les conditions ont évolué et un certain nombre d’individus sont désormais très peu visibles depuis le point d’observation défini initialement, ce qui rend impossible la poursuite de leur suivi photo. Une série de nouveaux arbres (ou de nouveaux points de vue) seront sélectionnés avant l’été 2023, en privilégiant les arbres bien visibles, tout en veillant à obtenir des distributions de circonférences et des défoliations les plus proches possible de celles des autres échantillons. Suite à l’exclusion de certains arbres en raison de leur très mauvaise visibilité, les analyses statistiques pour l’échantillon complet portent en 2022 sur **137** hêtres, **37** chênes pédonculés et **22** chênes sessiles.



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

L'ensemble des données recueillies durant la campagne 2022 ont été encodées dans la base de données MS Access. Les traitements statistiques ont été effectués via l'interface *JMP pro 16.2*, 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 les placettes reprises pour le sous-échantillon ICP, et concernent l'ensemble des paramètres évalués par les agents : « défoliation », « mortalité de branches » et « manque de ramification ». L'échantillon « contrôle » comporte un total de 79 arbres (59 hêtres, 17 chênes pédonculés et 3 chênes sessiles), soit respectivement 43%, 47% et 22% des effectifs retenus pour le diagnostic sanitaire (voir Tableau 1). Notons que cet échantillon ne correspond pas exactement à l'échantillon ICP, car il inclut l'ensemble des arbres situés sur ces placettes (alors que l'échantillon ICP représente une sélection), moins ceux qui n'ont pas reçu de cotation de la part d'une des deux équipes, pour cause de mauvaise visibilité ou

d'oubli (sur le terrain ou sur la liste des arbres à observer). Pour les chênes sessiles, l'effectif, même s'il représente 22% des arbres observés, est largement insuffisant pour effectuer des calculs statistiques valables.

### 3.5.2. Défoliation

La proportion de cote de défoliation ne variant pas de plus de 10% près entre les deux équipes atteint 90% pour les hêtres, 82% pour les chênes pédonculés et 33% pour le chêne sessile. Le critère de qualité est donc largement atteint pour le hêtre, satisfaisant pour le chêne pédonculé, mais insuffisant pour le chêne sessile.

**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>	59	43	40.4	36.9	-3.5	Prob.> Itl = 0.0008 (***)
<b>Chênes pédonculés</b>	17	47	15.0	20	+5	Prob.> Itl = 0.036 (*)
<b>Chênes sessiles</b>	3	22	20.0	40	+20	Prob.> Itl = 0.14 (n.s.)

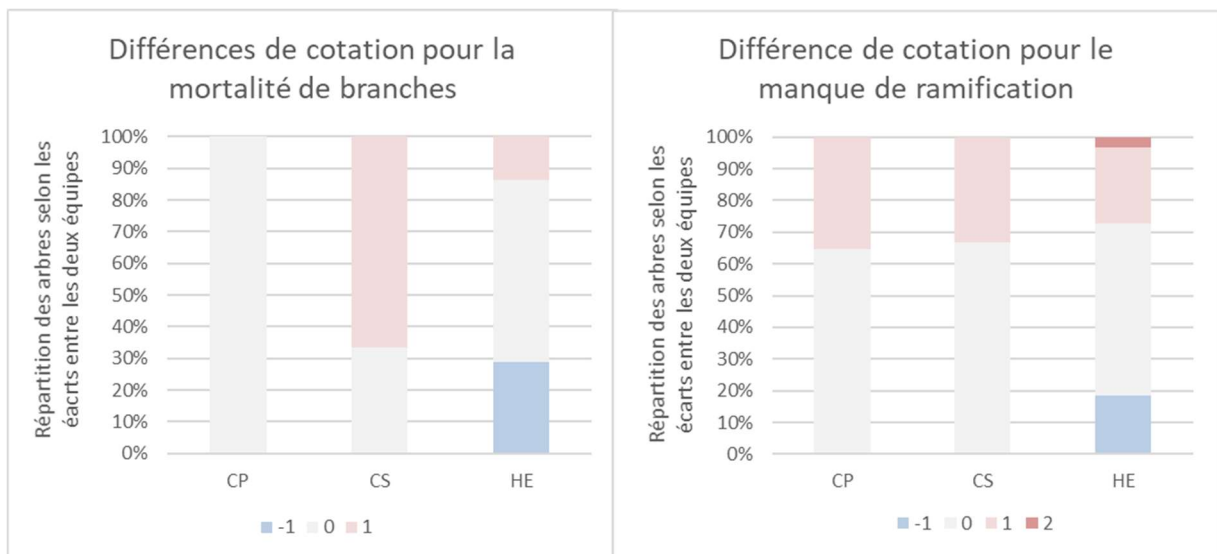
Les différences de moyenne de défoliation entre les résultats de Bruxelles-Environnement et de l'UCLouvain (

Tableau 5) sont faibles, mais significatives, pour les hêtres (-3.5%) et les chênes sessiles (+5%). Cette différence est très élevée pour les chênes sessiles (+20%), mais ce résultat n'est pas significatif en raison du faible nombre d'observations (n=3).

Les résultats sont donc globalement bons pour les hêtres et les chênes pédonculés. Les résultats semblent mauvais pour les chênes sessiles, mais sont basés sur un échantillon très réduit. Une augmentation des effectifs de chênes sessiles dans l'échantillon ICP est prévue pour l'année prochaine (pour atteindre si possible 10 arbres), ce qui améliorera la performance du test.

### 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 branche 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 absolue entre les deux équipes n'excède jamais 1. La correspondance entre les deux équipes est parfaite pour les chênes pédonculés, tandis la cotation de l'équipe « Bruxelles Environnement » est généralement plus élevée pour les chênes sessiles (nb : n=3) et légèrement plus faible pour les hêtres. Les hêtres dont la cote est plus basse sont en effet plus nombreux que ceux présentant une cote plus élevée. La cotation plus « sévère » du manque de ramification pour les chênes par l'équipe « Bruxelles Environnement » est en accord avec la cotation plus élevée de la défoliation pour ces essences par cette équipe (cf § 3.5.2).

Pour le manque de ramification, les arbres ne présentant pas d'écart de notation sont majoritaires, mais nous observons pour les 3 essences que les arbres présentant un écart positif sont plus nombreux que ceux qui présentent un écart négatif (aucun chêne ne présentant un écart négatif). Dans le cas des hêtres, 2 arbres présentent un écart de +2, ce qui est fort élevé étant donnée l'amplitude des classes. Il sera utile de rediscuter de ce critère lors de la séance de formation avant la saison 2023.

## 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, elles concernent l'échantillon complet, alors qu'elles étaient effectuées sur deux sous-échantillons en alternance bisannuelle entre 2009 et 2021.

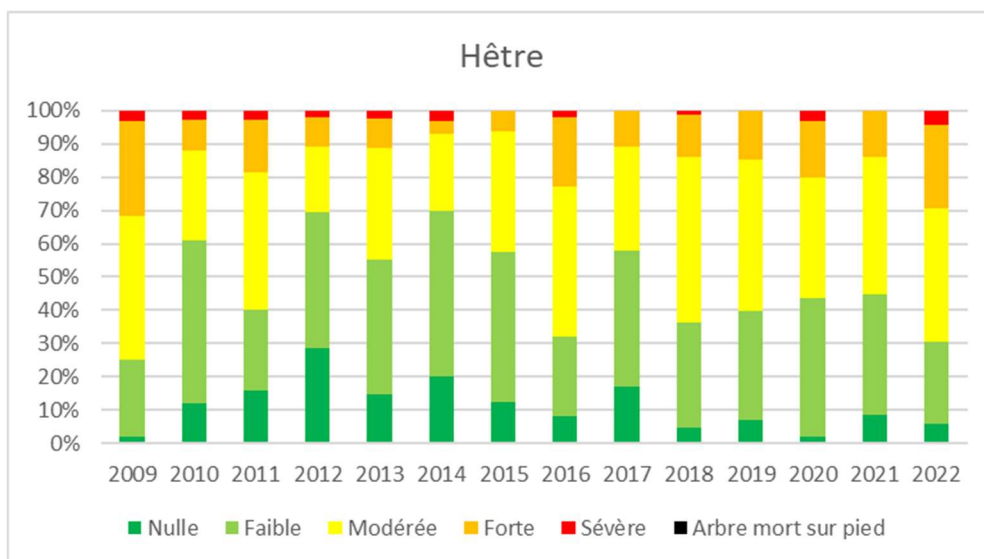
#### 4.1.1. Répartition par classe de défoliation

La présentation des résultats selon la proportion des arbres dans différentes classes de dégradation (selon des niveaux de défoliation). Ces classes sont définies au niveau du groupe d'experts d'ICP-forests :

- 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

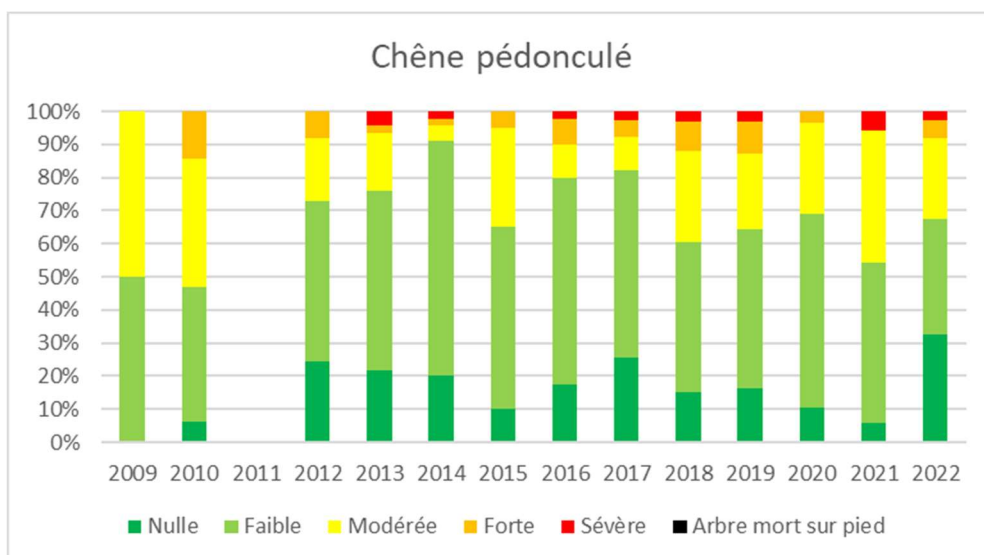
L'ancienne classe « dégradation modérée » qui s'étendait de 26% à 60% est désormais scindée en deux sous-classes (<https://www.icp-forests.org/pdf/TR2018.pdf>), car elle englobait des situations trop contrastées en termes de risque de dépérissement à moyen terme. Aucun nom officiel n'a été donné aux 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, 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, 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.



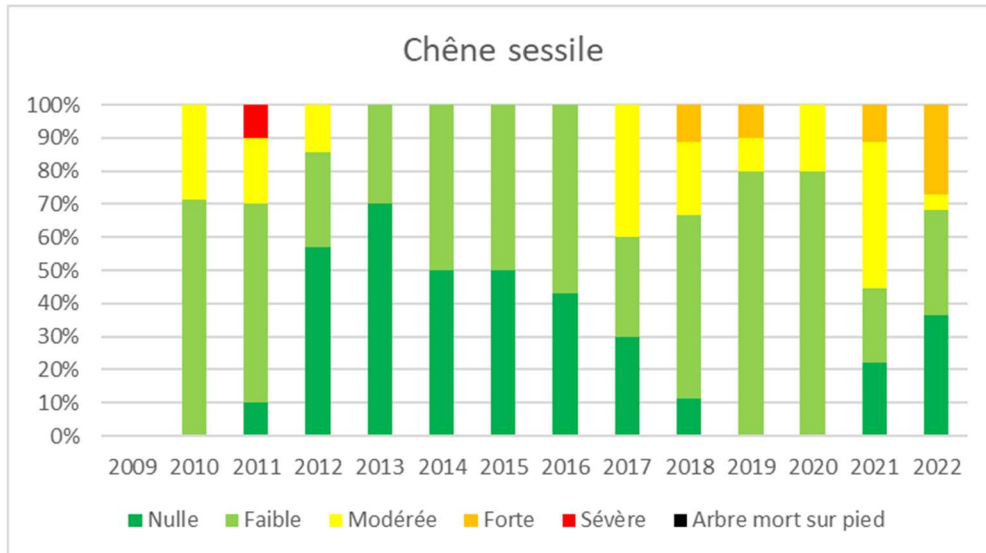
**Figure 13 : Evolution de la répartition des hêtres selon les classes de défoliation [Nulle (0-10%) ; Faible (11-25%) ; Modérée (26-40%) ; Forte (41-60%) ; Sévère (61-99%) ; Arbre mort sur pied (100%)]**

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



**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 32% en 2022, alors qu'elle s'élevait à 55% en 2021. Par contre, la proportion d'arbres fortement dégradés est passée de 11 à 28% de 2021 à 2022.



**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%)]**

## 4.1.2. Analyse statistique de l'évolution

### 4.1.2.1. Méthodes

#### MODELES

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). L'effet aléatoire lié à l'individu regroupe deux composantes : un effet constant (« Arbre ») qui affecte la variabilité autour de la moyenne et un effet qui affecte la variabilité du coefficient lié à l'année (« Année(Arbre)»). Nous avons en outre testé l'introduction d'un facteur d'auto-corrélation (anté-dépendance), mais ce dernier n'a finalement pas été retenu car il était systématiquement non-significatif.

En première approche, nous avons considéré l'année comme seul facteur fixe [Modèle 1]. Nous avons ensuite appliqué un modèle modifié, en considérant l'intensité de la fructification comme 2<sup>e</sup> facteur fixe [Modèle 2]. Pour ce dernier modèle, les valeurs de fructification correspondent aux moyennes annuelles de l'indice de fructification intégré (Figure 19).

Les modèles peuvent être résumés par les équations suivantes ; les variables aléatoires étant indiquées en italique :

**[Modèle 1] Défoliation = f(Constante + Année + *Arbre* + *Année(Arbre)*)**

**[Modèle 2] Défoliation = f(Constante + Année + Fructification annuelle moyenne + *Arbre* + *Année(Arbre)*)**

En raison de l'alternance bisannuelle des placettes visitées en hêtraie (jusqu'en 2021), et du cycle bisannuel de fructification des hêtres, il existe donc un risque de confusion entre les effets « arbres » et l'effet « Fructification annuelle moyenne ». Toutefois, un décalage dans le cycle de fructification s'est produit entre 2013 et 2014, de sorte que les différents niveaux de fructification sont bien représentés dans les 2 sous-groupes, réduisant ce risque. A partir de 2022, l'entièreté des arbres de l'échantillon sera évaluée chaque année.



## EVOLUTION A LONG TERME

Les évolutions à long terme sont analysées sur base des coefficients associés au facteur « Année » dans les modèles 1 et 2 détaillés ci-dessus, ainsi qu'aux incertitudes qui y sont associées.

## ANALYSE DES FLUCTUATIONS

### 1. Fluctuation de la « défoliation corrigée »

Sur base du résultat du modèle 2, nous avons calculé une variable dérivée appelée « **défoliation corrigée** », obtenue en soustrayant les effets aléatoires (« Arbre » et « Année(Arbre) ») 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.

### 2. Effet de la fructification

L'effet lié à la fluctuation de la fructification est calculé à partir du coefficient attribué à ce facteur dans les résultats du modèle 2 ainsi qu'à l'incertitude qui y est associée.

### 3. Fluctuation de la « défoliation sans fructification »

Si l'effet de la fructification est significatif, nous avons calculé une 2<sup>e</sup> variable dérivée appelée « **défoliation sans fructification** », obtenue en soustrayant de la valeur brute de défoliation (i) les effets aléatoires issus du modèle 2, ainsi que (ii) l'effet de la fructification. L'effet fructification a été calculé en multipliant le coefficient donné par le modèle 2 par la fructification moyenne de l'année correspondante (Figure 19). Contrairement à la défoliation corrigée, la déduction de l'effet de la fructification est susceptible d'affecter fortement la moyenne globale, les moyennes annuelles et la pente globale, car il s'agit d'une situation fictive où aucune fructification n'aurait lieu durant toute la période.

#### 4.1.2.2. Evolution à long terme

Les résultats des modèles de prédiction de la défoliation sont présentés aux Tableau 6 et Tableau 7. En ce qui concerne les chênes, le coefficient associé à l'année n'est significatif pour aucun des 2 modèles. Cela signifie qu'il n'y a aucune évolution linéaire sur le long terme, mais n'exclut pas de possible fluctuations (cf. ci-dessous).

Pour le hêtre, le coefficient associé à l'année est significatif pour les 2 modèles : l'augmentation moyenne de la défoliation est de **0.41% par an** sur l'ensemble de la période si l'on ne déduit pas les fluctuations liées à la fructification, et **0.52% par an** si ces fluctuations sont déduites. Ces coefficients sont nettement supérieurs à l'estimation de l'effet du vieillissement des arbres au fil du suivi sur la défoliation (+0.11% par an), effectuée pour le rapport 2021.

**Tableau 6 : Estimation des coefficients « Année » selon le Modèle 1**

Essence	Coefficient	Prob. >  t	IC95 (min)	IC95 (max)
Hêtres	<b>0.41</b>	<b>&lt;0.0001 (***)</b>	0.28	0.55
Chênes pédonculés	0.04	0.73 (n.s.)	-0.23	0.33
Chênes sessiles	0.39	0.13 (n.s.)	-0.12	0.91

**Tableau 7 : Estimation des coefficients « Année » et « Fructification » selon le Modèle 2 ; les valeurs significatives sont indiquées en gras.**

Essence	Paramètre	Coefficient	Prob. >  t	IC95 (min)	IC95 (max)
Hêtres	Année	<b>0.52</b>	<b>&lt;0.0001 (***)</b>	0.39	0.66
	Fructification	<b>10.8</b>	<b>&lt;0.0001 (***)</b>	8.81	12.9
Chênes pédonculés	Année	0.05	0.73 (n.s.)	-0.23	0.33
	Fructification	-4.94	0.10 (n.s.)	-10.8	1.00
Chênes sessiles	Année	0.45	0.10 (n.s.)	-0.09	0.99
	Fructification	-3.82	0.55 (n.s.)	-16.5	8.88

## ANALYSES DES FLUCTUATIONS

### **Effet de la fructification**

Seuls les hêtres présentent un effet significatif de la fructification annuelle moyenne sur la défoliation (Tableau 7). Le coefficient estimé (10.8) indique que la défoliation augmente de près de 11% lorsque l'indice de fructification intégré passe de 0 (= absence de fructification) à 1 (= fructification maximale pour tous les arbres). Dans les faits (Figure 19), cet indice oscille entre 0.05 (2012) et 0.72 (2016), ce qui induit une amplitude de variation de la défoliation de l'ordre de 7%.

### **Fluctuations de la défoliation**

L'évolution des valeurs moyennes de la « défoliation corrigée » et de la « défoliation sans fructification » est présentée à la Figure 16, et les comparaisons statistiques (ANOVA avec comparaisons multiples de Student) sont détaillées au Tableau 8. Notons que les valeurs de « défoliation sans fructification » sont proches des valeurs de « défoliation corrigée » lors des années de faible fructification.

Pour les hêtres, nous observons de fortes fluctuations de la défoliation corrigée, notamment d'importants pics en 2016 et 2022. La plupart de ces fluctuations sont atténuées lorsque l'on considère la « défoliation sans fructification », à l'exception du pic de 2022, qui semble même être renforcé. La fructification en 2022 est en effet très modérée (cf Figure 19) et n'explique donc pas la forte augmentation observée entre 2021 et 2022.

Les chênes pédonculés présentent également des fluctuations assez marquées de la défoliation corrigée, mais celles-ci ne sont pas liées aux fluctuations de la fructification (Tableau 7). Les valeurs observées en 2022 figurent parmi les plus basses (Tableau 8).

Pour les chênes sessiles, nous observons une diminution significative de la défoliation corrigée de 2021 à 2022, après une longue période d'augmentation entre 2016 et 2021.

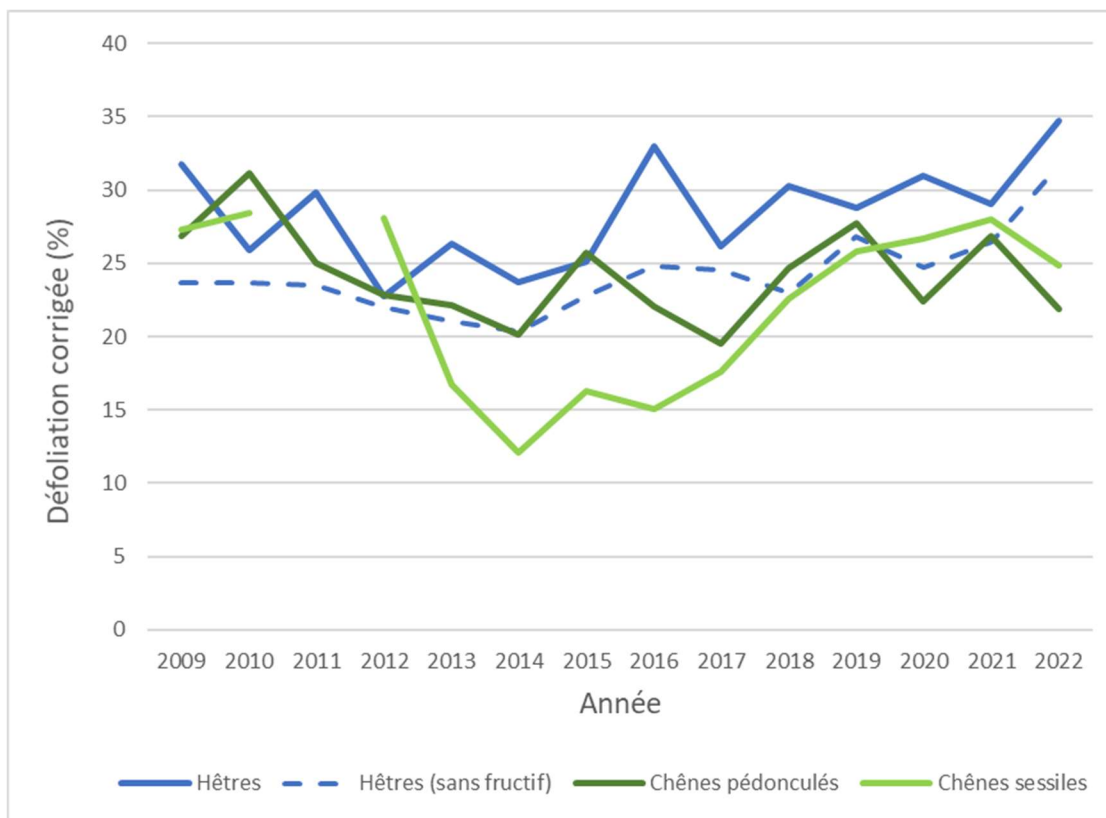


Figure 16 : Evolution des valeurs moyennes annuelles de la « défoliation corrigée » pour les 3 essences étudiées et de la « défoliation sans fructification » (effet de la fructification soustrait) pour le hêtre.

Tableau 8 : Valeurs moyennes annuelles pour la défoliation corrigée (%) des 3 essences étudiées [dans la colonne « Hêtre (sans fructif) », l'effet de la fructification est soustrait] ; 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	Hêtres (sans fructif)	Chênes pédonculés	Chênes sessiles
2009	32 bc	24 cd	27 abc	27 abc
2010	26 ef	24 cd	31 a	28 a
2011	30 cd	23 cde	25 abc	
2012	23 g	22 def	23 bc	28 a
2013	26 e	21 ef	22 bc	17 bc
2014	24 fg	20 f	20 c	12 c
2015	25 ef	23 cde	26 ab	16 bc
2016	33 ab	25 bc	22 bd	15 c
2017	26 e	25 bc	19 c	18 bc
2018	30 cd	23 cde	25 bc	23 ab
2019	29 d	27 b	28 ab	26 a
2020	31 bcd	25 bc	22 bc	27 a
2021	29 d	26 b	27 ab	28 a
2022	35 a	32 a	22 bc	25 a

## 4.2. Evaluation « DEPERIS »

Nous constatons que la grande majorité des arbres observés se situent dans la classe 0 pour le critère « mortalité de branches », que moins de 5% des arbres se situent en classe 2, et que les classes 3 et supérieures ne comportent aucun individu.

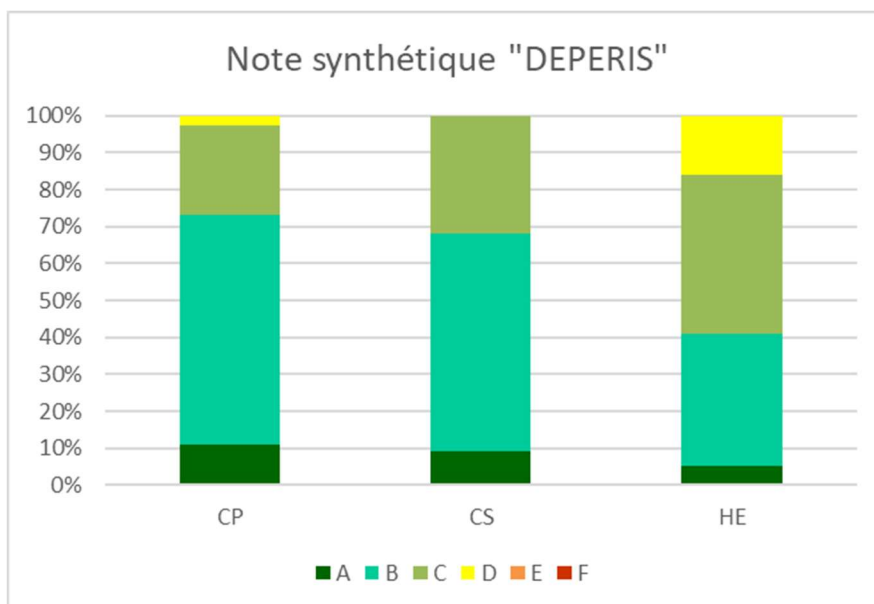
Concernant le « manque de ramification », nous observons une dominance de la classe 1 pour les chênes et des classes 1 et 2 pour les hêtres. Pour cette essence, 15% des individus se situent dans la classe 3, mais aucun dans les classes 4 et 5.



**Figure 17 : Répartition des arbres (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles ; HE : hêtres) selon les valeurs des critères « mortalité de branches » et « manque de ramification ».**

En combinant ces 2 critères (Figure 9), nous obtenons une note synthétique pour chaque arbre. Les classes B et C sont les mieux représentées (Figure 18), avec une dominance de la classe B chez les chênes et un équilibre entre ces deux classes chez les hêtres. Les classes E et F sont totalement absentes, mais la classe « D » représente tout de même 17% des hêtres. Le seuil de 20% d'arbres appartenant aux classes D, E ou F, fixé par les concepteurs de la méthode, n'est donc pas atteint. La hêtraie ne peut donc être qualifiée de dépérissante selon ce critère, mais 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 partiellement influencé par des perturbations anciennes (branches mortes qui sont aujourd'hui disparues) et le contrôle qualité a révélé un biais entre les deux équipes pour ce critère. D'autre part, le fait qu'aucun arbre ne se situe dans les classes E et F est plutôt rassurant ; la dégradation des hêtres est relativement étendue, mais pas extrême.

Il sera donc très important de bien accorder les 2 équipes par rapport au critère « manque de branches » et d'étudier l'évolution des 2 critères, afin de pouvoir distinguer les dégradations anciennes des dégradations en cours. Les analyses des photos permettront en outre d'apporter des informations relatives à la dynamique des processus de ramification et de mortalité de branches, qui sont à la base des critères « DEPERIS ».



**Figure 18 : Répartition des arbres (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles ; HE : hêtres) selon la note synthétique DEPERIS (cf. Figure 9) [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 4) par l'équipe UCLouvain. Auparavant, elle était réalisée par l'équipe Bruxelles Environnement sur l'ensemble des chênes chaque année, mais 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. En ce qui concerne les hêtres, nous avons montré (cf §3.1.3) que le sous-échantillon ICP est représentatif de l'échantillon complet au niveau de la distribution des circonférences et de la défoliation, mais ce n'est pas le cas actuellement pour les chênes (en particulier les chênes sessiles). Une mise à jour de l'échantillon ICP, via la sélection de nouveaux individus de chênes, est donc prévue avant les observations 2023.

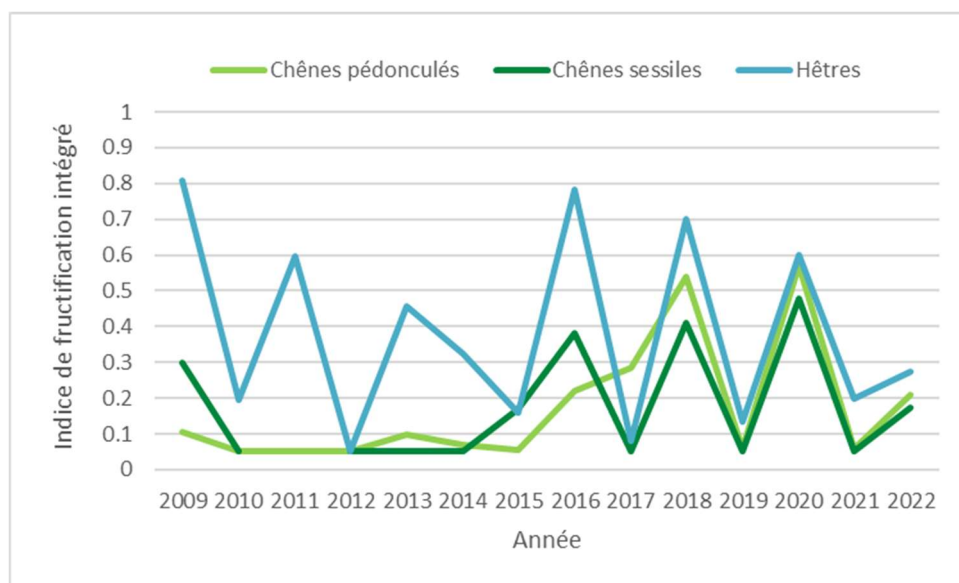
### **4.3.2. Fructification**

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 intégré ». A cet effet, nous avons associé, à chacune des classes d'intensité, une valeur sur une échelle de 0 à 1 (Tableau 9). 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 19). Nous observons une évolution en dent de scie pour les trois essences depuis 2017. Toutefois, les valeurs atteintes en 2022 sont bien plus faibles qu'en 2018 et 2020. Il semble donc que l'on s'oriente vers une perturbation du cycle bisannuel de fructification, comme en 2013-2014.

**Tableau 9 : Table de correspondance entre les classes de fructification selon ICP-forests et l'indice de fructification intégré**

Code ICP	Description	Indice de fructification intégré
1	absente/rare	0.05
2	visible	0.3
3	abondante	1



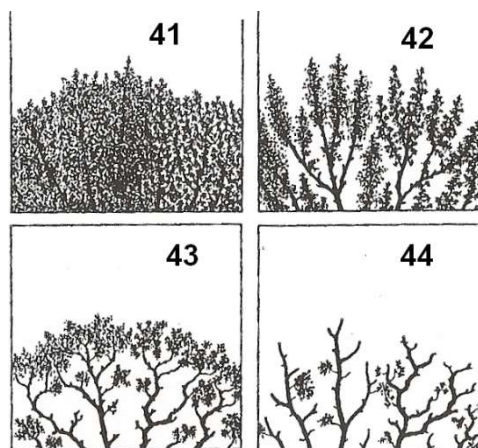
**Figure 19 : Evolution des valeurs moyennes annuelles de l'indice de fructification intégré (cf Tableau 9).**



### 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 du houppier ont été définies (voir Figure 20) en fonction du développement des rameaux de la partie supérieure de la couronne et.

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. D'une part, les branches complètement mortes ne sont pas prises en compte dans l'examen de la structure de la couronne ; seules les branches « en train de mourir » sont considérées (nombreuses ramilles mortes, mais pas toutes). D'autre part, 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 20 : 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 21 illustre une fiche de terrain utile aux observateurs pour différencier les formes sur base de critères et de photos prises en Belgique. Notons toutefois que la proportion de branches mortes n'est pas considérée pour l'évaluation de ce critère. Le critère « mortalité » utilisé pour la définition des classes 6 et 7 fait référence aux branches encore vivantes, mais qui sont clairement en train de mourir.

## 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 21: 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 (Figure 22). La structure des chênes sessiles (Figure 23) s'est brusquement dégradée en 2018 et est restée stable ensuite. En 2022, nous observons une légère amélioration, la classe « simplification importante » n'étant plus représentée. Notons toutefois que la représentativité de l'échantillon 2022 est problématique pour les chênes sessiles.

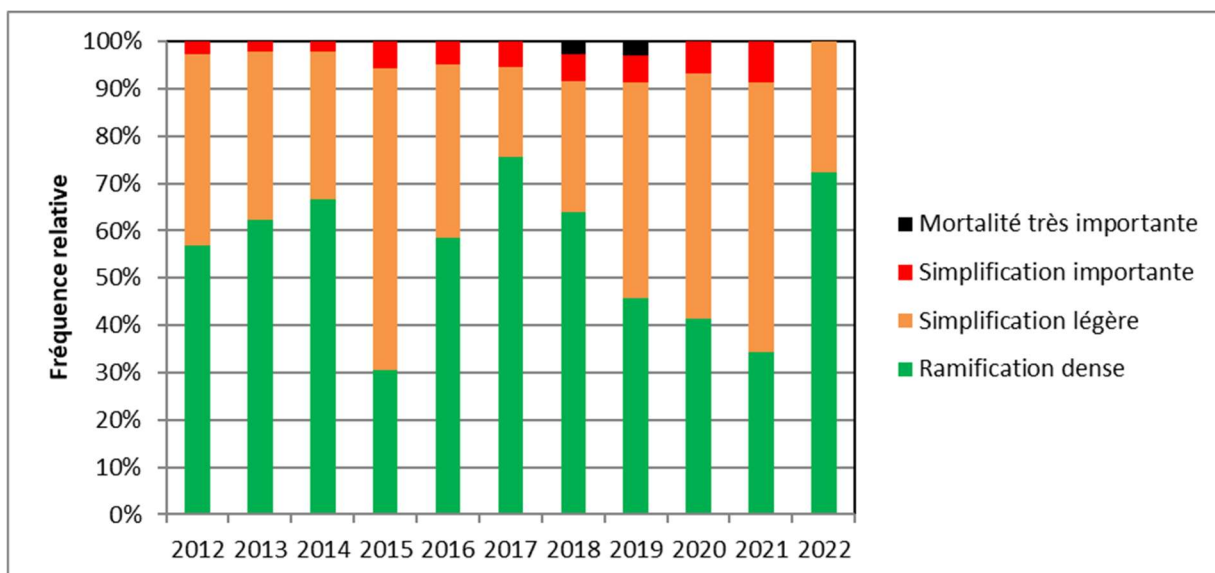


Figure 22 : Distribution des chênes pédonculés selon la structure de la couronne

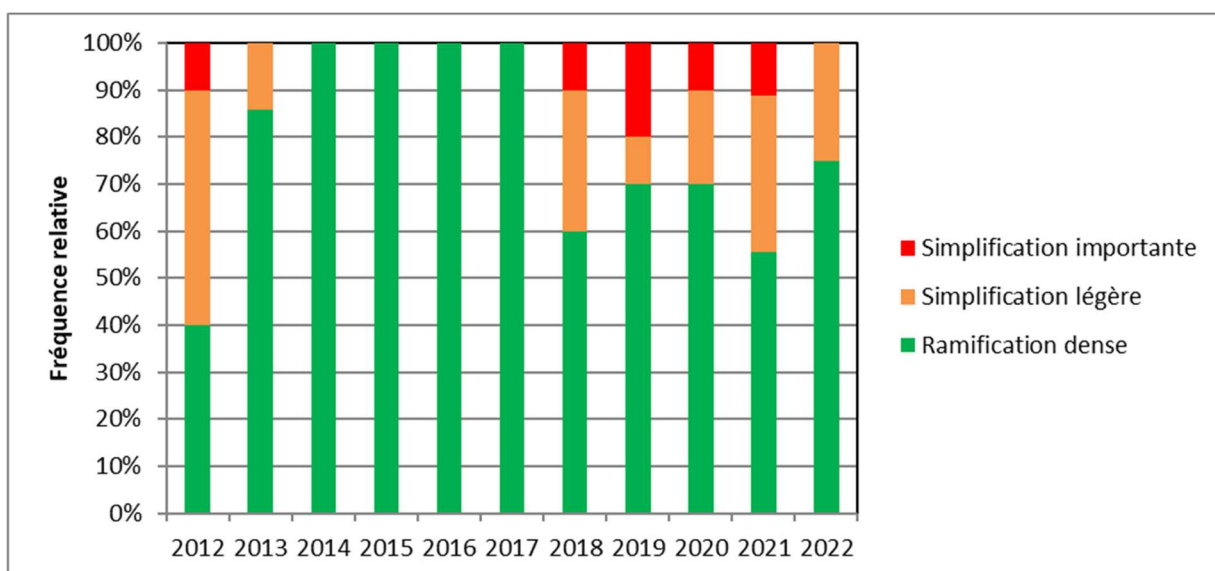
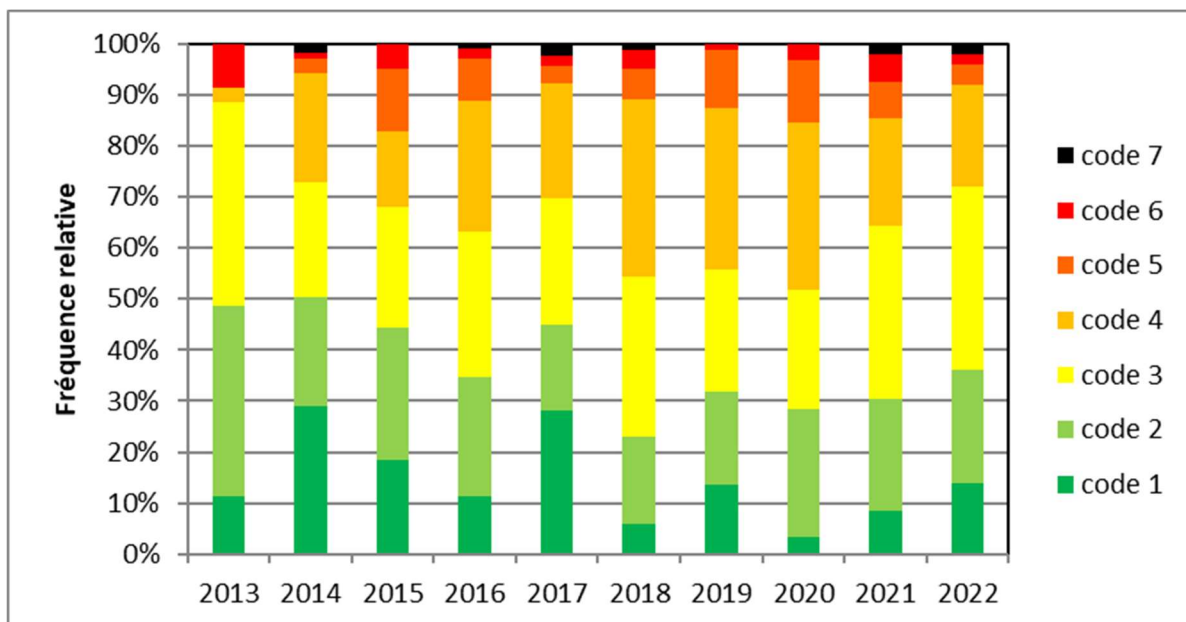


Figure 23 : Distribution des chênes sessiles selon la structure de la couronne

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 24). Par contre, nous observons une nette augmentation de la fréquence cumulée des classes 1 à 3 entre 2020 et 2022. Ceci qui suggère un processus de reconstruction de l'architecture des cimes. Nous avons en effet constaté sur le terrain (Figure 25) le développement de rameaux latéraux longs et nombreux (code 1 ou 2) sur des branches courbées de type griffes (code 4 ou 5). Ce processus de reconstruction par « re-densification » des branches est différent de la « descente de cime » (code 8), caractérisée par une reconstruction du houppier à partir du développement de branches plus basses.



**Figure 24 : Distribution des hêtres selon la structure de la couronne ; la signification des codes est donnée à la Figure 21.**





**Figure 25 : Exemple de ramification abondante sur des branches préalablement dégradées**

### 4.3.3. Pousses épïcormiques

Les pousses épïcormiques (« gourmands ») proviennent du débourrement de bourgeons dormants présents sur les branches ou le tronc. Dans certaines conditions, la présence de ces pousses secondaires indique la manière avec laquelle l'arbre répond à la perte de feuillage et révèle donc la capacité régénératrice de l'arbre.

La présence de pousses épïcormiques est plus généralement observée chez les chênes pédonculés, et présente une nette diminution entre 2018 et 2022, à l'exception d'un pic en 2021 (Figure 26). Chez les hêtres, les gourmands sont peu fréquents et en lente diminution.

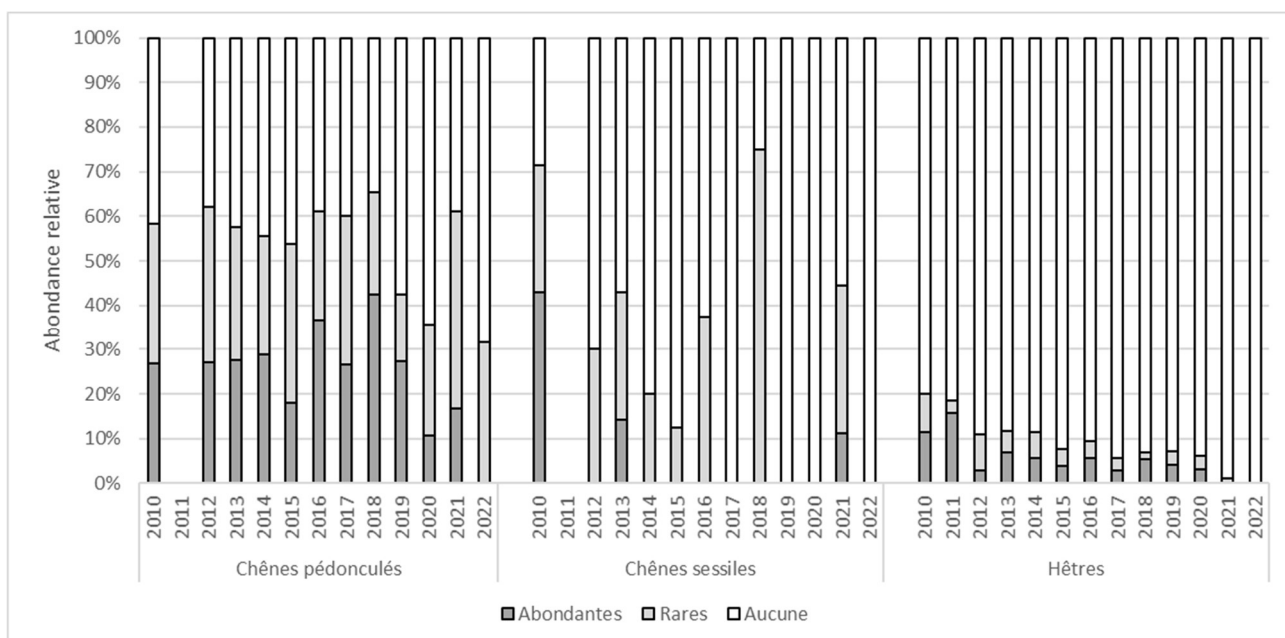


Figure 26 : Distribution des arbres selon l'abondance des pousses épïcormiques

#### 4.3.4. Décoloration des feuilles

La décoloration est définie dans le protocole comme toute altération de la couleur normale du feuillage. Ce critère est noté en pourcent et correspond à la proportion du feuillage atteint par rapport à la totalité du houppier observable.

La fréquence des hêtres décolorés, ainsi que l'intensité de ce phénomène, ont fortement diminué entre 2019 et 2022. Les chênes sont généralement faiblement décolorés, sauf en 2012. Chez les chênes, la décoloration est souvent associée au développement de l'oïdium sur les rameaux de la Saint-Jean (débourrement secondaire).

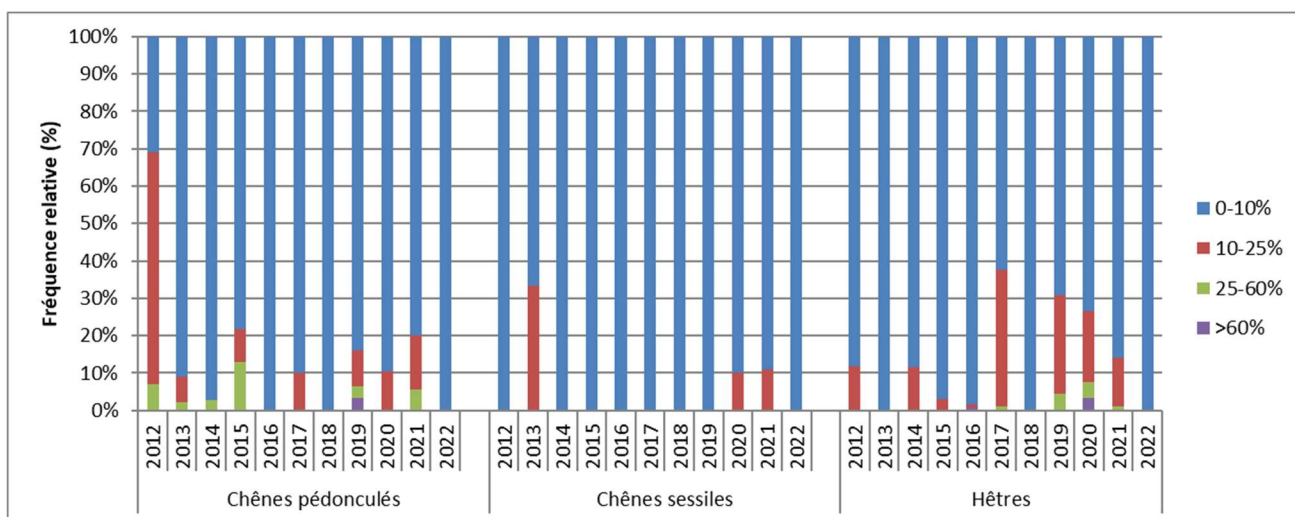


Figure 27 : Distribution des arbres selon le pourcentage de décoloration du feuillage

### 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 est en forte augmentation (Figure 28). Pour la plupart d'entre eux, l'intensité du dommage reste toutefois limitée (1-10% des branches affectées). En ce qui concerne la mortalité de branches de diamètre moyen, la fréquence et l'intensité du dommage ont diminué entre 2010 et 2022. Une telle diminution peut s'expliquer par la chute des branches mortes des années précédentes, non compensée par la mortalité de nouvelles branches. Le fait que la mortalité ait augmenté pour les branches fines mais pas pour les branches moyennes peut être expliquée par le fait que la mortalité de branches est généralement un phénomène centripète (débutant par les extrémités). Il sera intéressant de vérifier au cours des prochaines années si la mortalité des branches fines se propage aux branches moyennes (indiquant une dégradation marquée) ou si le phénomène reste limité aux petites branches (indiquant une résilience).

Chez les chênes pédonculés, 5% des arbres présentaient des feuilles dévorées ou des branches fines mortes en 2022. La fréquence et l'intensité de ces symptômes sont toutefois très limitées par rapport à la période 2010-2014 (Figure 29).

Chez les chênes sessiles, la présence de feuilles dévorées (vraisemblablement par des chenilles) a été signalée pour 1 arbre (sur 9) en 2021, mais aucun dommage n'a été détecté en 2022.

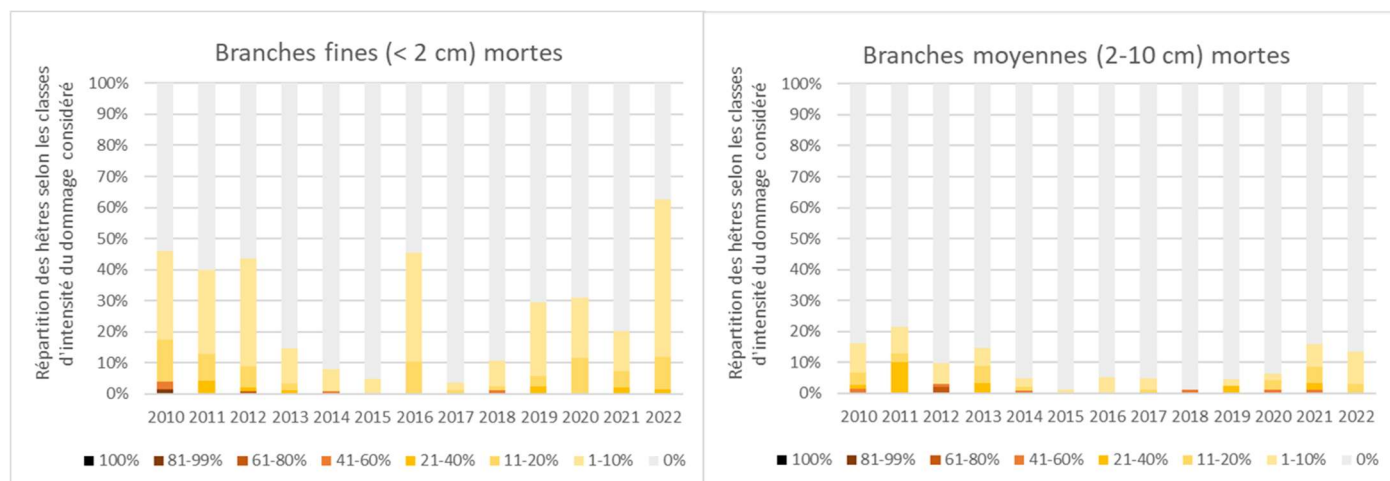


Figure 28 : Evolution des principaux dommages affectant les hêtres



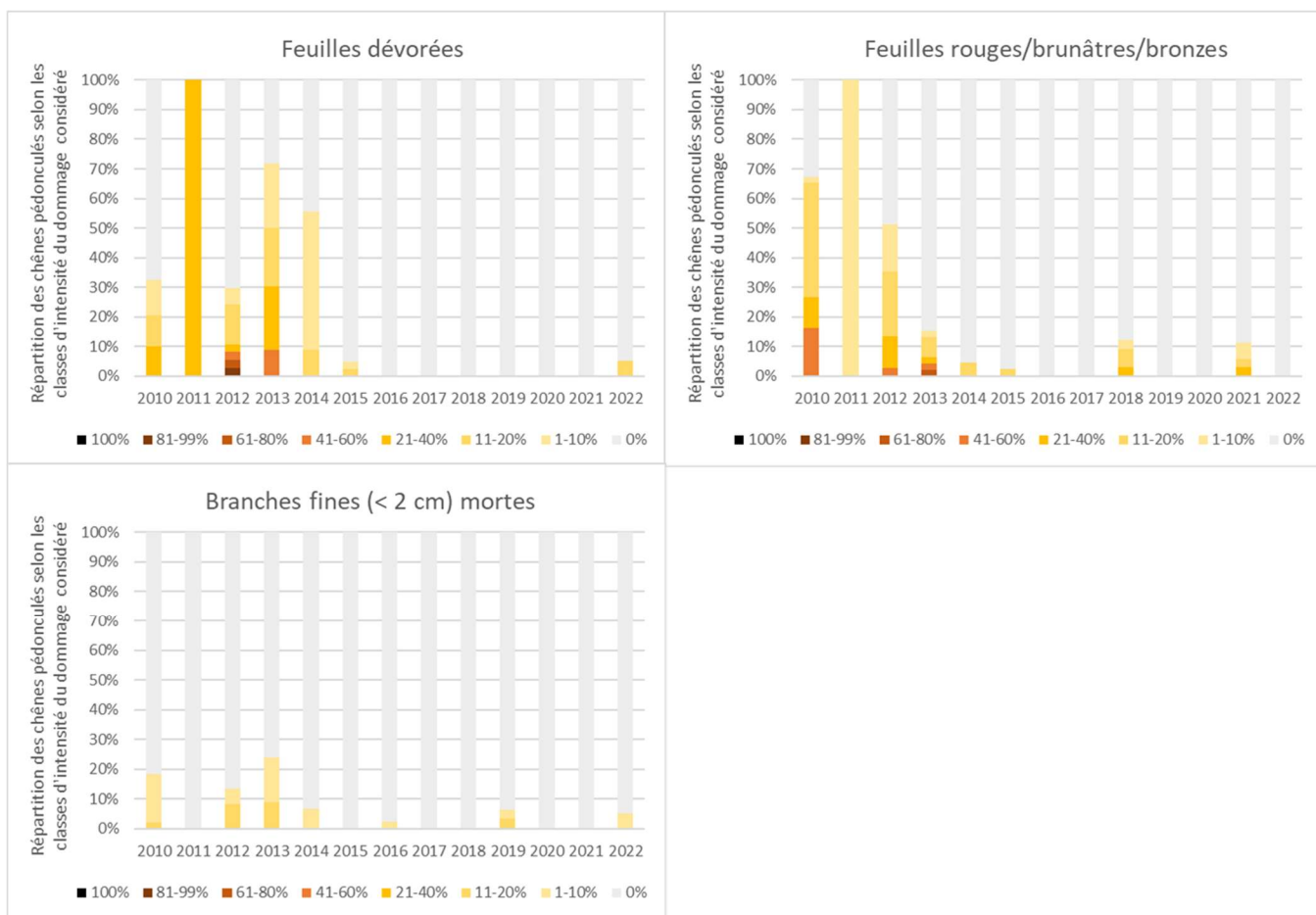


Figure 29 : Evolution des principaux dommages affectant les chênes pédonculés

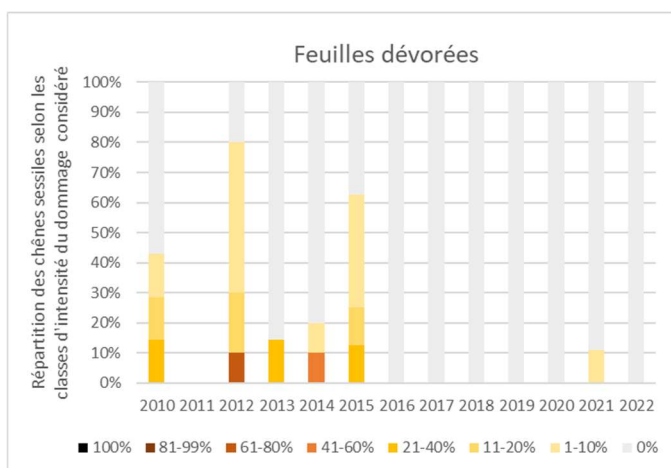


Figure 30 : Evolution des principaux dommages affectant les chênes sessiles

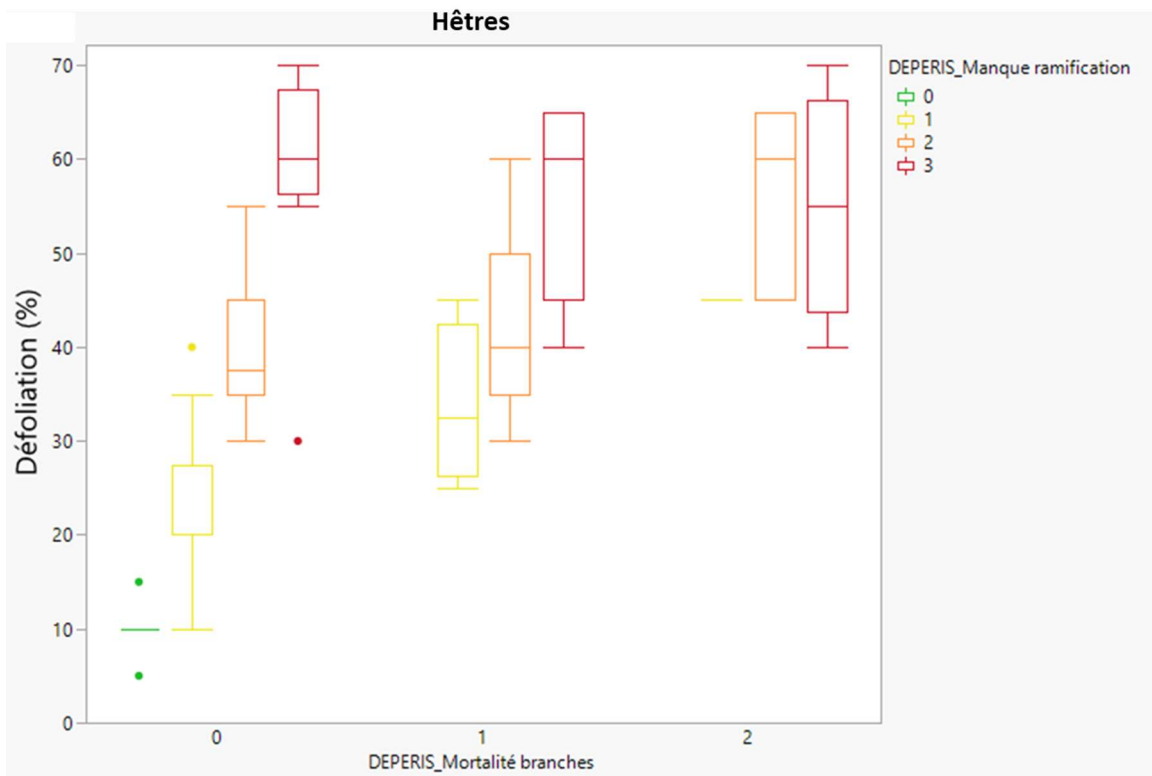
#### 4.4. Relations entre les variables

Les liens complexes entre défoliation et autres facteurs ont été investigués en détail en 2021. Nous avons mis en évidence que l'architecture est la composante majeure de la défoliation et que pour les hêtres, celle-ci est fortement influencée par la taille de l'arbre et donc par son âge. La fructification, qui est aussi liée à la défoliation chez les hêtres, est plus abondante chez les arbres dont l'architecture est dégradée. La fructification pourrait contribuer à cette dégradation, en raison de la mort des rameaux fructifères après production du fruit, mais il pourrait également s'agir d'une relation indirecte, en raison d'une influence de l'âge sur les deux paramètres.

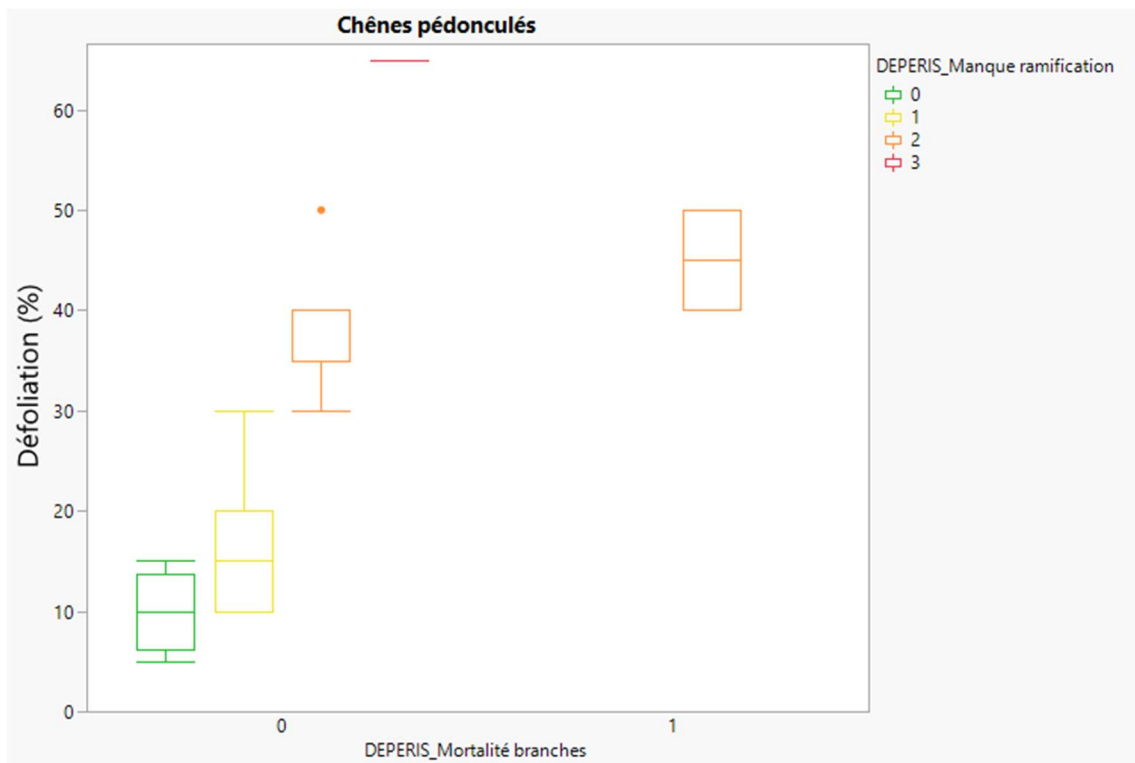
Nous ne nous attendons pas à une évolution de telles relations d'une année à l'autre. Nous avons donc choisi de ne pas ré-analyser chaque année l'ensemble des relations. Cette année, nous focalisons notre analyse sur la comparaison des paramètres DEPERIS et des paramètres « ICP ». Ces relations sont étudiées sur l'échantillon complet.

Nous observons pour le hêtre (Figure 31) des effets très marqués des deux paramètres « DEPERIS » sur la défoliation. Toutefois, l'interaction entre les facteurs est importante : les effets du manque de ramification diminuent lorsque la note « mortalité de branches » passe de « 0 » à « 1 », et devient nul lorsque cette note est de « 2 ». Inversement, l'effet de la mortalité de branches diminue lorsque le manque de ramification « augmente ». Nous pouvons donc conclure que ces deux paramètres influencent fortement la défoliation, ce qui est logique vu qu'ils en constituent les principales composantes. Néanmoins, lorsque l'un des deux paramètres est élevé, l'influence de l'autre paramètre devient négligeable.

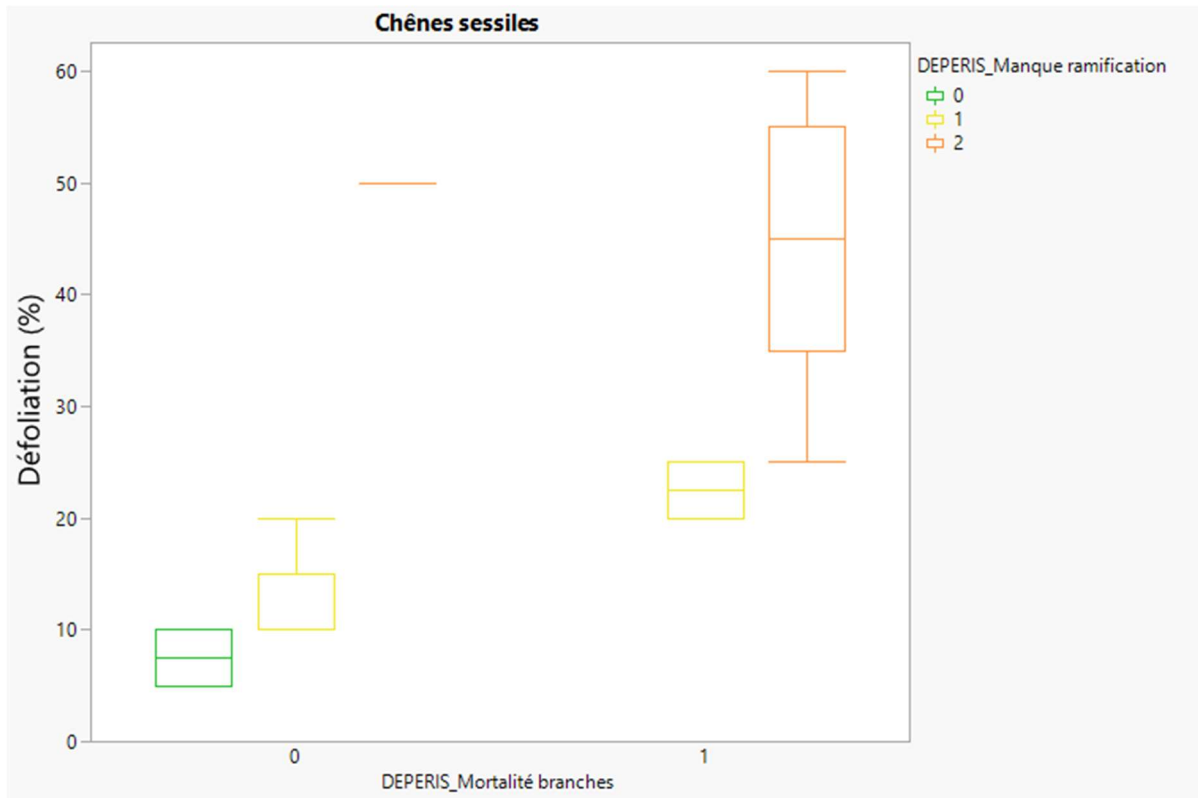
En ce qui concerne les chênes, les mêmes tendances semblent se dessiner, mais le nombre de classes représentées est très limité, ce qui ne permet pas une analyse détaillée.



**Figure 31 : Distribution des valeurs de défoliation des hêtres selon les codes « Mortalité de branches » (sur l'axe x) et « Manque de ramification » (représenté par les différentes couleurs) de la méthode DEPERIS**

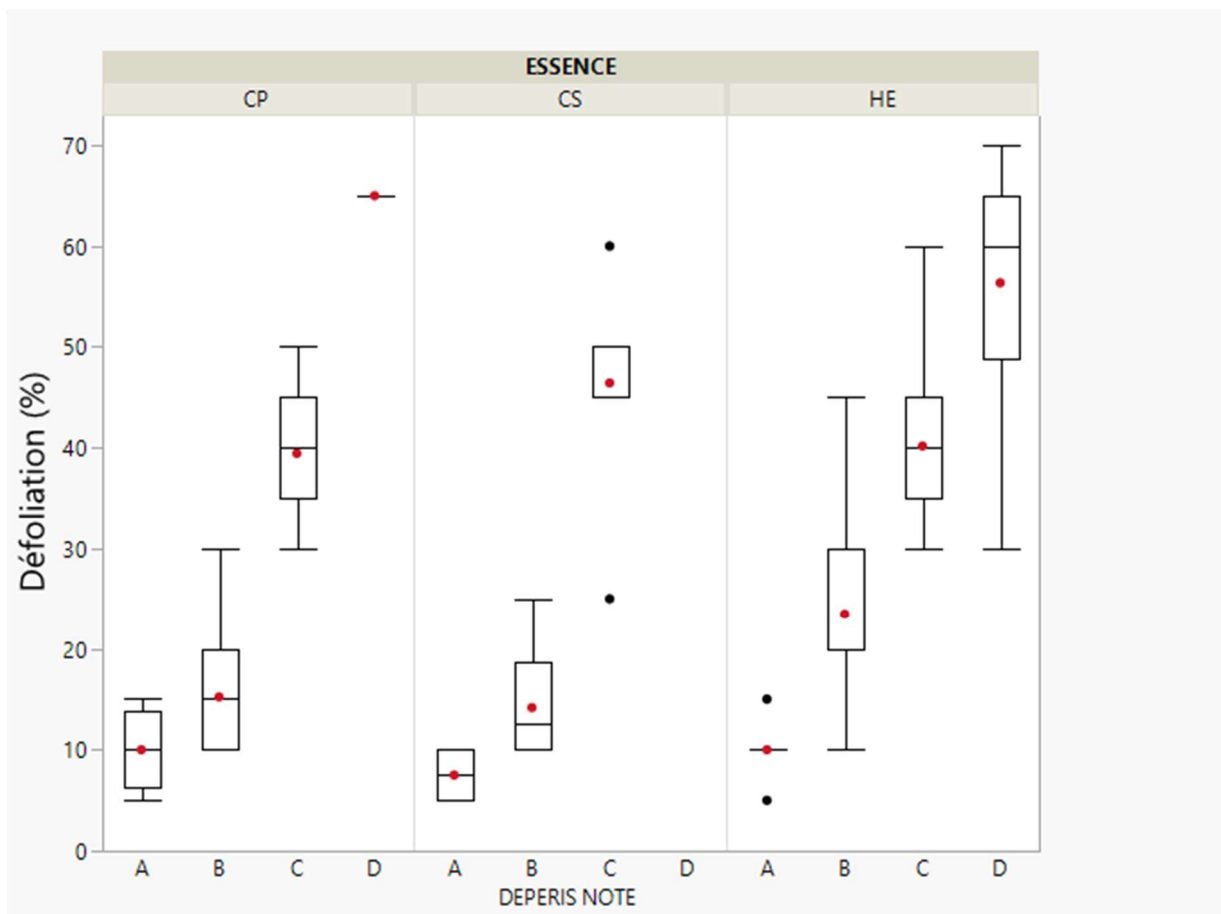


**Figure 32 : Distribution des valeurs de défoliation des chênes pédonculés selon les codes « Mortalité de branches » (sur l'axe x) et « Manque de ramification » (représenté par les différentes couleurs) de la méthode DEPERIS**



**Figure 33 : Distribution des valeurs de défoliation des chênes sessiles selon les codes « Mortalité de branches » (sur l'axe x) et « Manque de ramification » (représenté par les différentes couleurs) de la méthode DEPERIS**

Si l'on s'intéresse aux distributions de la défoliation selon la note DEPERIS synthétique (Figure 34), nous pouvons par contre analyser les résultats pour les 3 essences : les valeurs de défoliation augmentent très nettement lorsque la note DEPERIS passe d'une classe à la suivante, et ce pour les 3 essences. Cette observation est bien sûr attendue, vu que les critères DEPERIS sont les principaux composants de la défoliation. Les distributions au sein des classes sont toutefois assez « étendues », ce qui peut être attribué à la largeur des intervalles considérés pour les deux critères DEPERIS, ainsi qu'à l'impact d'autres « composantes » de la défoliation, telles que le grignotage par des chenilles, l'effet de la fructification ou la chute prématurée de feuilles. Il est également intéressant de noter que les défoliations sont déjà très élevées (médiane = 60 %) pour les arbres appartenant à la classe D ce qui justifie le terme « dégradé » pour cette classe. Les arbres appartenant aux classes E et F, non observées ici, doivent donc être considérés comme extrêmement dégradés.



**Figure 34 : Distribution des valeurs de défoliation des hêtres (HE), chênes pédonculés (CP) et chênes sessiles (CS) selon les notes synthétiques DEPERIS (cf Figure 9) [nb : les points rouges représentent les moyennes par classe]**

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

La collecte de clichés se poursuit avec beaucoup de soin, pour la 7<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 2019).

Cette année, un protocole d'analyse de ces images est en cours d'élaboration. Il sera présenté en détail dans une 2<sup>e</sup> partie du rapport prévue pour janvier-2023.

L'analyse se focalise sur 2 axes : la quantification de la croissance et de la ramification des branches, et la quantification de la proportion de branches mortes.

La caractérisation de la croissance et de la ramification des branches est effectuée sur les photos prises en hiver. Nous utilisons des algorithmes conçus pour la quantification de la croissance racinaire à partir de photos de plantules en rhizotrons.

La quantification des branches mortes se base à la fois sur les photos prises en été (pour détecter les branches mortes) et en hiver (pour compter le nombre total de branches).

Nous n'avons pas creusé l'idée d'automatiser la cotation de la défoliation car cela ne représente pas d'avantage par rapport à la cotation sur le terrain. Il est de toutes façons nécessaire de se rendre sur place pour prendre la photo. Or, cette dernière ne pourra être exploitée que si le ciel est bien bleu, ce qui est fort contraignant.

## 6. Discussion générale

La 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 3 % de l'effectif) présente une note « D », qui constitue le seuil à partir duquel l'arbre est considéré comme « dégradé ». La situation sanitaire des chênes peut donc être qualifiée de « bonne » selon les critères DEPERIS.

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

La comparaison avec les années précédentes est effectuée sur base des critères ICP, car le suivi « DEPERIS » a débuté cette année. Les niveaux de défoliation ont significativement diminué par rapport aux 3 dernières années pour les chênes, ce qui pourrait être lié à une amélioration de la ramification des branches, bien que le nombre d'arbres sur lequel ce critère est évalué soit faible. Pour les hêtres, nous observons par contre une augmentation significative de la défoliation (+ 6%) de 2021 à 2022. Cette augmentation est en contradiction avec la légère amélioration constatée au niveau de la ramification des branches, qui pourrait elle-même s'expliquer par une faible intensité de fructification ces deux dernières années. L'augmentation de la défoliation en 2022 est vraisemblablement liée à une forte augmentation de la proportion de branches mortes cette année.

Il est important de noter que les effets de la sécheresse 2022 ne peuvent être étudiés via les résultats de cette année, car les observations ont été réalisées avant le pic de déficit hydrique (début septembre) et avant l'apparition de symptômes de stress (feuilles brunes, chute prématurée) sur quelques arbres. Le protocole, tel qu'il est conçu n'est d'ailleurs pas destiné à caractériser les effets directs des épisodes de stress, mais plutôt la réaction des arbres à moyen et long terme. Il sera nécessaire d'attendre 1 à 3 ans avant d'observer ces effets éventuels. Dès lors, il est probable que la forte augmentation de la proportion de branches (fines) mortes chez les hêtres soit une conséquence des sécheresses 2018 et/ou 2020. De même, le début de reconstruction de la ramification chez ces mêmes hêtres pourrait être le résultat de l'été humide de 2021, qui a peut-être inhibé la fructification en 2022 ; les bourgeons floraux sont en effet produits au cours de l'été précédent.

## 7. Conclusions et perspectives

Les observations 2022 montrent que la situation sanitaire des chênes est bonne et s'améliore après quelques années moins favorables. Les hêtres ont par contre subi une importante dégradation entre 2021 et 2022, caractérisée par une augmentation de la défoliation liée à la mortalité de branches fines. Il pourrait s'agir d'une conséquence des sécheresses 2018 et/ou 2022. Par contre, l'architecture de leurs branches vivantes s'est améliorée cette année, ce qui est plutôt rassurant pour la suite. Ces aspects seront investigués plus en détail sur base de l'analyse des photos prises chaque année.

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 et les possibles stress liés aux passages en éclaircies devront également être investigués.



## ANNEXE 1 : Liste des arbres du suivi photographique

Plot	Arbre	Essence	Défoliation en 2015/2016 (%)	C150 (cm)
2791	104	CS	15	133
2877	5	HE	45	185
	7	HE	25	198
	8	HE	35	239
	9	HE	30	278
	10	CH	30	197
2879	1	HE	40	225
3031	2	HE	30	227
	4	HE	40	177
	5	HE	40	168
	6	HE	40	181
	9	HE	30	200
3197	5	CP	20	166
3345	2	HE	45	204
	4	HE	35	261
3349	2	HE	40	282
	3	HE	20	272
3989	2	HE	25	326
4145	1	HE	15	165
	8	HE	65	230
4147	18	HE	25	128
	19	CH	10	255
	20	CH	15	236
4309	1	HE	35	232
	2	HE	30	210
	3	HE	35	220
	4	HE	45	231
	5	HE	35	231
4449	11	CP	25	153
4469	2	HE	30	211
	3	HE	30	295
	4	HE	25	253
4529	5	CP	40	128
	105	CP	20	115
	107	CP	25	98
4618	7	HE	30	148
	12	HE	20	134
4778	15	HE	10	115
4781	102	CP	30	156
5022	2	HE	35	155