



Suivi de l'état sanitaire des arbres en forêt de Soignes bruxelloise 2020

Réalisation
Technicien
Promoteur

Hugues Titeux
Frédéric Hardy
Quentin Ponette

Décembre 2020

Convention UCL – Bruxelles Environnement 2020

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 observations se réfèrent au protocole *ICP Forests* mis au point dans le cadre du programme international concerté sur les forêts. Les évaluations sont réalisées à différents niveaux puisqu'elles se rapportent aux conditions d'observation (statut social, concurrence, etc.), à l'état du houppier (défoliation, fructification, décoloration, etc.) et aux dommages visibles affectant l'arbre.

En 2020, un échantillon de 94 hêtres, 29 chênes pédonculés et 10 chênes sessiles ont été observés.

Malgré une sécheresse exceptionnelle en 2018 et un pic de chaleur record en 2019, l'état sanitaire des chênes et des hêtres en forêt de Soignes ne s'est pas détériorée de façon significative par rapport aux années précédentes.

Les analyses sur l'ensemble de la période d'étude (2009-2020) ne font ressortir aucune évolution linéaire pour les chênes, et une augmentation faible mais significative pour les hêtres (0.23% par an).

De plus, la défoliation de ces 3 essences présente d'importantes fluctuations interannuelles. Chez les hêtres, elles sont clairement liées aux fluctuations de l'intensité de la fructification, qui suit un cycle bisannuel imparfait. Chez les chênes, les fluctuations de la défoliation n'ont pas pu être expliquées.

L'analyse des relations entre variables au niveau de l'individu ont fait ressortir pour les 3 essences une forte corrélation entre la structure et la défoliation, ce qui suggère que la mortalité des branches et la simplification de la ramification sont les principales causes du déficit foliaire.

En outre, nous observons chez le hêtre de fortes corrélations positives entre défoliation, structure, fructification et circonférence. Ces relations avec la circonférence peuvent s'expliquer par des effets directs de l'âge de l'arbre (arrêt de la croissance en hauteur, production de fruits privilégiée par rapport à la ramification), mais pourrait également y être indirectement liés, en raison du cumul de stress résultant de l'enlèvement d'arbres voisins (compaction du sol, dégâts aux racines, blessures, ...). Sur base de la relation individuelle défoliation-circonférence et de la croissance moyenne, nous avons calculé une augmentation de défoliation de 0.13% par an, qui ne diffère pas significativement de la valeur de 0.23% par an calculée par modélisation des tendances.

Globalement, les observations suggèrent que, dans le contexte de la forêt de Soignes, les 3 essences résistent bien aux sécheresses et aux chaleurs extrêmes que nous avons connus ces dernières années. Dans le cas du hêtre, l'état sanitaire est plutôt mauvais depuis le début de la période de suivi, et il ne devrait pas s'améliorer avec l'âge, mais aucun paramètre ne suggère une accélération de cette dégradation au cours de ces dernières années. Une poursuite du suivi est toutefois nécessaire pour détecter un éventuel effet différé des épisodes climatiques extrêmes de ces dernières années.

Date de fin : Décembre 2020.

Table des matières

Résumé	2
Table des figures	5
Table des tableaux	8
1. Contexte	10
2. Objectifs	12
3. Description de la forêt de Soignes	13
3.1. Composition spécifique	13
3.2. Sols.....	13
3.3. Climat.....	16
4. Mise en place de la campagne du suivi sanitaire de 2020	18
4.1. Plan d'échantillonnage	18
4.2. Protocole d'évaluation.....	21
4.3. La défoliation, indicateur de vitalité des arbres	21
4.4. Caractéristiques des arbres observés.....	23
4.4.1. Effectifs et distribution des arbres en classes de grosseurs	23
4.4.2. Concurrence – Indice d'ombrage.....	25
4.4.3. Statut social.....	26
4.4.4. Visibilité.....	27
4.5. Encodage et traitement des données.....	28
4.6. Contrôle-qualité.....	28
5. Résultats et discussions	31
5.1. Fructification	31
5.2. Structure de la couronne	32
5.3. Pousses épïcormiques	36
5.4. Décoloration des feuilles	37
5.5. Croissance	38
5.6. Défoliation	39
5.6.1. Défoliation moyenne par essence.....	39
5.6.2. Répartition par classe de défoliation	43
5.6.3. Relations entre la défoliation et les autres variables.....	45
5.6.3.1. Défoliation et circonférence	45
5.6.3.2. Défoliation et concurrence	48
5.6.3.3. Défoliation et fructification.....	50
5.6.3.4. Défoliation et décoloration	53
5.6.3.5. Défoliation et structure du houppier.....	54
5.6.4. Evolution de la défoliation	57
5.6.4.1. Méthodes	57
5.6.4.2. Hêtres.....	60
5.6.4.3. Chênes pédonculés	66
5.6.4.4. Chênes sessiles.....	72
5.7. Dommages	77
6. Suivi photographique des houppiers à partir du sol	78
7. Discussion générale	79
8. Conclusions et perspectives	80
Annexe 1 : Liste des arbres du suivi photographique	81

Table des figures

Figure 1: Proportion des types de peuplements en forêt de Soignes bruxelloise (Braem <i>et al.</i> , 2010)	13
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).....	14
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).....	15
Figure 4 : Température et précipitations mensuelles mesurées à la station météorologique d'Uccle, 1981-2010 (IRM, 2011).....	16
Figure 5: Localisation des placettes en hêtraie (étoiles bleues et vertes) et chênaie (croix rouges) ...	20
Figure 6 : Distribution des arbres de l'échantillon analysé en 2020 selon les classes de circonférence	24
Figure 7 : Distribution des arbres selon le degré de concurrence pour l'échantillon analysé en 2020	25
Figure 8 : Proportion des statuts sociaux en fonction des essences pour l'échantillon analysé en 2020	26
Figure 9 : Distribution des arbres en fonction de la visibilité et de l'essence pour l'échantillon analysé en 2020.....	27
Figure 10 : Distribution des arbres selon la visibilité pour l'ensemble des arbres non dominés observés en 2020.	28
Figure 11 : Comparaison des valeurs de défoliation selon les équipes BE et UCL en 2020 ; la surface des bulles illustre le nombre de points de mêmes coordonnées ; la droite continue correspond au rapport 1:1 ; les droites pointillées correspondent aux seuils de +/- 10 %.....	30
Figure 12 : Evolution de l'intensité de la fructification de 2009 à 2020 pour les chênes et les hêtres	31
Figure 13 : Les quatre formes de houppier des chênes, avec leurs codes (Eichhorn <i>et al.</i> , 2010) 41 : ramification dense ; 42 : simplification légère ; 43 : simplification importante ; 44 : déclin.....	32
Figure 14: Fiche de terrain différenciant les 8 formes du houppier du hêtre.....	33
Figure 15 : Distribution des chênes pédonculés selon la structure de la couronne	34
Figure 16 : Distribution des chênes sessiles selon la structure de la couronne.....	34
Figure 17 : Distribution des hêtres selon la structure de la couronne; la signification des codes est donnée à la Figure 14.	35
Figure 18 : Distribution des arbres selon l'abondance des pousses épïcormiques	36
Figure 19 : Distribution des arbres selon le pourcentage de décoloration du feuillage.....	37
Figure 20 : Evolution de la défoliation des chênes pédonculés (CP), des chênes sessiles (CS) et des hêtres (HE) de 2009 à 2020	40
Figure 21 : Evolution comparée des défoliations moyennes de Hêtres en forêt de Soignes bruxelloise, en Wallonie et en Flandre	41
Figure 22 : Evolution comparée des défoliations moyennes de chênes pédonculés en forêt de Soignes bruxelloise, en Wallonie et en Flandre.....	42
Figure 23 : Evolution comparée des défoliations moyennes de chênes sessiles en forêt de Soignes bruxelloise et en Wallonie.....	42
Figure 24 : 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%)]	43
Figure 25 : 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%)]	44
Figure 26 : 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%)]	44
Figure 27 : Relations entre la circonférence en cm (C150) et la défoliation (%) en 2020 [les droites représentent les régressions linéaires et les zones grisées les intervalles de confiances relatifs à ces dernières]	46

Figure 28 : Relation entre les circonférences et les défoliation des hêtres [moyennes par arbre sur l'ensemble de la période de monitoring ; suppression de 11 points aberrants par la méthode de Mahalanobis].....	47
Figure 29 : Défoliation des chênes indigènes (CP : chêne pédonculé ; CS : chêne sessile) et des hêtres (HE) selon l'indice d'ombrage en 2020	48
Figure 30 : Répartition des hêtres par classe de concurrence pour chacune des classes de circonférence.....	49
Figure 31 : Distribution de la défoliation des chênes (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles) et des hêtres (HE) selon l'abondance de la fructification en 2020.....	50
Figure 32 : Effet de la fructification sur l'apparence de la cime des hêtres.....	51
Figure 33 : Répartition des hêtres par classe de fructification pour chacune des classes de circonférence.....	51
Figure 34 : Répartition des hêtres par classe de fructification pour chacune des classes de structure (cf. Figure 14 pour la signification des codes)	52
Figure 35 : Défoliation des chênes indigènes (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles) et des hêtres (HE) en 2020 selon l'intensité de la décoloration la même année [classe 0 : 0 à-10% ; classe 1 : 10-25% ; classe 2 : 25-60% ; classe 3 : >60%].....	53
Figure 36: Distribution de la défoliation des chênes (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles) et des hêtres (HE) selon la forme du houppier en 2020 (la signification des codes est indiquée aux Figure 13 et Figure 14)	54
Figure 37 : Répartition des hêtres par classe de structure du houppier pour chacune des classes de circonférence.....	55
Figure 38 : Répartition des chênes pédonculés par classe de structure du houppier pour chacune des classes de circonférence.....	55
Figure 39 : Répartition des chênes sessiles par classe de structure du houppier pour chacune des classes de circonférence.....	56
Figure 40 : Comparaison des moyennes annuelles par rapport à la moyenne globale, pour le paramètre « Défoliation corrigée » (Défoliation après déduction des effets aléatoires) ; les années dont le point est situé hors de la zone grisée (points rouges) présentent une moyenne significativement différente de la moyenne globale.....	61
Figure 41 : Evolution comparée de la défoliation corrigée moyenne et de l'effet de la fructification annuelle moyenne pour les hêtres.....	62
Figure 42 : Comparaison des moyennes annuelles par rapport à la moyenne globale, pour le paramètre « Défoliation de base » (Défoliation après déduction des effets « individus » et de l'effet « fructification moyenne ») ; les années dont le point est situé hors de la zone grisée (points rouges) présentent une moyenne significativement différente de la moyenne globale.....	63
Figure 43 : Table de corrélation entre les différentes variables associées aux individus (arbres) pour les hêtres [les informations relatives aux différentes variables sont reprises dans la section méthodologique ci-dessus ; les coefficients de corrélation sont indiqués dans les bulles, dont la taille est inversement proportionnelle aux p-valeurs (cf Tableau 14) ; les ellipses reprenant 95% des points ainsi que les droites de régression avec intervalles de confiances sont représentées dans la partie inférieure de la table].....	65
Figure 44 : Comparaison des moyennes annuelles par rapport à la moyenne globale, pour le paramètre « Défoliation corrigée » (Défoliation après déduction des effets aléatoires) ; les années dont le point est situés hors de la zone grisée (en rouge) présentent une moyenne significativement différente de la moyenne globale	67
Figure 45 : Table de corrélation entre les différentes variables associées aux individus (arbres) pour les chênes pédonculés [les informations relatives aux différentes variables sont reprises dans la section méthodologique ci-dessus ; les coefficients de corrélation sont indiqués dans les bulles, dont la taille est inversement proportionnelle aux p-valeurs (cf Tableau 14) ; les ellipses reprenant 95% des points ainsi que les droites de régression avec intervalles de confiances sont représentées dans la partie inférieure de la table]	70

Figure 46 : Comparaison des moyennes annuelles par rapport à la moyenne globale, pour le paramètre « Défoliation corrigée » (Défoliation après déduction des effets aléatoires) ; les années dont le point est situé hors de la zone grisée (points rouges) présentent une moyenne significativement différente de la moyenne globale..... 72

Figure 47 : Table de corrélation entre les différentes variables associées aux individus (arbres) pour les chênes sessiles [les informations relatives aux différentes variables sont reprises dans la section méthodologique ci-dessus ; les coefficients de corrélation sont indiqués dans les bulles, dont la taille est inversement proportionnelle aux p-valeurs (cf Tableau 14) ; les ellipses reprenant 95% des points ainsi que les droites de régression avec intervalles de confiances sont représentées dans la partie inférieure de la table] 75

Figure 48 : Exemple de récupération d'un hêtre en 2020 après une importante perte de feuille en 2019 78

Table des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques et exemples de facteurs de dépérissement.	11
Tableau 2 : Températures et précipitations mensuelles durant la saison de végétation 2020 comparées aux normales mensuelles calculées sur la période 1981-2010 (IRM, Uccle)	17
Tableau 3 : Placettes des sous-échantillons. Les numéros à 4 chiffres correspondent aux identifiants des placettes, et les numéros entre parenthèse se réfèrent aux identifiants des arbres du suivi photo	19
Tableau 4 : Effectifs (placettes, arbres) lors des campagnes d'observation de 2009 à 2020	23
Tableau 5 : Moyenne des écarts de défoliation par essence observée en 2019 et résultats des tests t de Student	29
Tableau 6 : Estimation de la croissance annuelle en circonférence [Eq 1]	38
Tableau 7: Valeurs moyennes de défoliation par année (2009 – 2020) et par essence (les effectifs sont repris entre parenthèses).....	39
Tableau 8 : Corrélations entre la circonférence et la défoliation en fonction de l'essence et de l'année (Les coefficients en gras et marqués d'un astérisque indiquent que la corrélation est significative au seuil $\alpha = 0.05$)	45
Tableau 9: Résultats des régressions linéaires significatives (p valeur < 0.05) entre la circonférence (x ; cm) et la défoliation (y ; %) par année.	46
Tableau 10 : Estimation des coefficients « Année » selon les Modèles 2 et 3 pour les hêtres	60
Tableau 11 : Comparaison 2 à 2 des moyennes annuelles (Test de Student), pour le paramètre « Défoliation corrigée » (Défoliation après déduction des effets « individus ») ; les années ne présentant aucune lettre commune sont caractérisées par des moyennes significativement différentes ; les couleurs représentent l'ordre des moyennes annuelles (vert foncé = valeur la plus basse ; rouge foncé = valeur la plus élevée).....	61
Tableau 12 : Estimation du coefficient « Fructification annuelle moyenne » selon le Modèle 3 pour les hêtres.....	62
Tableau 13 : Comparaison 2 à 2 des moyennes annuelles (Test de Student), pour le paramètre « Défoliation de base » (Défoliation après déduction des effets « individus » et de l'effet « fructification moyenne ») ; les années ne présentant aucune lettre commune sont caractérisées par des moyennes significativement différentes les couleurs représentent l'ordre des moyennes annuelles (vert foncé = valeur la plus basse ; rouge foncé = valeur la plus élevée)	63
Tableau 14 : p-valeurs liées aux coefficients de corrélations pour les hêtres (valeurs significatives indiquées en gras)	65
Tableau 15 : Estimation des coefficients « Année » selon les Modèles 2 et Modèle 3 pour les chênes pédonculés	66
Tableau 16 : Comparaison 2 à 2 des moyennes annuelles (Test de Student), pour le paramètre « Défoliation corrigée » (Défoliation après déduction des effets « individus ») ; les années ne présentant aucune lettre commune sont caractérisées par des moyennes significativement différentes ; les couleurs représentent l'ordre des moyennes annuelles (vert foncé = valeur la plus basse ; rouge foncé = valeur la plus élevée).....	68
Tableau 17 : Estimation du coefficient « Fructification annuelle moyenne » selon le Modèle 3 pour les chênes pédonculés.....	68
Tableau 18 : p-valeurs liées aux coefficients de corrélations pour les chênes pédonculés (valeurs significatives indiquées en gras).....	71
Tableau 19 : Estimation des coefficients « Année » selon les Modèles 2 et Modèle 3 pour les hêtres 72	
Tableau 20 : Comparaison 2 à 2 des moyennes annuelles (Test de Student), pour le paramètre « Défoliation corrigée » (Défoliation après déduction des effets « individus ») ; les années ne présentant aucune lettre commune sont caractérisées par des moyennes significativement différentes ; les couleurs représentent l'ordre des moyennes annuelles (vert foncé = valeur la plus basse ; rouge foncé = valeur la plus élevée).....	73

Tableau 21 : Estimation du coefficient « Fructification annuelle moyenne » selon le Modèle 3 pour les hêtres.....	73
Tableau 22 : p-valeurs liées aux coefficients de corrélations pour les chênes sessiles (valeurs significatives indiquées en gras).....	76
Tableau 23: Dommages observés sur les hêtres et proportion des arbres affectés.....	77
Tableau 24: Dommages observés sur les chênes sessiles et proportion des arbres affectés.....	77

1. Contexte

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). 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 ».

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. De plus, les conditions édaphiques sont contraignantes car, à long terme, le sol à *fragipan* restreint l'ancrage racinaire des arbres, ainsi que l'alimentation hydrique et minérale (Daise *et al.*, 2011). Par ailleurs, le sol limoneux de la forêt de Soignes est très sensible au tassement résultant d'exploitations forestières et d'une fréquentation intense. Enfin, la composition de la forêt de Soignes est caractérisée par un déséquilibre de la structure des âges et un manque de résilience des peuplements âgés.

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 CO₂ 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).

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. 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 été et un échantillon d'arbre sont systématiquement photographiés à partir de points fixes au sol.

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). Comme indiqué

précédemment (point 1), 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 (Nageleisen, 1993) (voir Tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques et exemples de facteurs de dépérissement.

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

2. Objectifs

Les objectifs principaux du suivi de l'état sanitaire sont, d'une part, d'évaluer l'état de santé actuel 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.

3. Description de la forêt de Soignes

3.1. 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.

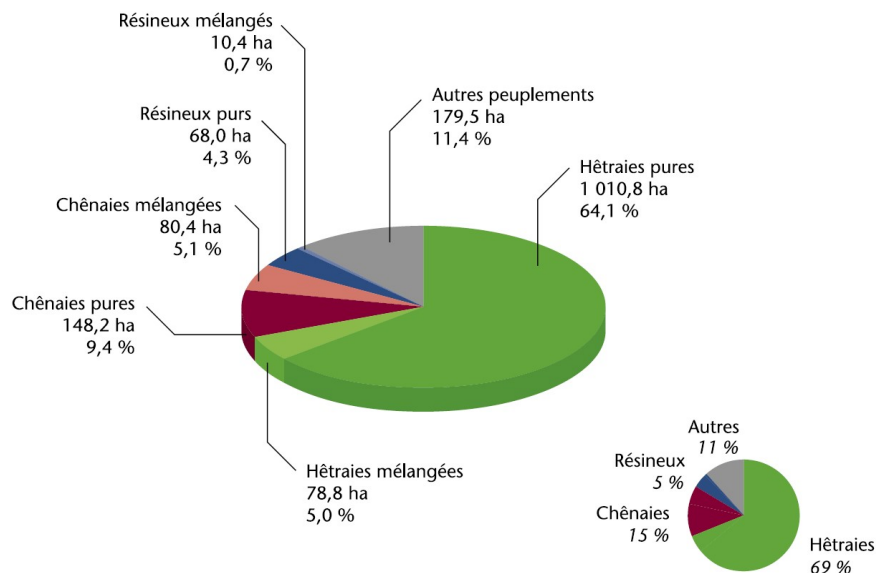


Figure 1: Proportion des types de peuplements en forêt de Soignes bruxelloise (Braem *et al.*, 2010)

3.2. 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

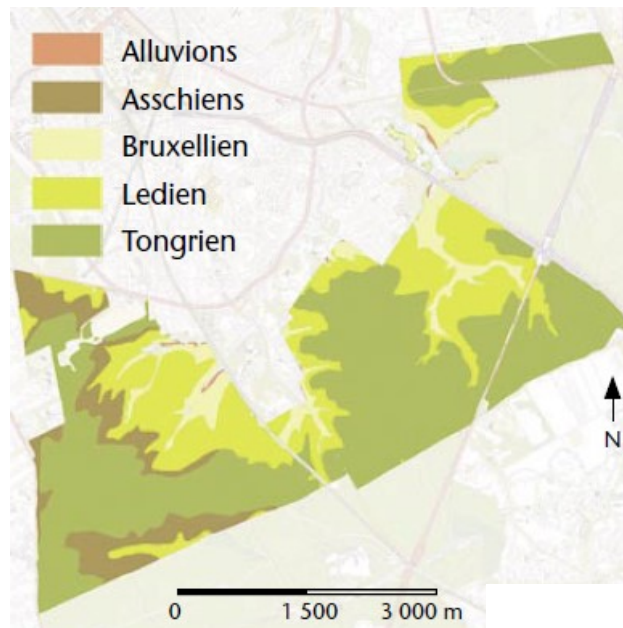


Figure 2: Roche-mère géologique présente sous le limon éolien. Les teintes jaunes présentent les assises à dominance sableuse (source: carte géologique de la Belgique, numérisation: BE-IBGE)

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 H₂O de l'ordre de 3,5 à 4,5) et plus élevée entre 2 et 4 mètres de profondeur (pH H₂O 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.

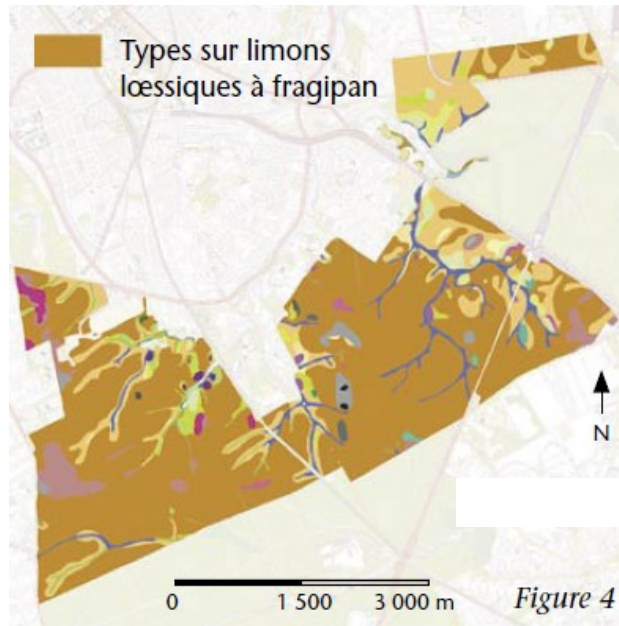


Figure 3 : Les sols de la Forêt de Soignes sont dominés par le type Abc interprété comme étant un sol limoneux à fragipan (source: cartes des sols de Belgique; numérisation BE-IBGE)

3.3. 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.

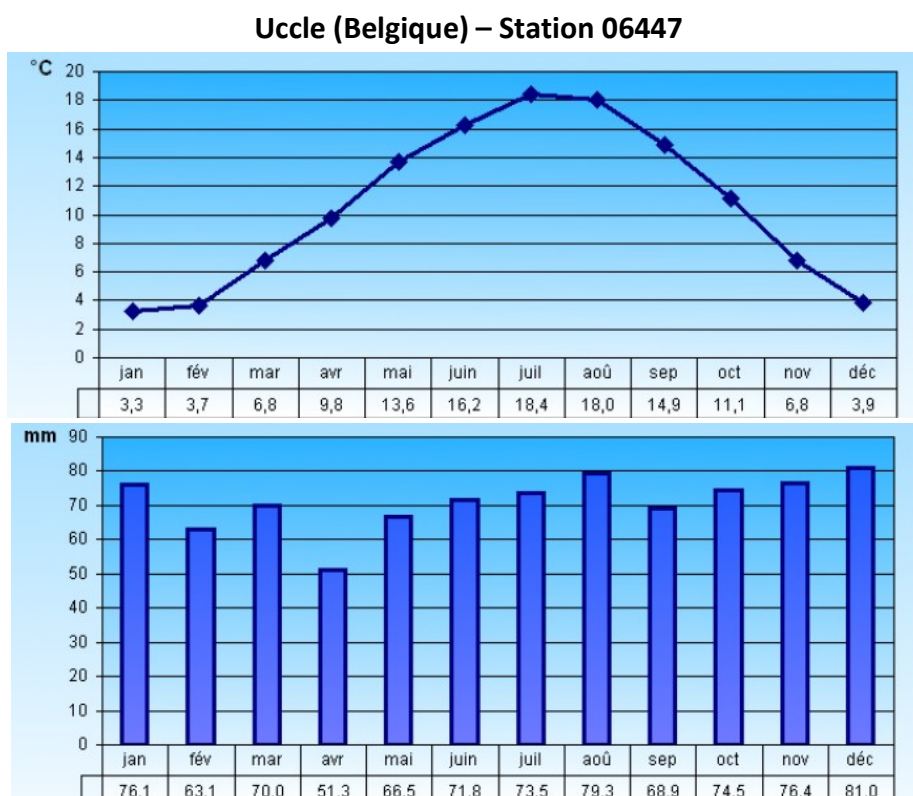


Figure 4 : Température et précipitations mensuelles mesurées à la station météorologique d'Uccle, 1981-2010 (IRM, 2011).

Les valeurs climatologiques mesurées à Uccle durant la période de végétation de 2020 sont présentées au

Tableau 2. Par rapport aux normales mensuelles observées de 1981 à 2010, les températures moyennes sont anormalement élevées en avril et août. Un épisode caniculaires intense et prolongé a eu lieu durant la 2^e décade du mois d'août. Les précipitations du mois de mai sont extrêmement faibles, mais elles sont également nettement inférieures aux normales en avril, juillet et août. Globalement, la période de végétation peut être qualifiée de « très sèche », et « très chaude ».

Tableau 2 : Températures et précipitations mensuelles durant la saison de végétation 2020 comparées aux normales mensuelles calculées sur la période 1981-2010 (IRM, Uccle)

	Préc (mm)	Préc normale (mm)	T° moy (°C)	T° normale (°C)
Avril 2020	19.0	51,3	12.6	9.8
Mai 2020	5.4	66,5	14.2	13.6
Juin 2020	69.4	71,8	17.5	16.2
Juillet 2020	47.4	73,5	17.9	18.4
Août 2020	51.4	79,3	20.9	18
Sept. 2020	101.8	68.9	16.4	14.9
Avril-Sept	294	412	16.6	15.2

4. Mise en place de la campagne du suivi sanitaire de 2020

Les activités suivantes ont été réalisées en 2020 :

- (i) Le suivi de l'état sanitaire de 24 placettes de la forêt de Soignes, incluant :
 - a. Les observations réalisées par les adjoints forestiers conformément au protocole *ICP Forests*
 - b. La mise en place du suivi photographique des houppiers
- (ii) Le contrôle qualité, comprenant
 - a. La formation pratique des adjoints forestiers le 03 juillet 2020
 - b. La revisite de 10 placettes du suivi sanitaire par l'UCLouvain
- (iii) Le traitement et l'interprétation des données

4.1. Plan d'échantillonnage

Dans un souci de représentativité des peuplements de la forêt de Soignes bruxelloise (§ 3.1.), les 34 placettes de suivi sanitaire sont situées exclusivement dans les peuplements de chênes et de hêtres, purs ou mélangés, de plus de 60 ans. 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. Les 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 grille des 34 placettes du suivi sanitaire a été partagée en trois sous-échantillons (Braem, 2009). Le premier, visité tous les ans, est 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 (Tableau 3 et Figure 5).

Les placettes observées en 2020 n'ont subi aucune coupe importante au cours de ces 2 dernières années d'observations. Le plan d'échantillonnage n'a donc pas été modifié.

Dans un souci de continuité, nous nous basons sur le plan d'échantillonnage suivi lors des années précédentes. Dans ce protocole, les visites en hêtraie ont été planifiées en alternant 2 sous-échantillons de placettes sur une base bisannuelle. Cette alternance permet de disposer d'un échantillon largement représentatif des situations (sol, âge, ...), tout en limitant le travail de terrain. Toutefois, cette alternance engendre des soucis pour les analyses statistiques relatives à l'évolution inter-annuelle, ainsi que et pour l'interprétation des résultats du suivi photographique.

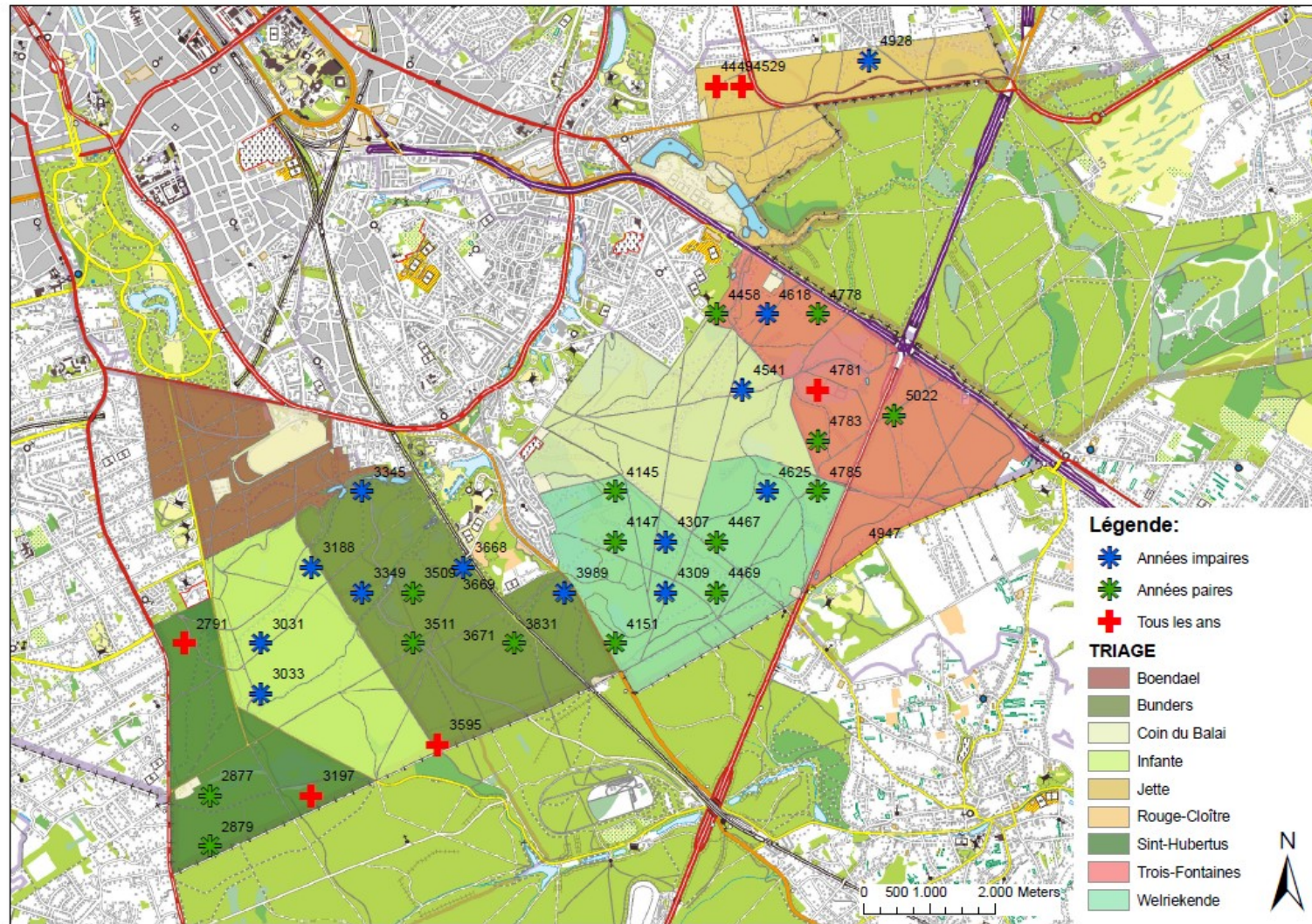
Nous avons donc introduit depuis 2018 une modification du plan d'échantillonnage, consistant à effectuer un suivi annuel (bisannuel jusqu'alors) sur les hêtres faisant l'objet du suivi photographique (cf Annexe), soit 30 arbres. Ce sous-échantillon, sélectionné pour être représentatif de l'échantillon global, permettra d'établir une continuité des observations et servira de lien entre les deux sous-échantillons « années paires » et « années impaires » pour les analyses statistiques.

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 »).

Pour les hêtres non sélectionnés pour le suivi photographique, l'évaluation continue à être effectuée selon une alternance bisannuelle comme indiqué dans la table ci-dessous.

Tableau 3 : Placettes des sous-échantillons. Les numéros à 4 chiffres correspondent aux identifiants des placettes, et les numéros entre parenthèse se réfèrent aux identifiant des arbres du suivi photo

	Années paires (12 placettes)	Années impaires (10 placettes)
Placettes en hêtraie	2877, 2879, 3831, 4145, 4147, 4458, 4467, 4469, 4778, 4783, 4785, 5022	3031, 3033, 3345, 3349, 3668, 3989, 4309, 4541, 4618, 4928
Placettes en chênaie	2791, 3197, 3595, 4449, 4529, 4781 (6 placettes)	
Arbres du suivi photo	2877 (5, 7, 8, 9, 10), 2879 (1), 3031 (2, 4, 5, 6, 9), 3345 (2, 4), 3349 (2, 3), 3989 (2), 4145 (1, 8), 4147 (18, 19, 20), 4309 (1, 2, 3, 4, 5), 4469 (2, 3, 4), 4618 (7, 12), 4778 (15), 5022 (2)	



Author: A. Delente (2013)

Figure 5: Localisation des placettes en hêtraie (étoiles bleues et vertes) et chênaie (croix rouges)

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 (4 cette année).
- les arbres dominants ou co-dominants dont le houppier capte la lumière directe. Les arbres surcimés 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 nouvelles placettes de remplacement depuis 2013. Les anciennes 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

En 2020, la campagne d'observation a été coordonnée par MM. Bram Aertsen et Bart Swerts désignés correspondants-observateurs parmi les adjoints forestiers.

4.2. Protocole d'évaluation

Le protocole suivi lors de la campagne a été conçu dans le cadre du programme international concerté sur les forêts (*JCP Forests*). L'objectif est d'évaluer différents critères tels que la défoliation, la décoloration, la fructification, les dommages afin d'estimer la vitalité de l'arbre. Pour chacun des arbres, trois types d'observations sont réalisées : (i) la description des conditions d'observation, (ii) l'évaluation de l'état du houppier et (iii) la description des dommages (Eichhorn *et al.*, 2010).

Chaque arbre observé porte un numéro et se localise grâce à l'azimut et à la distance mesurés à partir du centre de la placette. Les observations sont notées sous forme de codes chiffrés sélectionnés parmi une liste de choix multiples, repris dans le document de terrain « aide-mémoire ». L'évaluation de l'état du houppier est effectuée dans la partie appelée « couronne observable », définie par la partie du houppier non concurrencée par les arbres voisins, ni par la partie supérieure de ce même houppier. Les dommages sont, quant à eux, estimés sur les différentes parties de l'arbre (houppier, tronc, collet).

4.3. La défoliation, indicateur de vitalité des arbres

La défoliation et la transparence de la couronne sont les indicateurs généralement utilisés pour estimer la vitalité des arbres dans les programmes de monitoring (Dobbertin, 2005). En effet, la défoliation est un critère intégrateur qui reflète l'influence des conditions stationnelles (sol, historique du site, etc.), des caractéristiques individuelles (âge, provenance), des fluctuations

climatiques (sécheresse), des facteurs de stress (champignons, insectes), des facteurs anthropiques (exploitation, coupes, etc.). En revanche, il faut garder à l'esprit que la défoliation est un bon indicateur reflétant la perte de vitalité mais il ne permet pas à lui seul de mettre en évidence l'ensemble des facteurs affectant la santé de l'arbre. De plus, la réduction de la biomasse foliaire peut être considérée comme un mécanisme de régulation transitoire et non comme un mécanisme de dépérissement lorsque cette diminution est réversible. Notons toutefois une exception, celle du rabotage de cime qui est un processus de réversibilité « apparente » puisqu'il ne reflète pas un regain de vitalité.

Par ailleurs, il faut rester prudent dans l'interprétation des résultats car l'évaluation de la défoliation présente certaines faiblesses, présentées ci-dessous.

La cime observable évolue dans le temps car d'une part, (i) les coupes réalisées au sein des placettes modifient l'état de concurrence des cimes et donc les conditions de visibilité qui influencent, selon les cas, la note de défoliation et d'autre part, (ii) la cime est reconstituée par le développement de branches basses lorsque, par un phénomène de descente de cime, les branches situées au sommet de la couronne perdent leur vitalité, meurent et tombent sous l'effet du vent. Le suivi photographique des houppiers à partir du sol, mis en place en 2015 sur une sous-échantillon de 40 arbres, pourrait notamment permettre de suivre l'évolution de la cime observable et de mieux comprendre les évolutions de la défoliation.

D'autre part, la cotation d'un arbre laisse place à une certaine subjectivité qui varie d'un observateur à l'autre. C'est pourquoi, des séances d'inter-calibration sont indispensables pour minimiser le biais causé par l'effet observateur.

A une échelle plus large, la sélection de nouvelles placettes plus ou moins jeunes peut faire varier la distribution des arbres en termes de circonférence et introduire un biais dans l'analyse de l'évolution de l'état sanitaire. De fait, les arbres d'intérêt diffèrent d'une année à l'autre suite notamment au remplacement des placettes régénérées. De plus, une diminution du déficit foliaire moyen pourrait être due à l'enlèvement préférentiel d'arbres dépérissants lors des éclaircies. L'évolution dans le temps de la moyenne globale doit donc être interprétée avec prudence. Afin d'éviter ces biais, il est possible d'étudier l'évolution d'un sous-échantillon d'arbres dont l'état sanitaire a été évalué sur l'ensemble de la période considérée. Toutefois, cette approche peut induire un biais en sens opposé puisque les arbres présentant une défoliation importante en début de période ont plus de chance d'être exclus de l'échantillons. Nous avons dès lors développé une approche statistique qui tient compte de l'ensemble des arbres, et qui est basée sur la moyenne de l'évolution et non sur l'évolution de la moyenne.

4.4. Caractéristiques des arbres observés

4.4.1. Effectifs et distribution des arbres en classes de grosseurs

Depuis 2012, aucun remplacement de placette n'est intervenu, mais les effectifs sont en diminution progressive (Tableau 4). Certaines placettes ont en effet subi des éclaircies après identification des arbres d'avenir, avec comme corollaire, l'enlèvement de quelques arbres dans les placettes du suivi sanitaire. Ces coupes étant faibles et réparties sur l'ensemble de la forêt, la bonne représentativité de l'échantillonnage au niveau de la forêt de Soignes bruxelloise est maintenue. De plus certains arbres ne sont plus inclus dans l'échantillon à partir du moment où ils sont dominés. D'autres part, certains nouveaux arbres sont inclus dans l'échantillon à partir du moment où ils ont atteint la circonférence de 80 cm, considérée comme le seuil de sélection. La modification du plan d'échantillonnage en 2018 a également induit quelques modifications mineures du nombre d'individus.

Tableau 4 : Effectifs (placettes, arbres) lors des campagnes d'observation de 2009 à 2020

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Placettes	34	21	19	21	19	21	19	21	19	22	23	24
Chênes pédonculés	9	52	1	37	47	45	45	44	43	40	42	39
Chênes sessiles	1	7		10	7	10	8	8	7	10	9	10
Chênes non déterminé	2	1					1		1			
Hêtre	119	99	70	111	102	124	106	119	106	109	104	116
Total arbres	131	159	71	161	157	179	160	171	157	159	155	165

Parmi ces arbres, certains n'ont pas reçu de cotation pour la défoliation en raison d'une visibilité trop réduite. Dès lors, les analyses statistiques pour 2020 portent sur un échantillon plus restreint : **94** hêtres, **29** chênes pédonculés et **10** chênes sessiles.

La ventilation des effectifs retenus selon les classes de circonférence est illustrée à la Figure 6.

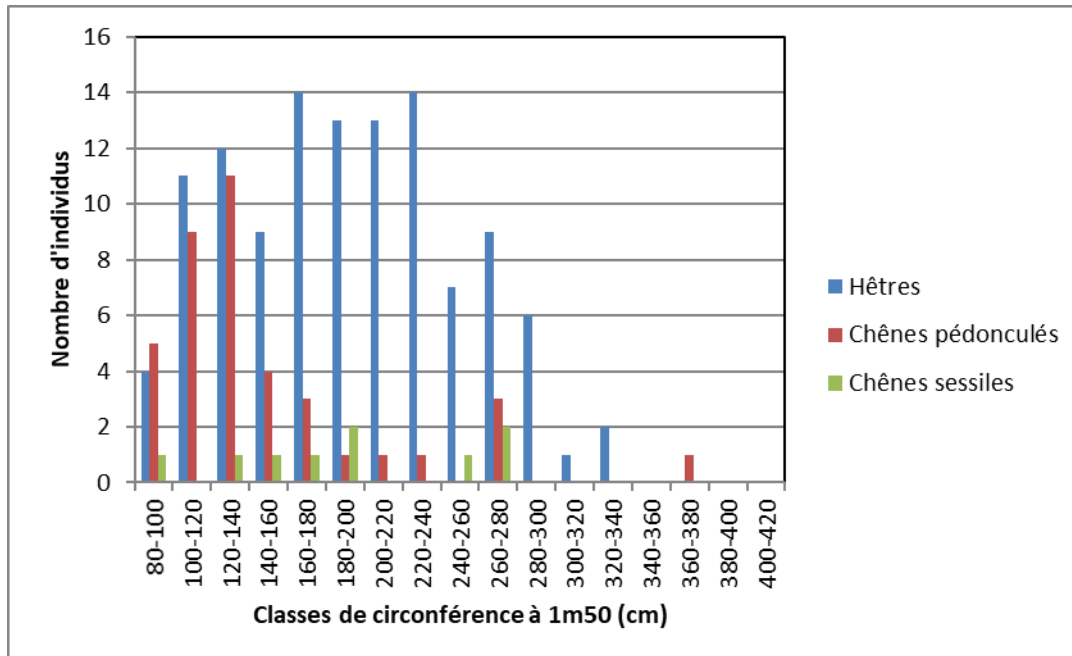


Figure 6 : Distribution des arbres de l'échantillon analysé en 2020 selon les classes de circonférence

4.4.2. Concurrence – Indice d’ombrage

La concurrence donne une indication quant à l’espace disponible pour le développement de la couronne. L’indice d’ombrage observé sur le terrain reflète donc la fermeture locale du couvert grâce à l’évaluation du nombre de côtés du houppier en contact avec d’autres cimes. Cet indice est distribué en 5 classes allant de « croissance libre » à « couronne touchée par quatre côtés ». Les arbres en sous-étage sont exclus de cet échantillon. Il est important de mentionner que ce critère ne concerne que la situation actuelle ; de nombreux arbres en croissances libres ou faiblement concurrencés ont été débarrassés de leurs concurrents lors de récentes coupes d’éclaircies.

La plupart des hêtres et des chênes pédonculés sont touchés par 3 ou 4 côtés, tandis que les chênes sessiles sont moins concurrencés ; la plupart d’entre eux sont en contact avec les houppiers voisins sur 2 côtés.

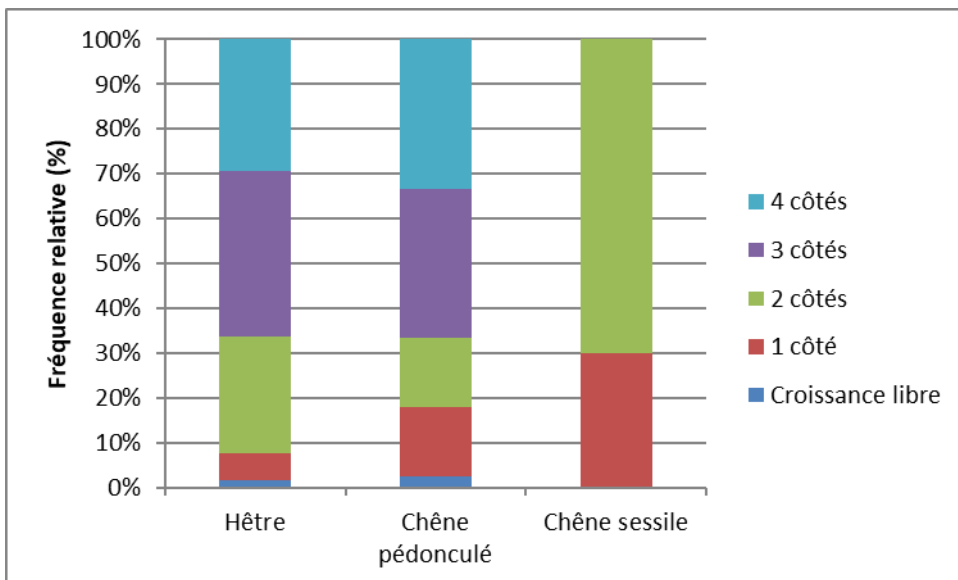


Figure 7 : Distribution des arbres selon le degré de concurrence pour l’échantillon analysé en 2020

4.4.3. Statut social

Selon le protocole standardisé, le statut social est la mesure de la hauteur relative d'un arbre par rapport aux arbres environnants. Cette information permet d'interpréter l'état de la couronne et sa sensibilité aux stress. Quatre statuts sociaux sont définis (Eichhorn *et al.*, 2010) :

- i. Dominant : arbre dont la couronne dépasse le niveau moyen de la canopée ou qui est actuellement en croissance libre ;
- ii. Codominant : arbre dont la couronne s'insère dans le niveau moyen de la canopée ;
- iii. Sous-dominant : arbre dont la couronne, bien qu'insérée dans la canopée, est légèrement en dessous de la hauteur moyenne de la canopée ;
- iv. Dominé : arbre largement surcimé par les houppiers voisins et ne recevant aucune lumière directe. Ces arbres ne sont pas inclus dans l'échantillon.

Comme l'indique la Figure 8, le statut « arbre codominant » est le mieux représenté : 90% des chênes pédonculés, 55% des hêtres et 45% des chênes sessiles sont co-dominants.

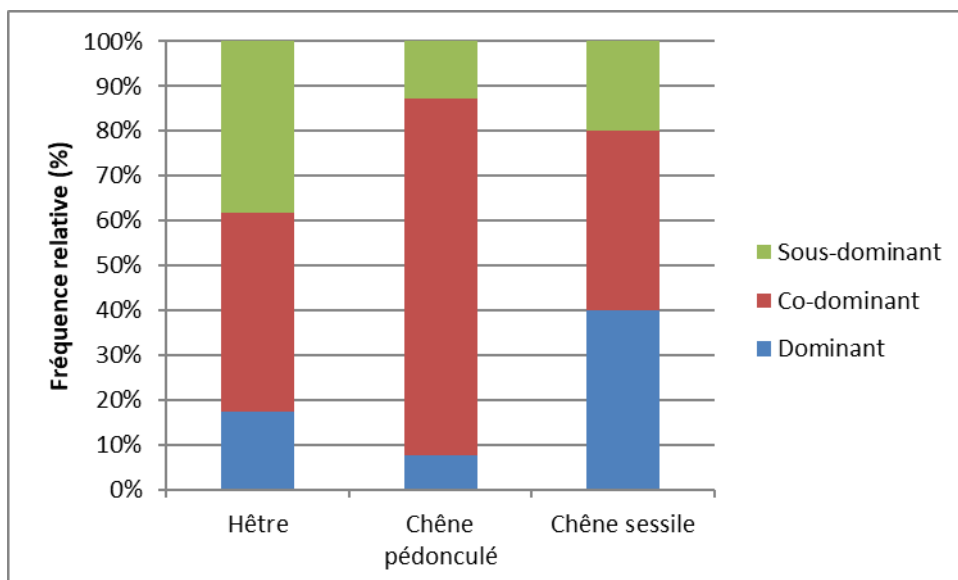


Figure 8 : Proportion des statuts sociaux en fonction des essences pour l'échantillon analysé en 2020

4.4.4. 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, la partie observable est extrapolée à l'ensemble de la couronne. Dans certains cas de non visibilité, les observateurs se sont abstenus de toutes cotations relatives à la défoliation, à la décoloration et la fructification. Les arbres concernés sont exclus de cet échantillon.

La Figure 9 indique que parmi les arbres cotés pour la défoliation (constituant l'échantillon pour les analyses statistiques), seuls 12% des chênes sessiles, et 28% des chênes pédonculés et 42% des hêtres présentent une couronne bien visible. Pour 8% des hêtres et 45% des chênes sessiles, la couronne est non visible latéralement, ce qui signifie que ces arbres ont été observés par le bas.

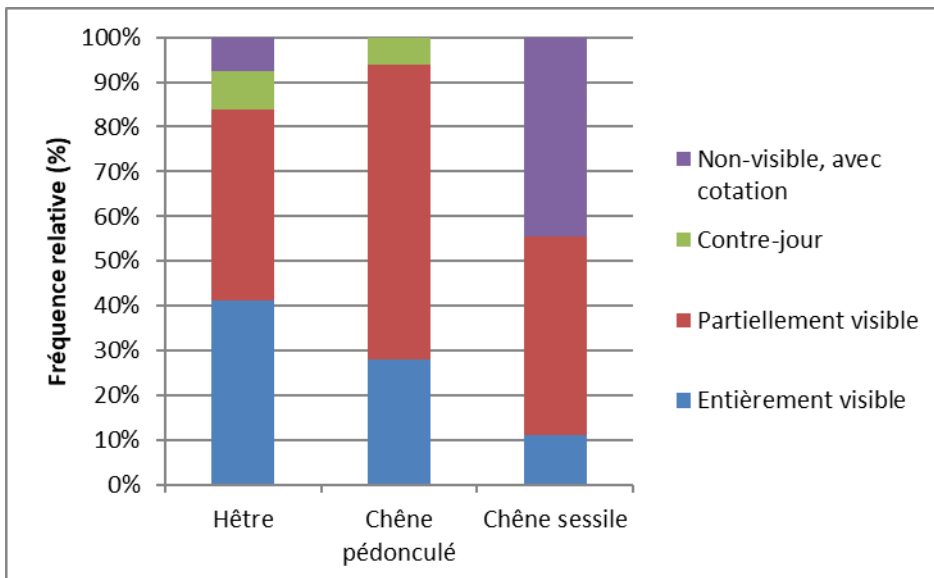


Figure 9 : Distribution des arbres en fonction de la visibilité et de l'essence pour l'échantillon analysé en 2020

Si l'on se réfère à l'ensemble des arbres observés non dominés, nous constatons qu'une proportion significative d'arbres (15% des hêtres et 25% des chênes pédonculés) n'ont pas reçu de cotation pour la défoliation en raison de leur très mauvaise visibilité (Figure 10). Vu qu'il s'agit essentiellement de jeunes arbres dans des peuplements encore denses, nous pouvons suspecter que leur exclusion provoque un biais dans les résultats : valeurs de défoliation moyennes surestimées. Toutefois, l'attribution d'une cote de défoliation dans ces conditions est extrêmement délicate.

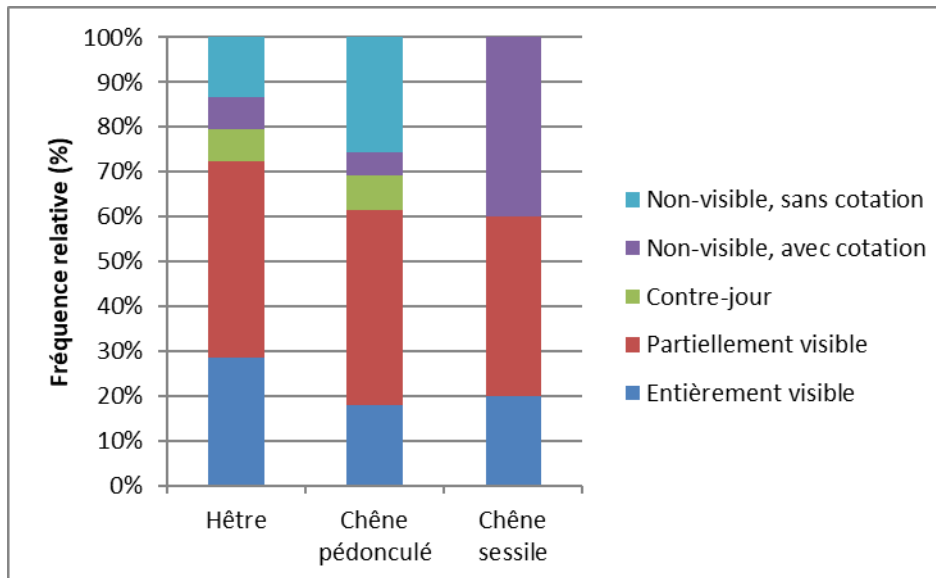


Figure 10 : Distribution des arbres selon la visibilité pour l'ensemble des arbres non dominés observés en 2020.

4.5. Encodage et traitement des données

L'ensemble des données recueillies durant la campagne 2020 ont été encodées dans la base de données MS Access. Les traitements statistiques ont été effectués via l'interface *JMP pro 14*, qui fait appel au système SAS.

4.6. Contrôle-qualité

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^e brigade. Cette méthode assure

l'observation d'arbres présentant des morphologies et des états sanitaires variés en minimisant le temps de déplacement.

Pour assurer le contrôle-qualité des données, l'équipe de référence de l'UCL a revisité 10 placettes réparties sur les deux brigades durant le mois de juillet (n° 3989, 4449, 4781, 4529, 3197, 2791, 2879, 2877, 4147, 4785). Au sein de ces placettes de contrôle, l'ensemble des observations se rapportant aux conditions d'observation, à l'état du houppier et à l'évaluation des dommages et symptômes a été relevé.

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'UCL). L'objectif est que 70% des arbres observés deux fois aient la même cotation de défoliation à 10% près (Eichhorn *et al.*, 2010).

Un total de 64 arbres a été contrôlé, comprenant 35 hêtres, 19 chênes pédonculés et 10 chênes sessiles, soit respectivement 33%, 49% et 100% des effectifs retenus pour le diagnostic sanitaire (voir Tableau 1).

La proportion de cote de défoliation ne variant pas de plus de 10% près entre les deux équipes atteint 85% pour les hêtres, 73% pour les chênes pédonculés et 60% 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 : Moyenne des écarts de défoliation par essence observée en 2019 et résultats des tests t de Student

	Effectif de contrôle	Proportion contrôlée (%)	Défoliation moyenne UCL (%)	Défoliation moyenne BE- (%)	Moyenne des écarts BE – UCL(%)	Résultat test t de Student
Hêtres	35	33	33.1	30.6	-2.5	Prob.> t = 0.96 (n.s.)
Chênes pédonculés	19	49	23.1	23.9	+0.8	Prob.> t = 0.38 (n.s.)
Chênes sessiles	10	100	14.5	27	+12.5	Prob.> t = 0.003 (**)

D'autre part, nous observons que la moyenne des écarts de défoliation entre IBGE et l'UCL est de -2.5 % pour les hêtres, de +0.8% pour les chênes pédonculés et de +12.5% pour les chêne sessile (Tableau 5). Les tests appariés (Student) ainsi que les graphes comparatifs (Figure 11) montrent que les écarts observés pour les hêtres et les chênes pédonculés, ne sont pas significatifs. L'écart moyen est très élevé pour le chêne sessile, mais il est lié à une forte différence sur 3 arbres (Figure 11). Pour un de ces arbres (4529-16), la couronne a été fortement déformée suite à la concurrence passée, rendant la délimitation de la zone à observer très délicate. Pour les deux autres (4147-19 et 4147-20), la

fructification était très abondante. Or, comme l'ont mentionné les agents observateurs, les fruits sur les chênes étaient particulièrement abondants cette année et se sont fortement développés fin juillet, au point de faire plier les branches et d'engendrer une possible surestimation des défoliations pour les placettes visitées en août. Il s'avère en effet que ces 2 arbres à fructification exceptionnelle ont été contrôlés au mois de juillet et observés par les agents en août.

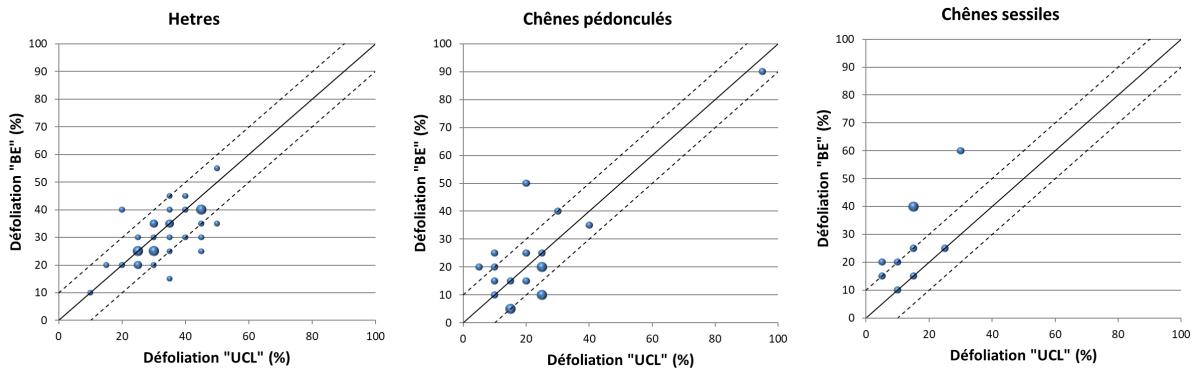


Figure 11 : Comparaison des valeurs de défoliation selon les équipes BE et UCL en 2020 ; la surface des bulles illustre le nombre de points de mêmes coordonnées ; la droite continue correspond au rapport 1:1 ; les droites pointillées correspondent aux seuils de +/- 10 %.

Les résultats sont donc globalement excellents, à l'exception de quelques chênes présentant d'importants écarts de cotations. La fructification exceptionnelle des chênes sessiles cette année, couplée au décalage entre les dates des deux visites, pourrait toutefois être responsable de certains de ces écarts.

5. Résultats et discussions

5.1. 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.). Par ailleurs une fructification abondante est fréquemment constatée l'année qui suit une sécheresse (Nageleisen *et al.*, 2010).

Chez les hêtres, l'année 2020 est marquée par une fructification forte, mais pas exceptionnelle (Figure 12). Après une perturbation en 2013-2014, qui pourrait être liée à de fortes gelées tardives en 2013, la fructification du hêtre a repris depuis 2016 son cycle bisannuel caractéristique. Notons également que l'intensité de la fructification des hêtres ne présente pas d'évolution significative sur la durée de la période.

Chez les chênes, après une réduction en 2019, la fructification atteint à nouveau les niveaux exceptionnels de 2018. Globalement, l'intensité de la fructification a nettement augmenté depuis 2016. Les observateurs ont mentionné que sur certains arbres, l'abondance de glands était telle que les branches pliaient.

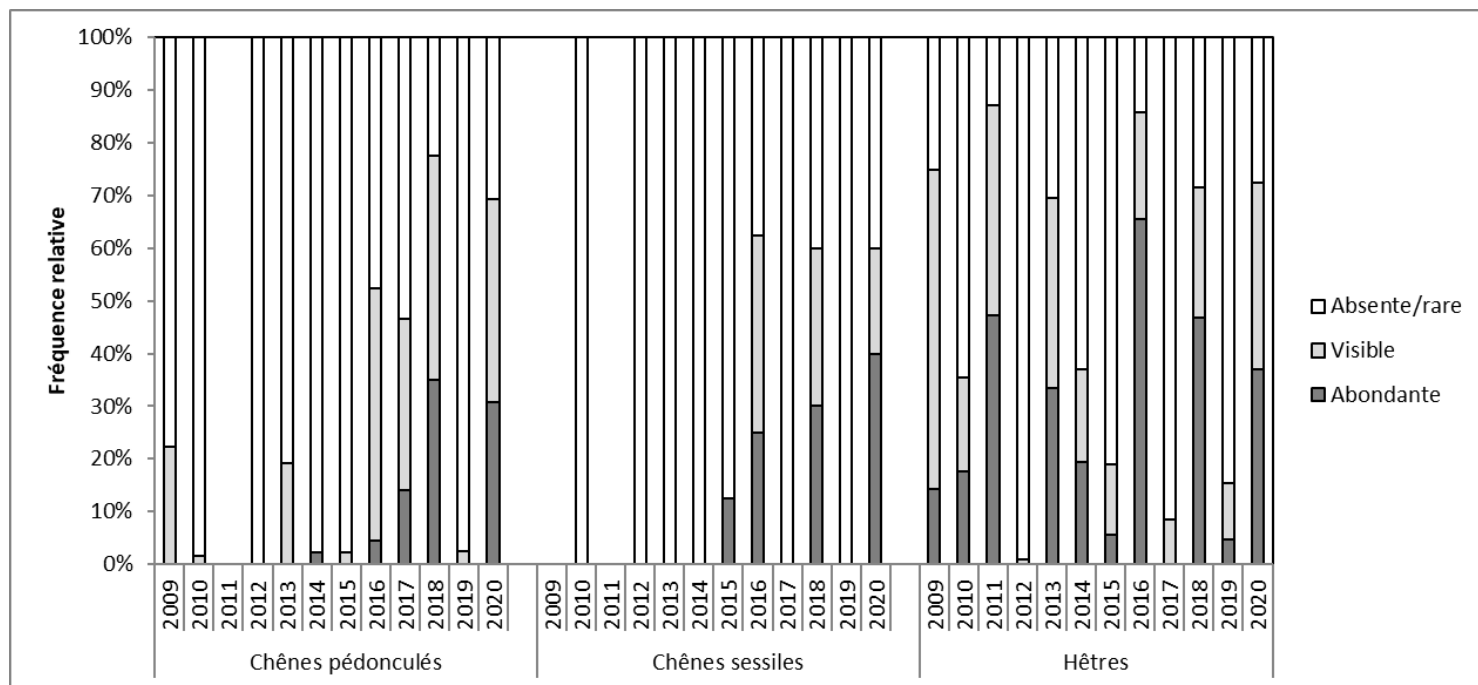


Figure 12 : Evolution de l'intensité de la fructification de 2009 à 2020 pour les chênes et les hêtres

5.2. 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 13) en fonction de la forme de la partie supérieure de la couronne et du développement de ces rameaux.

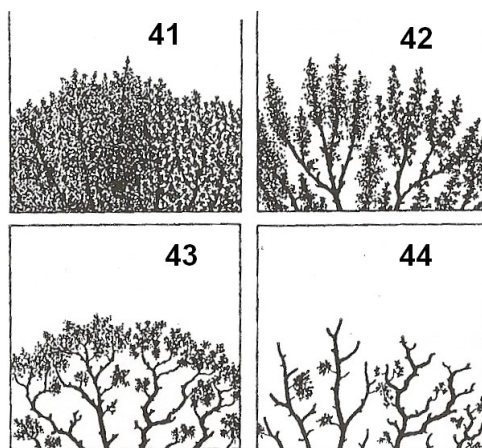


Figure 13 : Les quatre formes de houppier des chênes, avec leurs codes (Eichhorn et al., 2010)
41 : ramification dense ; 42 : simplification légère ; 43 : simplification importante ; 44 : déclin

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 14 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)

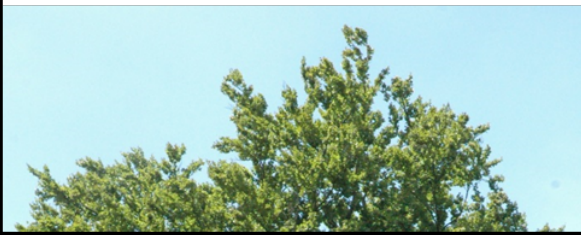
Forme 1 : les pousses apicales et les bourgeons latéraux forment de longs rameaux en éventails



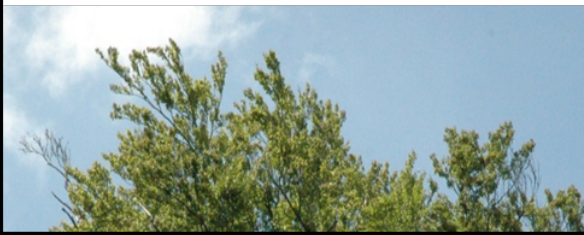
Forme 2 : les rameaux latéraux se raccourcissent.



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 »)

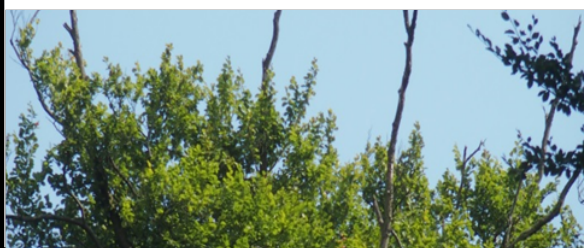


Figure 14: Fiche de terrain différenciant les 8 formes du houppier du hêtre

Nous observons une dégradation de la structure des chênes pédonculés de 2017 à 2020 (Figure 15), mais les formes les plus dégradées restent largement minoritaires et ne présentent pas d'augmentation régulière. La structure des chênes sessiles (Figure 16) s'est brusquement dégradée en 2018 et est restée stable ensuite. La ramification dense reste toutefois majoritaire.

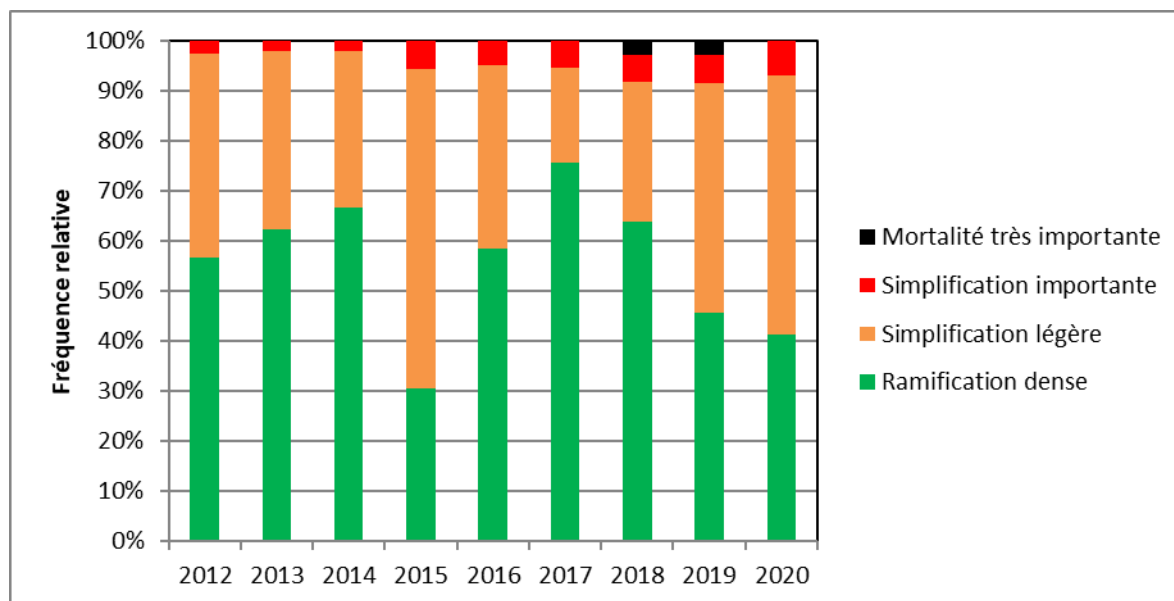


Figure 15 : Distribution des chênes pédonculés selon la structure de la couronne

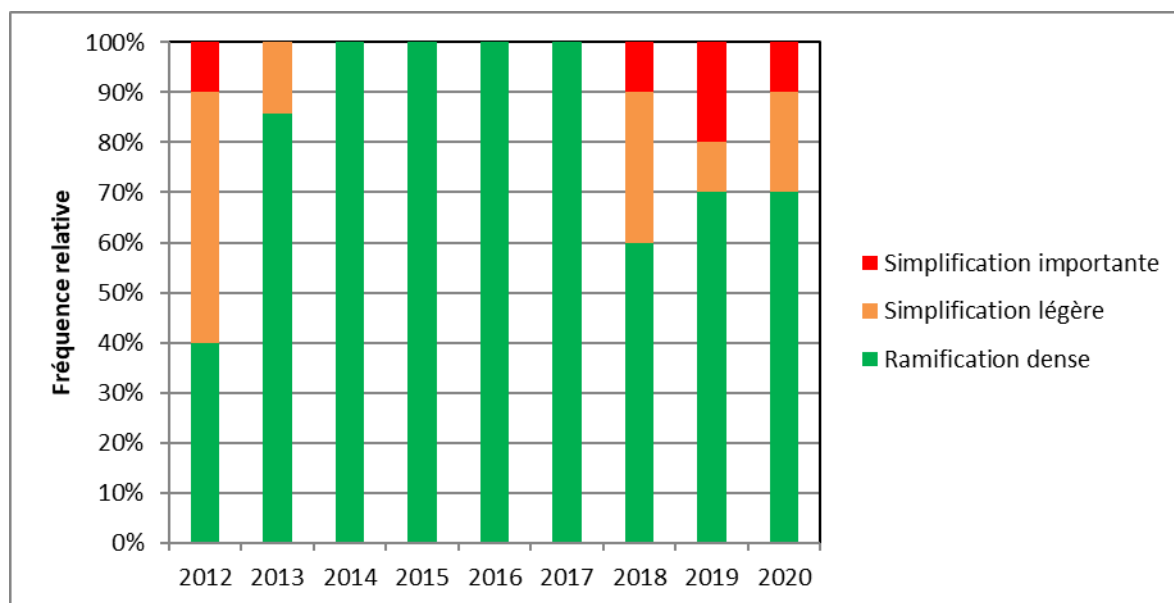


Figure 16 : Distribution des chênes sessiles selon la structure de la couronne

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 ainsi que par les pics de fructification. Nous pouvons toutefois observer sur l'ensemble de la période 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 17). La fréquence cumulée des classes les plus dégradées (5 à 7) ne présente pas d'évolution régulière et s'élève à 18% en 2020, tout comme en 2015.

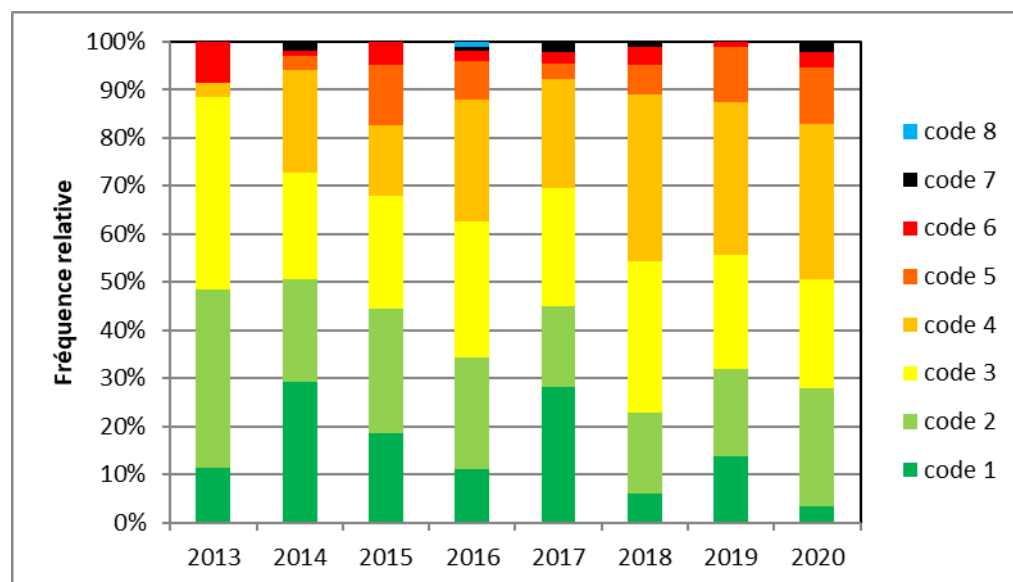


Figure 17 : Distribution des hêtres selon la structure de la couronne; la signification des codes est donnée à la Figure 14.

5.3. 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 2020 (Figure 18). Chez les hêtres, les gourmands sont peu fréquents et en lente diminution.

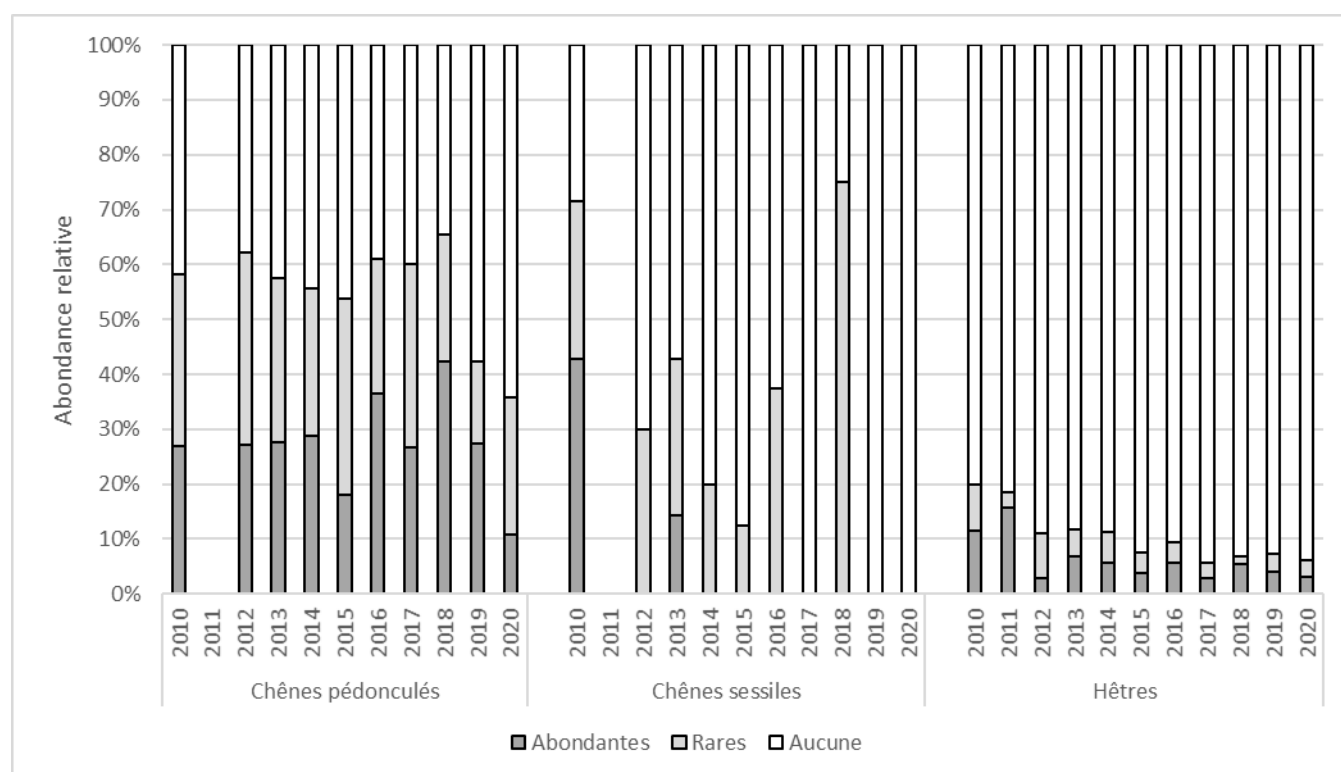


Figure 18 : Distribution des arbres selon l'abondance des pousses épïcormiques

5.4. 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.

En 2020, près de 30% des hêtres présentaient une décoloration supérieure à 10%, tout comme en 2017 et 2019. Par contre, l'intensité de la décoloration est en augmentation par rapport à 2017 : en 2020, 4% des individus sont considérés comme sévèrement décolorés (>60%), tandis que 4% sont modérément décolorés (25-60%). En analysant les résultats en détails, nous constatons que les arbres décolorés ont tous été observés les 6 et 7 août. La vague de chaleur, qui a culminé entre le 10 et le 16 août ne peut donc être incriminée. Par contre, le pic de chaleur qui s'est produit le 31 juillet pourrait en être responsable. Notons que l'augmentation de l'intensité de la décoloration en 2019 pourrait également s'expliquer par les températures extrêmes observées fin juillet 2019. Un éventuel effet de la fructification de l'année antérieure, énoncé dans le rapport 2019, ne permet pas d'expliquer les observations de 2020.

Les chênes sont généralement faiblement décolorés, sauf en 2012. Nous constatons toutefois en 2020 que quelques individus de chênes pédonculés sont caractérisés par des niveaux de décoloration modérée à sévère. Chez les chênes, la décoloration est souvent associée au développement de l'oïdium sur les pousses épïcormiques.

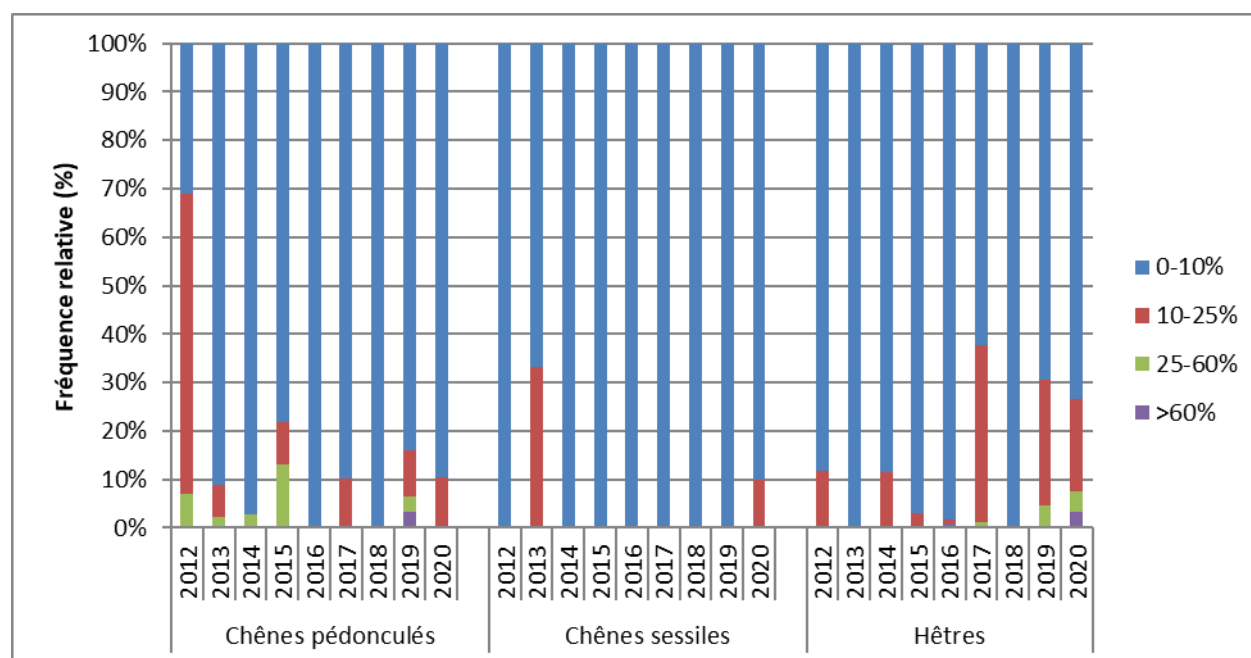


Figure 19 : Distribution des arbres selon le pourcentage de décoloration du feuillage

5.5. Croissance

Nous avons estimé la croissance annuelle moyenne en circonférence des arbres (cm an⁻¹) sur la période d'étude sur base d'un modèle linéaire mixte (facteurs aléatoires en italique) :

[Modèle 1] Circonférence = f(Constante + Année + Individu + Année(Individu))

Tableau 6 : Estimation de la croissance annuelle en circonférence [Modèle 1]

Essence	Coefficient annuel	Prob. > t	IC95 (min)	IC95(max)
Hêtre	1.24	<.0001	1.09	1.39
Chêne pédonculé	1.46	<.001	1.05	1.87
Chêne sessile	2.12	<.001	1.51	2.73

La croissance annuelle moyenne en circonférence sur la période de suivi (2009-2020) est de 1.24 cm/an pour les hêtres, 1.46 cm/an pour les chênes pédonculés et 2.12 cm/an pour les chênes sessiles. Les coefficients individuels (facteurs aléatoires) seront analysés en détails dans la section 5.6.4.

La conversion de ces coefficients en « croissances radiales » nous donne les valeurs de 1.97 mm/an pour les hêtres, 2.33 mm/an pour les chênes sessiles et 3.38 mm/an pour les chênes pédonculés.

La croissance radiale moyenne pour les hêtres sur la période 2009-2020 est donc très similaire aux valeurs mesurées durant la fin de la période couverte par l'étude dendrochronologique sur la forêt de Soignes (https://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/ART_201512_DendrochronoHetreSoignes_VF) : fluctuations entre 1.3 et 2.8 mm/an durant la période 1990-2008 [nb : il s'agit bien de mm/an et non de cm/an comme indiqué à la figure 2].

5.6. Défoliation

5.6.1. Défoliation moyenne par essence

L'évolution de la défoliation moyenne est reprise dans le Tableau 7 tandis que la distribution des valeurs est synthétisée à la Figure 20. Notons que les arbres dominés sont exclus de l'échantillon et que les effectifs varient d'une année à l'autre en raison de l'alternance bisannuelle des placettes en hêtraie, d'amélioration ou de détérioration de la visibilité, de coupes, d'éclaircies, d'inclusion d'arbres ayant atteint le seuil de circonférence de 80 cm.

L'évolution de ces moyennes est décrite brièvement ci-dessous à titre indicatif. Nous observons en 2020 une défoliation moyenne de 33% pour les hêtres, ce qui constitue une légère augmentation par rapport à 2019, mais une apparente stabilité par rapport aux valeurs de 2016 et 2018. La défoliation moyenne pour les chênes pédonculés est de 24%, ce qui constitue une nette baisse par rapport à 2018 et 2019. En ce qui concerne les chênes sessiles, la valeur moyenne est de 25% en 2020, tout comme en 2019. Des analyses statistiques tenant compte de l'alternance des placettes observées et des effets de la fructification permettent d'étudier les évolutions de façon plus fine et plus rigoureuse ; elles sont présentées à la section 5.6.4.1.

Tableau 7: Valeurs moyennes de défoliation par année (2009 – 2020) et par essence (les effectifs sont repris entre parenthèses)

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Hêtres	37% (n=143)	27% (n=107)	29% (n=105)	22% (n=112)	27% (n=88)	23% (n=100)	26% (n=81)	33% (n=97)	27% (n=87)	31% (n=85)	30% (n=88)	33% (n=94)
Chênes pédonculés	27% (n=8)	29% (n=49)		21% (n=29)	22% (n=44)	19% (n=37)	26% (n=38)	22% (n=40)	19% (n=39)	26% (n=33)	28% (n=31)	24% (n=29)
Chênes sessiles	30% (n=1)	27% (n=6)		20% (n=6)	12% (n=6)	11% (n=6)	14% (n=7)	13% (n=8)	14% (n=7)	21% (n=10)	25% (n=9)	25% (n=10)

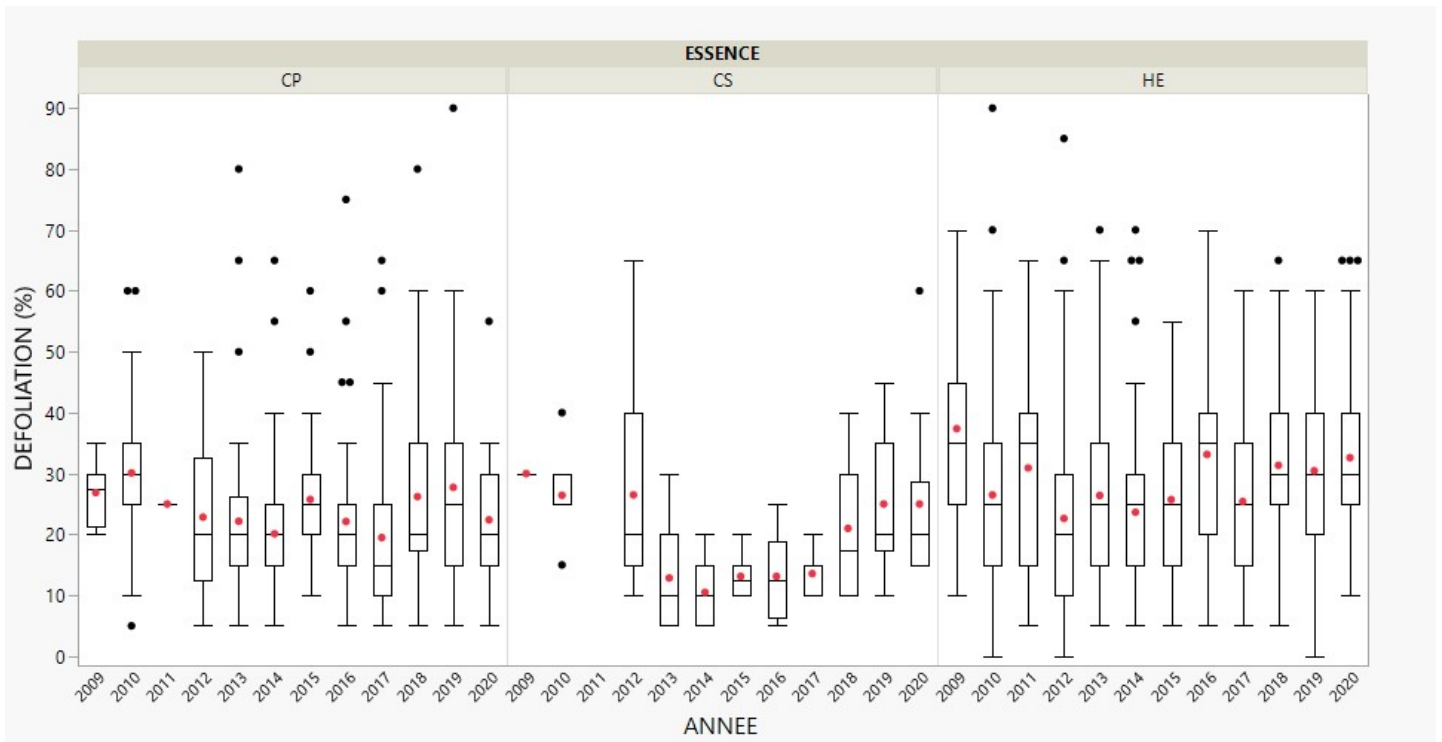


Figure 20 : Evolution de la défoliation des chênes pédonculés (CP), des chênes sessiles (CS) et des hêtres (HE) de 2009 à 2020

Comparaison avec la situation en Wallonie et en Flandre

L'évolution de la défoliation moyenne de l'ensemble des arbres étudiés en forêt de Soignes (incluant donc les deux sous-échantillons de hêtre) a été comparée à l'évolution moyenne des défoliations pour l'ensemble des arbres du réseau ICP-forests (level 1) en Wallonie et en Flandres. Il est utile de préciser que la méthode de cotation appliquée en Flandres (où le monitoring a débuté avant l'établissement des protocoles ICP-forests) diffère légèrement de celle qui est appliquée dans la plupart des pays/régions partenaires du projet: la cotation de défoliation y est effectuée sur l'ensemble du houppier. Pour les hêtres, ceci peut conduire à une cotation moins forte par rapport au protocole standard, alors qu'une faible surestimation est possible dans le cas des chênes.

Pour le hêtre (Figure 21), les moyennes en forêt de Soignes sont environ 10% plus basses par rapport à la Wallonie et 10% supérieures par rapport à la Flandre, mais l'évolution des courbes est remarquablement synchrone. En Wallonie, les défoliations moyennes sont environ 10% plus élevées, alors que le protocole est identique à celui de Bruxelles et que la calibration est également effectuée à l'UCLouvain. Cet écart entre les moyennes est lié à des valeurs très élevées sur les placettes de haute Ardenne suite à une dégradation antérieure au début du suivi (2010), qui pourrait être liée à des épisodes d'engorgement des sols en cours de saison de végétation.

En ce qui concerne les chênes (Figure 22 et Figure 23), les valeurs de défoliation sont nettement plus élevées en Wallonie qu'à Bruxelles au début de la période de suivi, mais cet écart diminue au fil des années. Le pic observé en 2012 en Wallonie est lié à une forte attaque de chenilles en Ardenne, alors que les régions de plaine ont été plus épargnées. Les valeurs pour le chêne pédonculé en Flandre sont très semblables à celles de la forêt de Soignes, mais l'on observe moins d'oscillations.

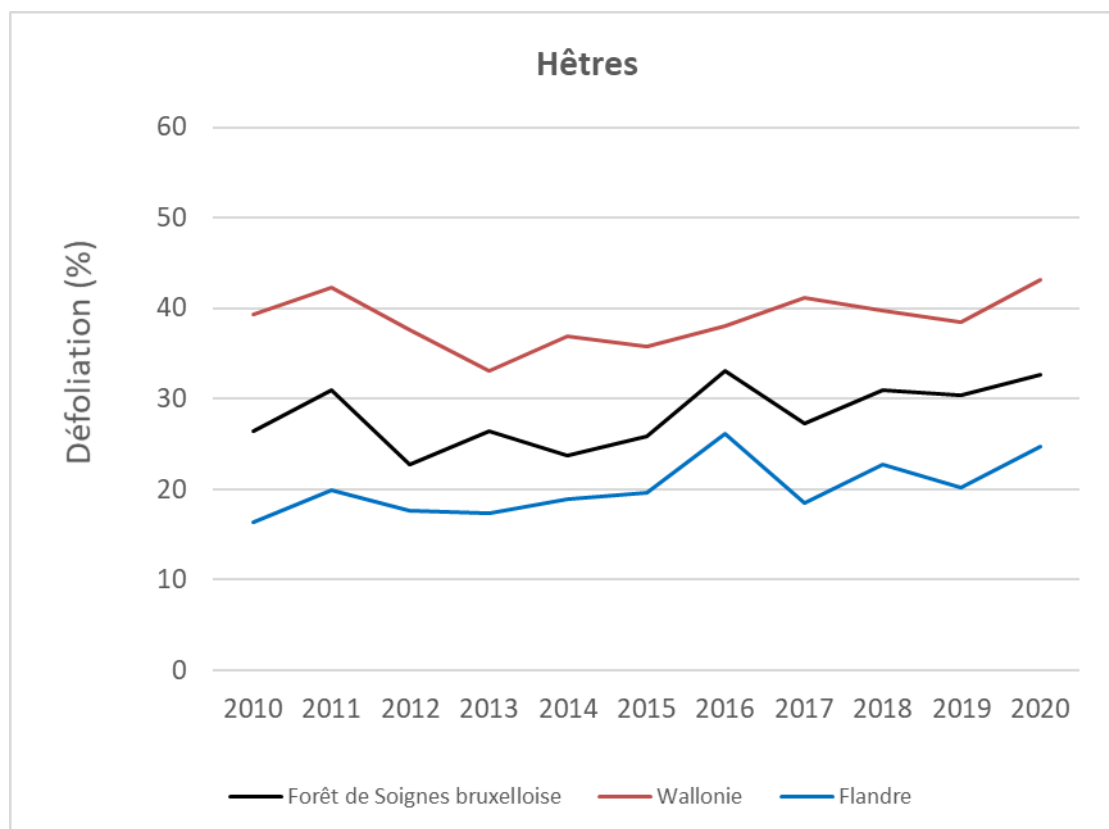


Figure 21 : Evolution comparée des défoliations moyennes de Hêtres en forêt de Soignes bruxelloise, en Wallonie et en Flandre

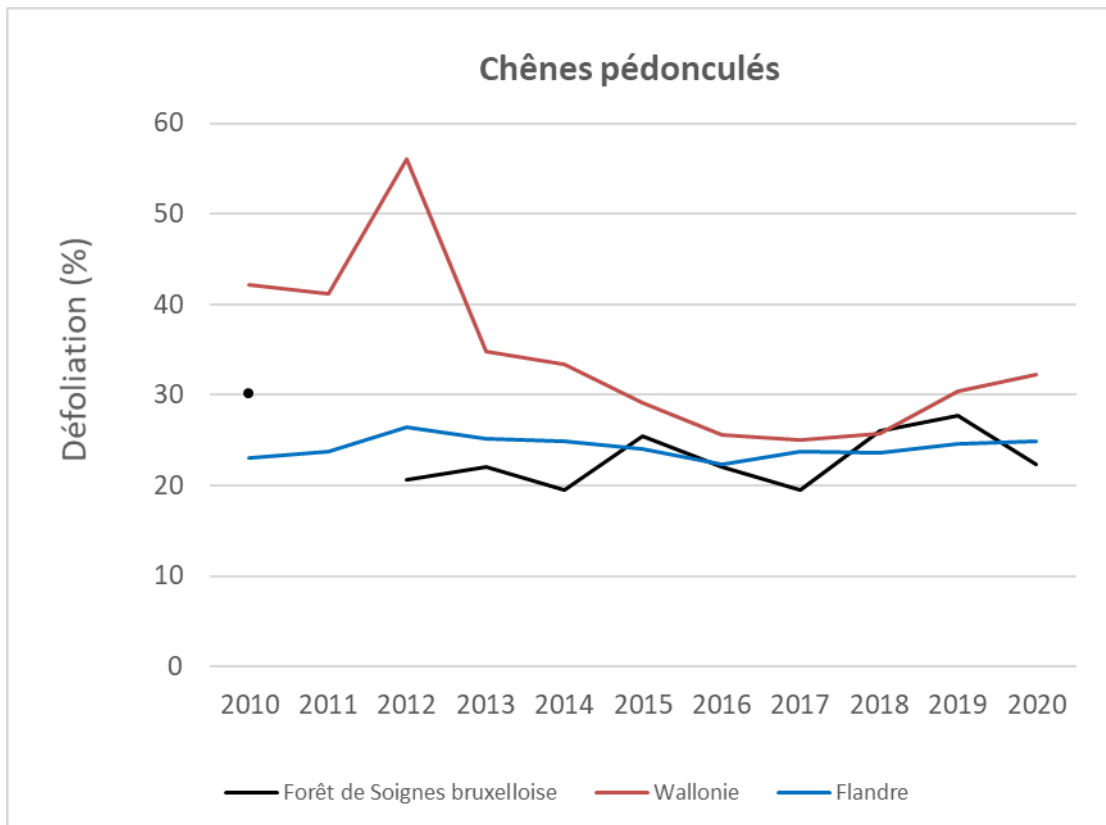


Figure 22 : Evolution comparée des défoliations moyennes de chênes pédonculés en forêt de Soignes bruxelloise, en Wallonie et en Flandre

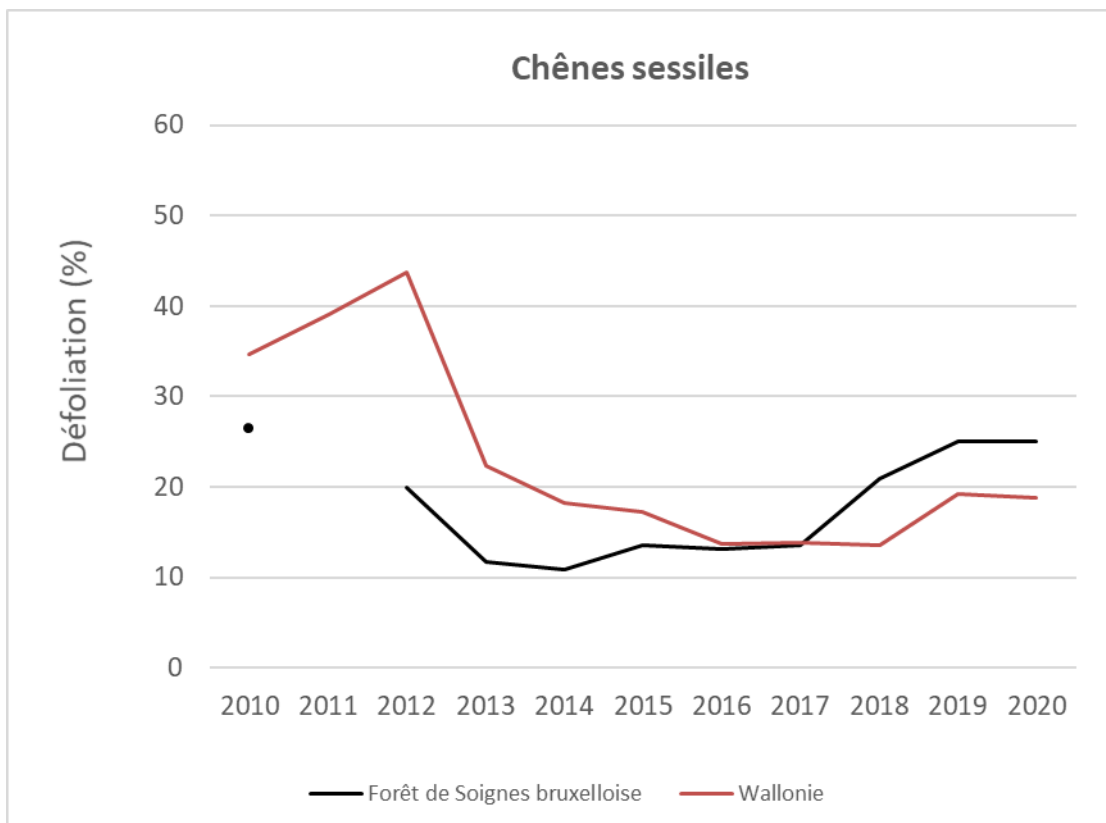


Figure 23 : Evolution comparée des défoliations moyennes de chênes sessiles en forêt de Soignes bruxelloise et en Wallonie

5.6.2. Répartition par classe de défoliation

La présentation des résultats selon la proportion des arbres dans différentes classes de dégradation (selon des niveaux de défoliation) permet d'obtenir des informations complémentaires. Ces classes sont définies au niveau du groupe d'expert 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 terme 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 24), 56% des arbres présentent une défoliation supérieure à 25% (modérée, forte ou sévère) en 2020, mais seuls 20% présentent une dégradation supérieure à 40% (dégradation forte ou sévère). Ces proportions ne présentent pas d'évolution claire sur l'ensemble de la période d'observation, mais des pics sont visibles lors des années de forte fructification (2009, 2011, 2016, 2018 et 2020). Notons que la proportion de hêtres présentant une dégradation sévère reste très limitée (<3%) tout au long de la période et aucun arbre mort sur pied n'a été observé.

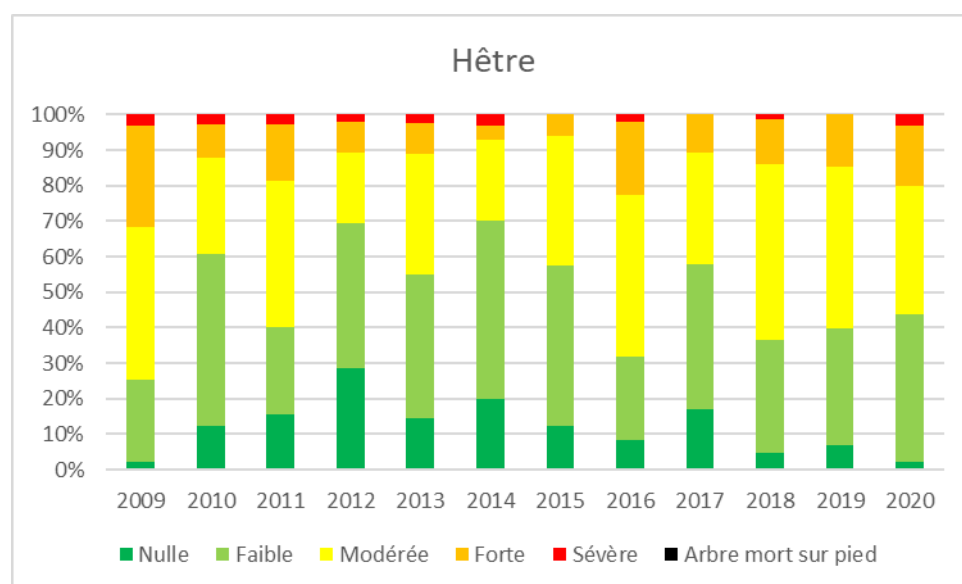


Figure 24 : Evolution de la répartition des hêtres selon les classes de défoliation [Nulle (0-10%) ; Faible (11-25%) ; Modérée (26-40%) ; Forte (41-60%) ; Sévère (61-99%) ; Arbre mort sur pied (100%)]

Pour les chênes pédonculés, 31% des arbres présentaient une défoliation supérieure à 25% (dégradation modérée ou forte) en 2020, mais seuls 2% du total présentent une dégradation forte ; la classe « sévère » n'est pas représentée cette année. Ces proportions ne présentent pas d'évolution claire, mais certaines

années (2014, 2016 et 2017) sont caractérisées par une large dominance d'arbres peu ou faiblement dégradés.

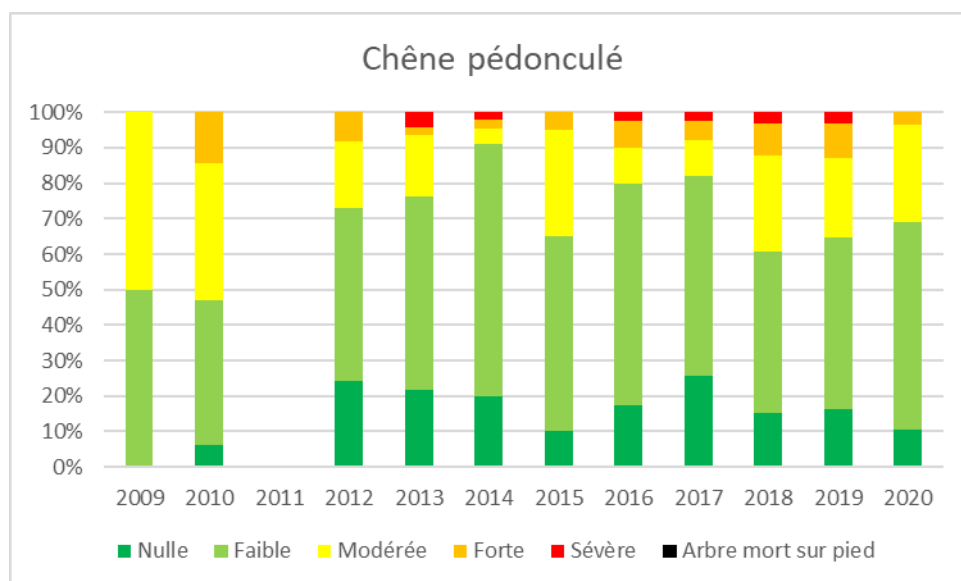


Figure 25 : Evolution de la répartition des chênes pédonculés selon les classes de défoliation [Nulle (0-10%) ; Faible (11-25%) ; Modérée (26-40%) ; Forte (41-60%) ; Sévère (61-99%) ; Arbre mort sur pied (100%)]

Les chênes sessiles sont majoritairement rattachés aux classes de dégradation « nulle » ou « faibles » en 2020, vu que seuls 20% présentent une dégradation supérieure à 25% et qu'aucun ne dépasse le seuil de 40%. Bien que très faible, cette proportion est plus élevée que durant le période 2013-2016, durant laquelle cette proportion était nulle et environ 50% des arbres appartenait à la classe de dégradation « nulle ».

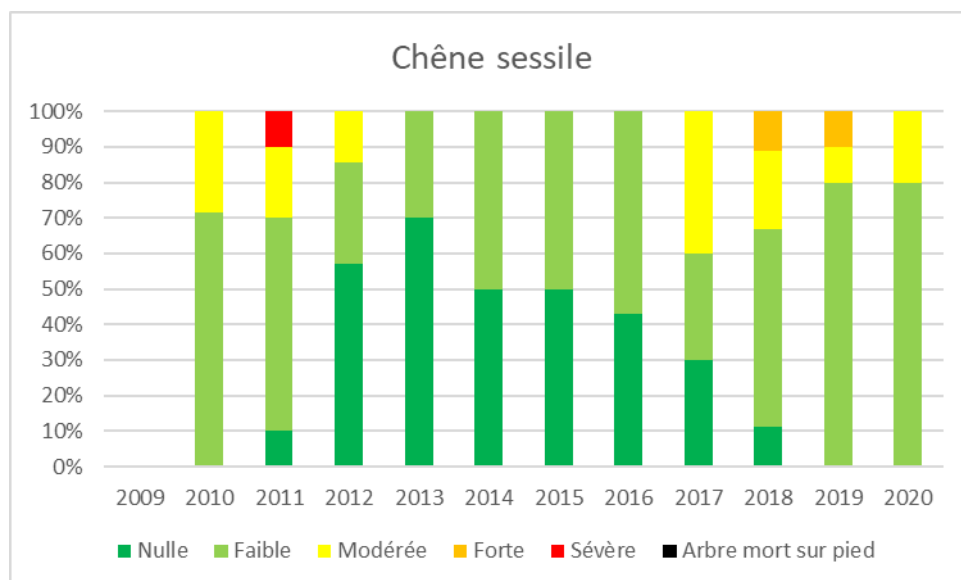


Figure 26 : Evolution de la répartition des chênes sessiles selon les classes de défoliation [Nulle (0-10%) ; Faible (11-25%) ; Modérée (26-40%) ; Forte (41-60%) ; Sévère (61-99%) ; Arbre mort sur pied (100%)]

5.6.3. Relations entre la défoliation et les autres variables

5.6.3.1. Défoliation et circonférence

Le Tableau 8 reprend le niveau de corrélation existant entre la défoliation et la circonférence des chênes et des hêtres, mesurée à 1m50. Les coefficients en gras et marqués d'un astérisque indiquent que la corrélation est significative au seuil $\alpha = 0.05$. Nous pouvons donc conclure que les niveaux de défoliation des hêtres augmentent à mesure que la circonférence s'accroît, et ce quelle que soit l'année d'observation. Les relations pour l'année 2020 sont également illustrées à la Figure 27. Les équations des régressions linéaires ont été reprises dans le Tableau 9 uniquement lorsque ces modèles sont significatifs. Sur base des données de 2020, la défoliation augmenterait de 6.8% lorsque la circonférence d'un hêtre augmente de 100 cm. Si l'on considère les moyennes par arbre pour ces paramètres sur l'ensemble de la période d'observation, et que l'on écarte les points aberrants (méthode de la distance de Mahalanobis), la relation est considérablement améliorée et le coefficient s'élève 10.6% de défoliation pour 100 cm de circonférence (Figure 28). Il est hautement probable que cet effet de la circonférence reflète en réalité l'effet de l'âge, mais ce paramètre ne peut malheureusement pas être mesuré. Notons toutefois que pour chaque essence, les quelques individus les plus gros présentent une défoliation semblable à la moyenne des individus les plus fins. Il s'agit probablement d'individus exceptionnels conservés dans un but de sélection de graines ou pour des raisons paysagères.

Tableau 8 : Corrélation entre la circonférence et la défoliation en fonction de l'essence et de l'année (Les coefficients en gras et marqués d'un astérisque indiquent que la corrélation est significative au seuil $\alpha = 0.05$)

Année	Corrélation entre la défoliation et C150		
	Chênes		Hêtres
2009	0,033 (n=14)		0,396* (n=143)
2010	0,1613 (n=45)		0,428* (n=107)
2011	-0,211 (n=39)		0,518* (n=102)
2012	0,2051 (n=63)		0,384* (n=112)
	Ch. pédonculé	Ch. sessiles	Hêtres
2013	0,150 (n=48)	0,620 (n=7)	0,314* (n=88)
2014	0,206 (n=45)	0,167 (n=10)	0,380* (n=100)
	Chênes		Hêtres
2015	-0.173 (n=48)		0.302* (n=81)
	Ch. pédonculé	Ch. sessiles	Hêtres
2016	-0.05 (n=40)	-0.59 (n=8)	0.218* (n=97)
2017	0.15 (n=39)	-0.02 (n=7)	0.42* (n=87)
2018	0.01 (n=33)	0.20 (n=10)	0.38* (n=85)
2019	0.19 (n=31)	0.71* (n=9)	0.35* (n=88)
2020	0.32(n=29)	0.11 (n=10)	0.30* (n=93)

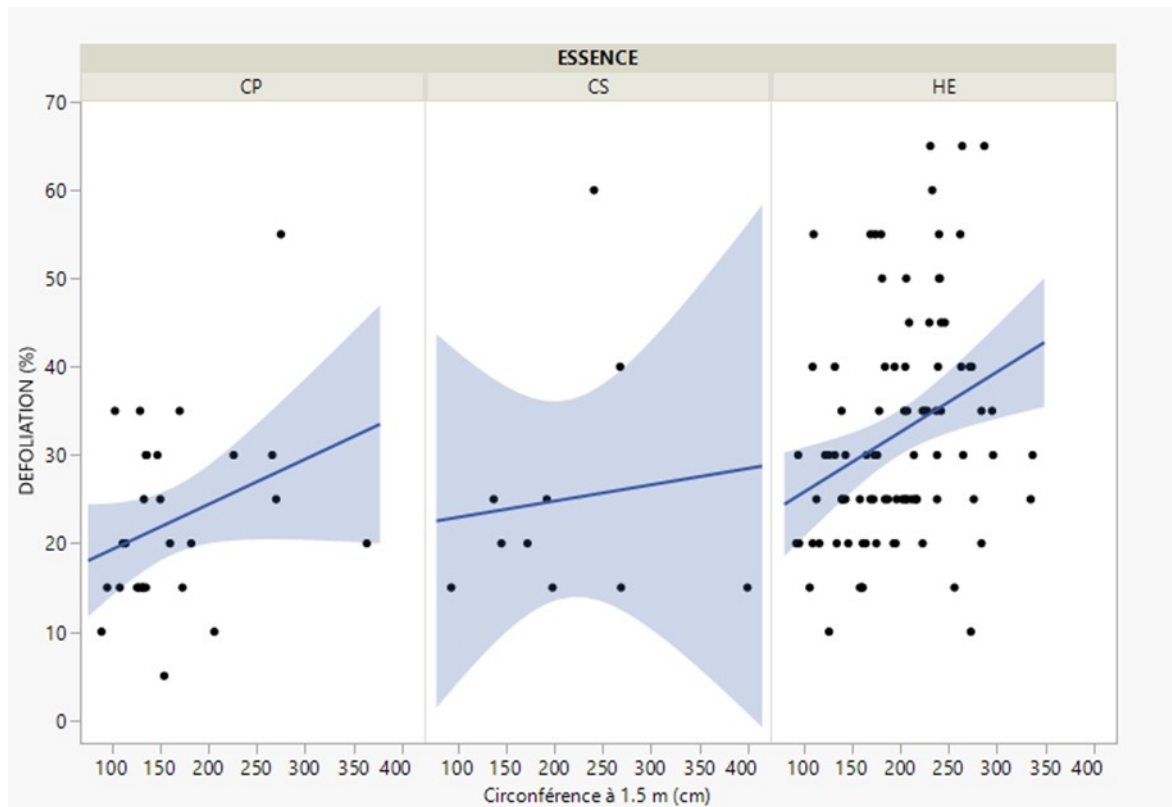


Figure 27 : Relations entre la circonférence en cm (C150) et la défoliation (%) en 2020 [les droites représentent les régressions linéaires et les zones grisées les intervalles de confiance relatifs à ces dernières]

Tableau 9: Résultats des régressions linéaires significatives (p valeur < 0.05) entre la circonférence (x ; cm) et la défoliation (y ; %) par année.

Année	Essence	n	équation	R ²	p valeur
2009	Hêtres	143	$y=0,0987x+17,24$	0,1397	<0,0001
2010	Hêtres	107	$y=0,1065x+7,35$	0,1693	<0,0001
2011	Hêtres	102	$y=0,1295x+7,05$	0,2683	<0,0001
2012	Hêtres	112	$y=0,1024x+3,01$	0,143	<0,0001
2013	Hêtres	88	$Y=0,0674x+14,7$	0,0902	0,0045
2014	Hêtres	100	$Y=0,0822x+7,61$	0,1444	<0,0001
2015	Hêtres	81	$Y=0,056x+15,01$	0,091	0,0061
2016	Hêtres	97	$Y=0,051x+23,2$	0,045	0,0367
2017	Hêtres	87	$Y =0,099x+9,72$	0,173	<0,0001
2018	Hêtres	85	$Y=0,0759x+16,49$	0,142	0,0003
2019	Chênes sessiles	9	$Y=0,1338x-0,22$	0,50	0,032
2019	Hêtres	88	$Y=0,0737x+16$	0,12	0,001
2020	Hêtres	93	$Y=0,068x+18,9$	0,09	0,003

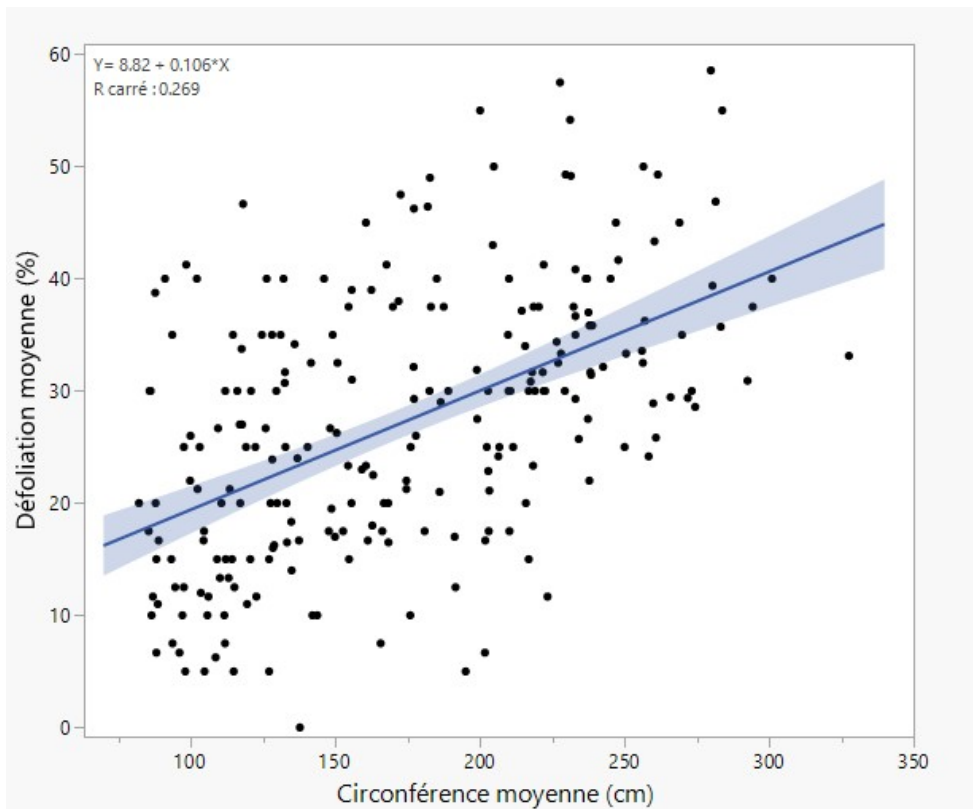


Figure 28 : Relation entre les circonférences et les défoliation des hêtres [moyennes par arbre sur l'ensemble de la période de monitoring ; suppression de 11 points aberrants par la méthode de Mahalanobis]

5.6.3.2. Défoliation et concurrence

La concurrence est estimée à l'aide de l'indice d'ombrage, qui renseigne sur le nombre de côtés du houppier qui sont touchés par d'autres cimes. Pour rappel, cet indice est distribué en 5 classes allant de « couronne en croissance libre » à « contact sur 4 côtés ». La Figure 29 indique que pour les hêtres, les couronnes les plus soumises à la concurrence présentent une défoliation plus faible par rapport aux autres situations. Cet effet pourrait être lié indirectement à la relation entre circonférence et la défoliation, vu que arbres soumis à une plus forte concurrence se rencontrent le plus souvent dans les peuplement les plus jeunes, présentant dès lors les circonférences les plus faibles (Figure 30). Cependant d'autres mécanismes pourraient être invoqués : l'exploitation des arbres voisins est susceptible d'engendrer un tassement du sol, la rupture de racines, des blessures et des coups de soleils sur le tronc.

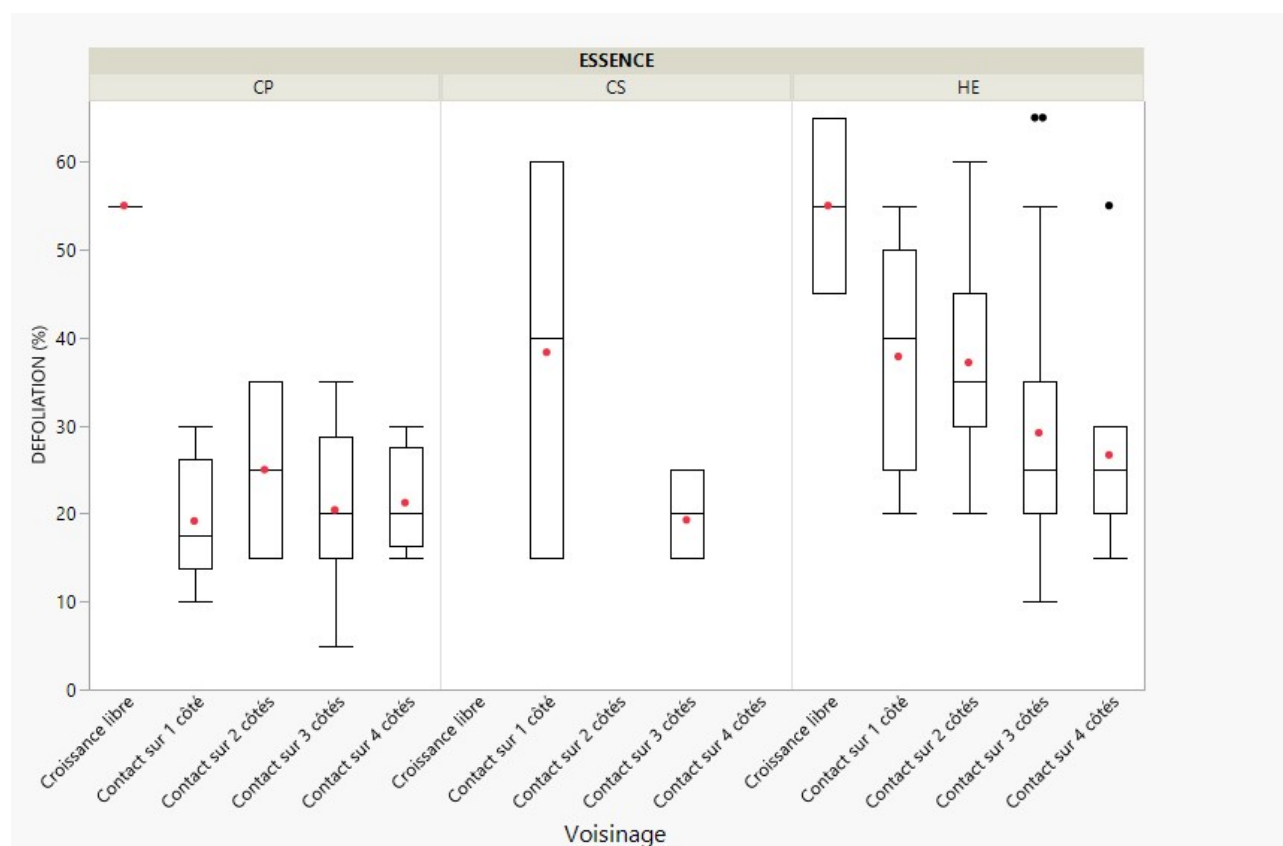


Figure 29 : Défoliation des chênes indigènes (CP : chêne pédonculé ; CS : chêne sessile) et des hêtres (HE) selon l'indice d'ombrage en 2020



Figure 30 : Répartition des hêtres par classe de concurrence pour chacune des classes de circonférence

5.6.3.3. Défoliation et fructification

Pour le hêtre et le chêne sessile, les arbres présentant une fructification intense (classe 3) en 2020 se caractérisent par des niveaux de défoliation plus élevés que les autres (Figure 31). Cet effet peut s'expliquer par la mobilisation de réserves nutritives pour le développement des fruits au détriment des feuilles, qui sont généralement plus petites et moins nombreuses (Figure 32). D'autre part, la fructification abondante chez les hêtres est clairement associée aux arbres de plus de 160 cm de circonférence (Figure 33) et plus fréquente pour les classes de structure au-delà de 4 (Figure 34), ce qui suggère des relations multiples entre ces différents paramètres. Ces relations seront abordées et discutées, pour les 3 essences étudiées, dans la section 5.5.4.

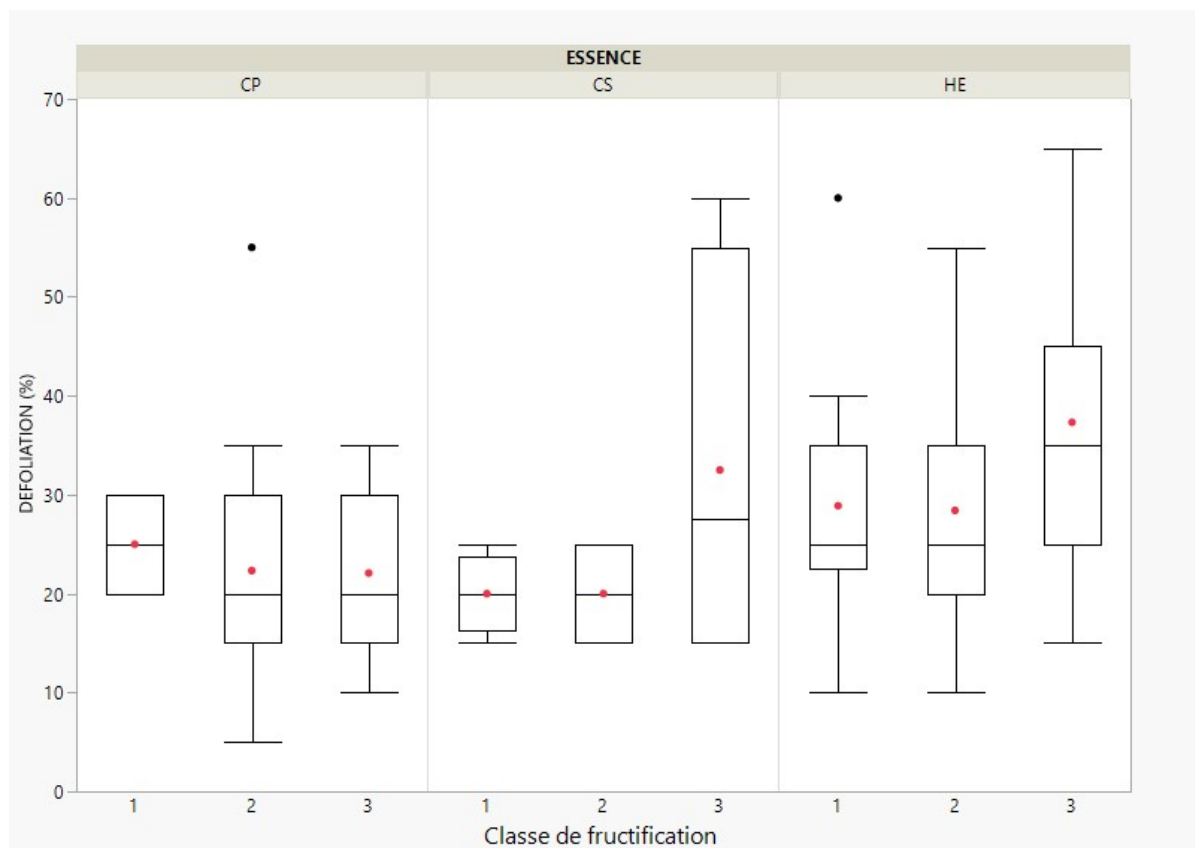


Figure 31 : Distribution de la défoliation des chênes (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles) et des hêtres (HE) selon l'abondance de la fructification en 2020



Figure 32 : Effet de la fructification sur l'apparence de la cime des hêtres



Figure 33 : Répartition des hêtres par classe de fructification pour chacune des classes de circonférence

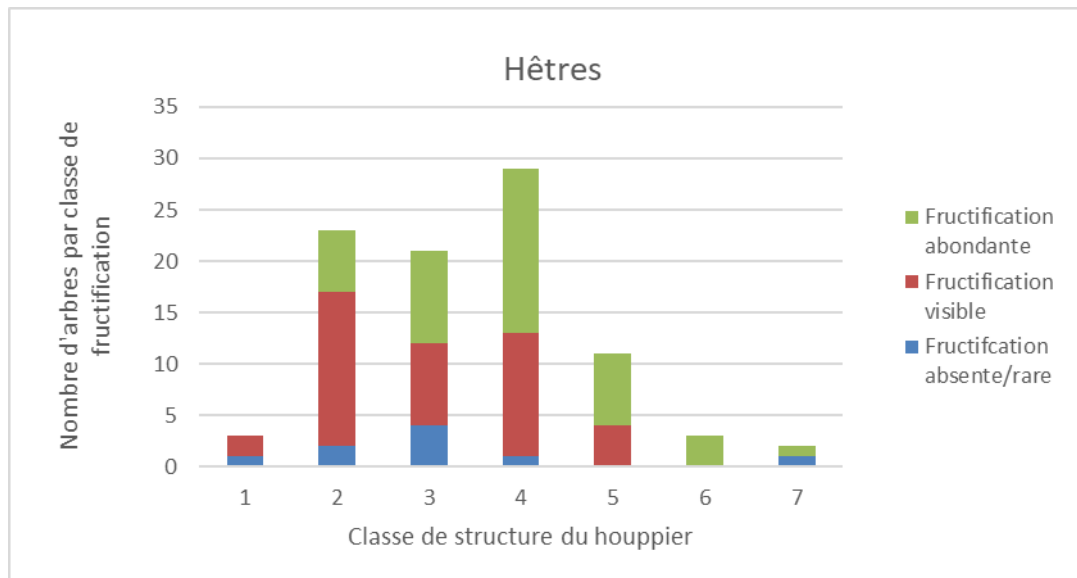


Figure 34 : Répartition des hêtres par classe de fructification pour chacune des classes de structure (cf. Figure 14 pour la signification des codes)

5.6.3.4. Défoliation et décoloration

Contrairement aux autres années, nous observons en 2020 des niveaux de défoliation plus élevés lorsque l'intensité de la décoloration augmente, pour les chênes pédonculés et les hêtres (Figure 35). Toutefois, les hêtres présentant une décoloration sévère ne présentent pas de défoliation plus élevées que les autres. En outre, la décoloration n'est pas liée à la classe de circonférence (non illustré).

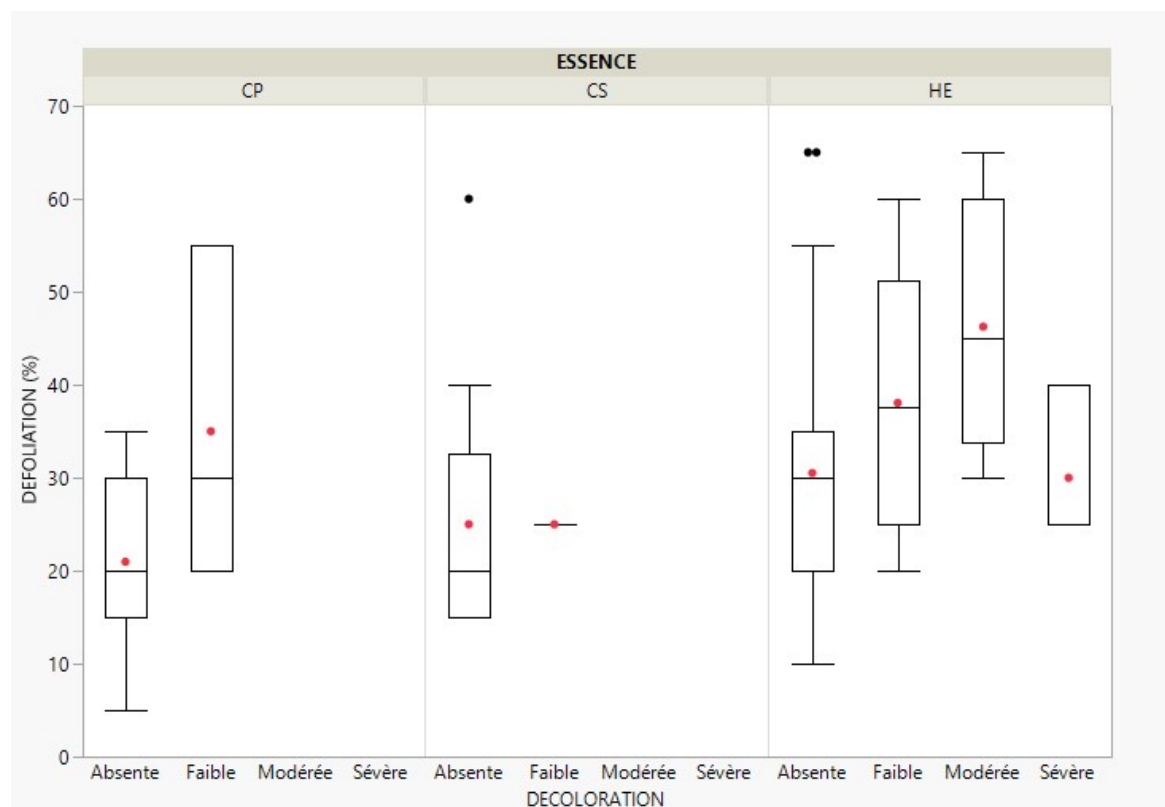


Figure 35 : Défoliation des chênes indigènes (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles) et des hêtres (HE) en 2020 selon l'intensité de la décoloration la même année [classe 0 : 0 à-10% ; classe 1 : 10-25% ; classe 2 : 25-60% ; classe 3 : >60%]

5.6.3.5. Défoliation et structure du houppier

Pour les 3 essences, il existe une relation très claire entre la structure de la partie supérieure de leur houppier et la défoliation (Figure 36). Cette relation se justifie par le fait que la simplification de la ramification, la diminution de la longueur des rameaux, et l'augmentation de la mortalité des brins entraînent inévitablement une réduction du volume foliaire. Notons que les hêtres de la classe « 7 », caractérisés par la mortalité importante de grosses branches, présentent des valeurs de défoliation plus faibles qu'attendu si l'on extrapolait à partir des autres classes. Il pourrait s'agir d'arbres dont le houppier se reconstitue à partir de branches plus basses, auxquels on aurait pu attribuer le code de structure « 8 ». Il conviendra de bien vérifier ces situations lors des prochaines visites.

Globalement, la relation entre ces deux paramètres est très marquée, ce qui suggère que la simplification de la structure serait le principal mécanisme conduisant à une augmentation de la défoliation dans le contexte de cette étude.

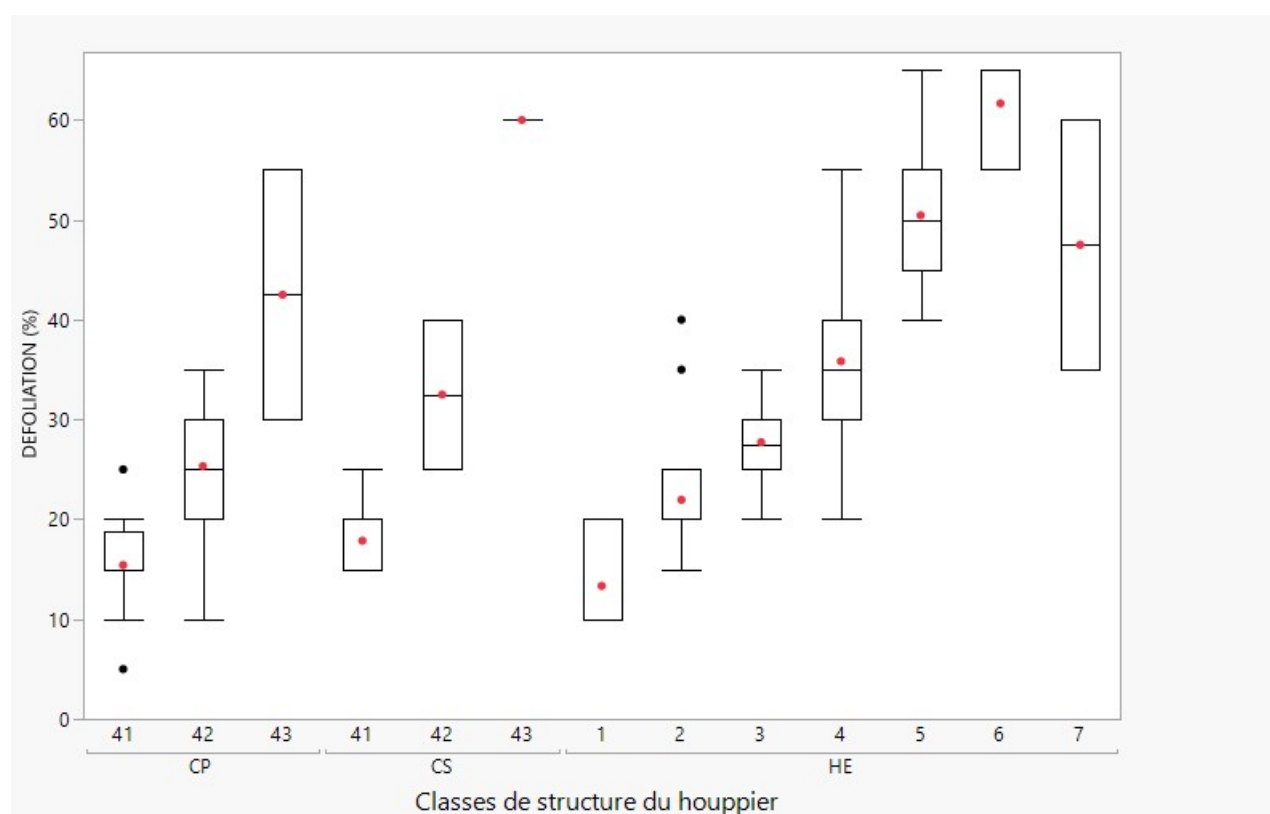


Figure 36: Distribution de la défoliation des chênes (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles) et des hêtres (HE) selon la forme du houppier en 2020 (la signification des codes est indiquée aux Figure 13 et Figure 14)

La structure a également été représentée selon les classes de circonférence. Dans le cas des hêtres (Figure 37), les structures les moins dégradées (classes 1 et 2) sont principalement liées aux circonférences inférieures à 180 cm tandis que les structures les plus dégradées (classes 6 et 7) sont liées à des circonférences supérieures à 220 cm. Chez les chênes pédonculés (Figure 38), la tendance est moins nette : les structures bien ramifiées (classe 41) sont plus fréquentes parmi les arbres dont la circonférence est inférieure à 180 cm, mais a également été observée sur l'arbre le plus gros de tout l'échantillon. Pour les chênes sessiles (Figure 39), le nombre d'individus est vraiment très limité, mais les répartitions

correspondent très bien à celles des chênes pédonculés. Les relations entre circonférence, structure, défoliation et fructification seront étudiées à la section 5.5.

Le fait que les deux plus gros chênes, ainsi qu'un des 2 plus gros hêtres présentent une bonne structure du houppier est probablement lié à des choix du gestionnaire visant à maintenir en place des individus exceptionnels.

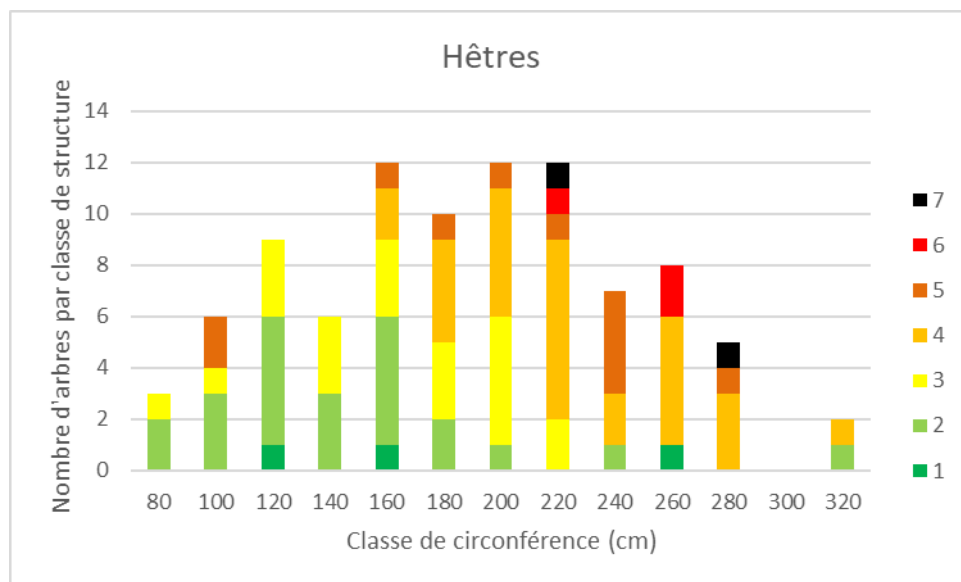


Figure 37 : Répartition des hêtres par classe de structure du houppier pour chacune des classes de circonférence

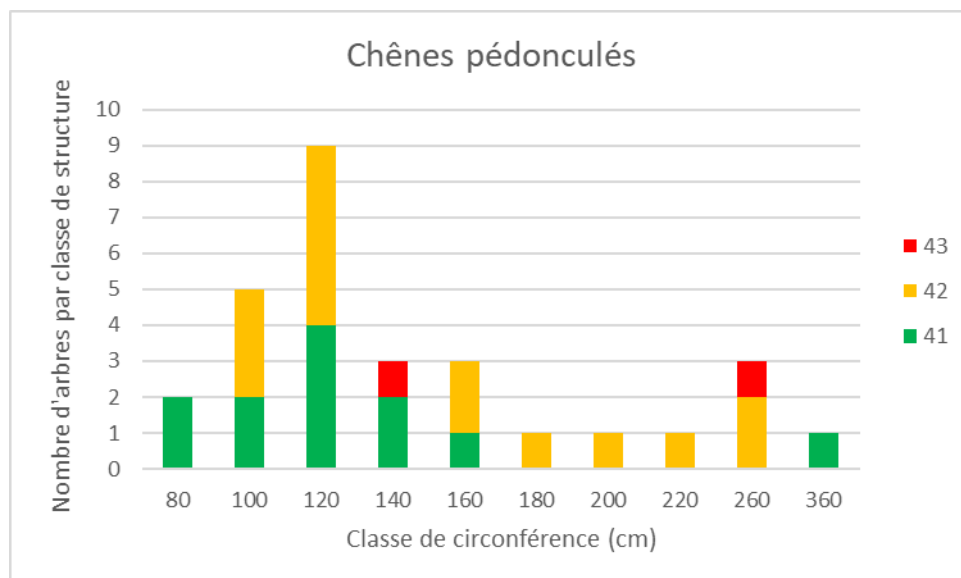


Figure 38 : Répartition des chênes pédonculés par classe de structure du houppier pour chacune des classes de circonférence

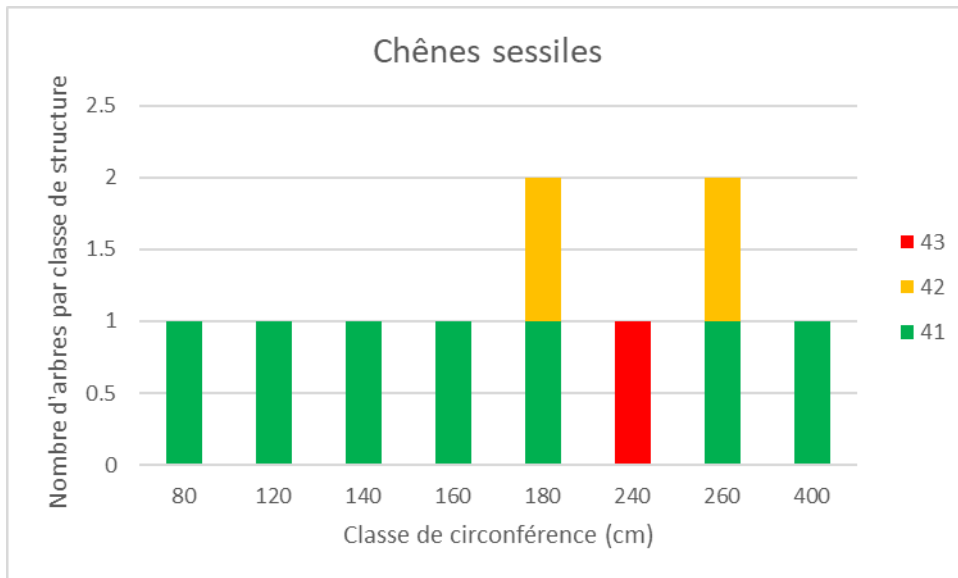


Figure 39 : Répartition des chênes sessiles par classe de structure du houppier pour chacune des classes de circonférence

5.6.4. Evolution de la défoliation

5.6.4.1. 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.

Dans un premier temps, nous avons considéré l'année comme seul facteur fixe [Eq2]. Nous avons ensuite appliqué le même modèle, en considérant l'intensité de la fructification comme 2^e facteur fixe [Eq3].

Contrairement au modèle utilisé en 2019, nous avons considéré les moyennes annuelles de la fructification et non les valeurs individuelles [moyenne arithmétique des indices individuels situés sur une échelle semi-quantitative 1(absente) à 3(abondante)]. Ceci permet d'une part de transformer la variable fructification (classes 1 à 3) en une variable continue et d'autre part de la scinder en ses deux composantes : l'effet « fluctuation annuelle » et l'effet « variation inter-individuelle ». Ce dernier effet sera automatiquement répercuté sur les effets aléatoires, étudiés en détails par la suite.

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

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

[Modèle 3] Défoliation = f(Constante + Année + Fructification annuelle moyenne + *Arbre* + Année(*Arbre*))

En raison de l'alternance bisannuelle des placettes visitées en hêtraie, 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 considérablement ce risque.

ANALYSE DES TENDANCES

Les évolutions à long terme sont analysés sur base des coefficients associés au facteur « Année » dans les modèles 2 et 3 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 de la fluctuation de la fructification est calculé à partir du coefficient attribué à ce facteur dans les résultats du modèle 3 ainsi qu'à l'incertitude qui y est associée. Notons que l'effet de la variabilité inter-individu de la fructification n'est pas abordé dans ce paragraphe, mais dans l'analyse de l'effet « Arbres ».

3. Fluctuation de la « défoliation de base »

Si l'effet de la fructification est significatif, nous avons calculé une 2^e variable dérivée appelée « **défoliation de base** », obtenue en soustrayant les effets aléatoires issus du modèle 3, ainsi que l'effet de la fructification, de la valeur brute de défoliation. L'effet fructification a été calculé en multipliant le coefficient donné par le modèle 3 par la fructification moyenne de l'année correspondante (après avoir diminué cette dernière d'une unité, car l'indice¹ correspond à l'absence de fructification). 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.

ANALYSE DES EFFETS « ARBRES »

Les coefficients aléatoires liés aux individus (arbres) issus des modèles 2 ou 3 ont ensuite été analysés en relation avec les différentes co-variables liées aux individus afin de tenter de dégager d'éventuels liens de causalité. Les coefficients issus du modèles 3 ont été utilisés lorsque l'effet de la fructification était significatif, tandis que nous nous sommes basés sur le modèle 2 dans le cas contraire.

Les variables prises en compte sont les suivantes :

- DEFO_Const : constante aléatoire associée à l'individu (Arbre) dans le modèle 3 (hêtres) ou 2 (chênes). Cette constante est généralement très proche de l'écart entre la moyenne individuelle et la moyenne globale, mais s'en éloigne légèrement pour les individus présentant un nombre élevé de valeurs manquantes.

- DEFO_Coeff : coefficient aléatoire associé à l'individu Année(Arbre) dans le modèle 3 (hêtres) ou 2 (chênes). Ce coefficient est généralement très proche de l'écart entre la pente individuelle et la pente globale, mais s'en éloigne légèrement pour les individus présentant un nombre élevé de valeurs manquantes.
- C150_Const : constante aléatoire associés à l'individu (Arbre) dans le modèle 1. Cette constante est généralement très proche de l'écart entre la moyenne individuelle et la moyenne globale, mais s'en éloigne légèrement pour les individus présentant un nombre élevé de valeurs manquantes.
- C150_Coeff : coefficient aléatoire associé à l'individu Année(Arbre) dans le modèle 1. Ce coefficient est généralement très proche de l'écart entre la pente individuelle et la pente globale, mais s'en éloigne légèrement pour les individus présentant un nombre élevé de valeurs manquantes.
- Structure : Il s'agit de la moyenne des classes de structures pour chaque arbre sur l'ensemble de la période, ce qui revient à considérer qu'il s'agit d'une variable continue. La classe 8, qui représente un stade de reconstruction, a été exclue car elle ne se situe pas dans la série « de dégradation ».
- Fructif. : Il s'agit de la moyenne des classes de fructification pour chaque arbre sur l'ensemble de la période, ce qui revient à considérer qu'il s'agit d'une variable continue. Contrairement au facteur fructification intégré dans le modèle 3, visant à étudier l'effet des fluctuations inter-annuelles de la fructification, le paramètre considéré ici vise à étudier l'effet des variations inter-individu de la fructification. Notons que pour les hêtres, les arbres observés moins de 4 années ont été exclus de cette analyse, car le risque est élevé que ces arbres soient observés uniquement lors des années de fortes fructifications (ou l'inverse), ce qui engendre des moyennes biaisées pour ce paramètre.
- Voisinage : Il s'agit de la moyenne des classes de voisinage pour chaque arbre sur l'ensemble de la période, ce qui revient à considérer qu'il s'agit d'une variable continue. La classe de voisinage [0 : arbre isolé, 1 : contact sur un côté ; ... ; 4 : contact sur 4 côtés] est identique à l'indice d'ombrage, à l'exception des arbres isolés (l'indice 0 remplace l'indice 5).

5.6.4.2. Hêtres

EVOLUTION GLOBALE

Les résultats des modèles de prédiction de la défoliation sont présentés au Tableau 10. Le coefficient associé à l'année est identique dans les deux modèles et significatif: l'augmentation moyenne est de **0.23% par an**, avec un intervalle de confiance large [0.02 – 0.44% pour le modèle 2 ; 0.03 – 0.43 pour le modèle 3]. Si l'on multiplie la croissance moyenne en circonférence (1.24 cm/an –section 5.5) par la pente de la régression entre la circonférence et la défoliation (0.1% de défoliation par cm de circonférence – section 5.6.3.1), on obtient une augmentation de la défoliation de 0.13% par an. Cette valeur est située dans l'intervalle de confiance de la prédiction de l'augmentation moyenne de défoliation (Tableau 10), ce qui suggère que l'augmentation de défoliation observée serait en grande partie attribuable à l'augmentation de la circonférence durant la période de suivi, et donc au vieillissement des arbres.

Tableau 10 : Estimation des coefficient « Année » selon les Modèles 2 et 3 pour les hêtres

Terme	Coefficient	Prob. > t	IC95 (min)	IC95 (max)
Modèle 2	0.23	0.034	0.02	0.44
Modèle 3	0.23	0.025	0.03	0.43

Fluctuations de la « Défoliation corrigée »

La comparaison des moyennes pour le paramètre « défoliation corrigée » (effets « Individus » déduits) indique de fortes fluctuations (Figure 46). Les valeurs les plus élevées sont atteintes en 2009, 2016, 2018 et 2020, tandis que les valeurs les plus basses sont observées en 2010 et entre 2012 et 2015. Si l'on compare la valeur de 2020 aux années précédentes (Tableau 11), nous observons qu'elle est plus basse qu'en 2016, proche des valeurs de 2009, 2011, 2018 et 2019, et supérieure aux valeurs des années 2010, 2012 à 2015 et 2017.

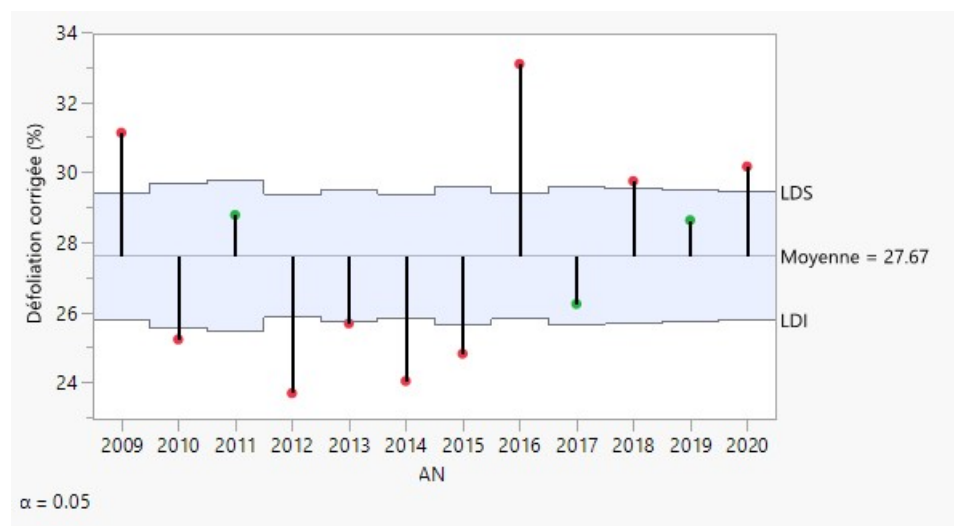


Figure 40 : Comparaison des moyennes annuelles par rapport à la moyenne globale, pour le paramètre « Défoliation corrigée » (Défoliation après déduction des effets aléatoires) ; les années dont le point est situé hors de la zone grisée (points rouges) présentent une moyenne significativement différente de la moyenne globale

Tableau 11 : Comparaison 2 à 2 des moyennes annuelles (Test de Student), pour le paramètre « Défoliation corrigée » (Défoliation après déduction des effets « individus ») ; les années ne présentant aucune lettre commune sont caractérisées par des moyennes significativement différentes ; les couleurs représentent l'ordre des moyennes annuelles (vert foncé = valeur la plus basse ; rouge foncé = valeur la plus élevée)

Année	Moyenne	Lettres d'appariement
2009	31.2	B
2010	25.3	D E F
2011	28.8	C
2012	23.7	F
2013	25.7	D E
2014	24.1	E F
2015	24.9	D E F
2016	33.1	A
2017	26.3	D
2018	29.8	B C
2019	28.7	C
2020	30.2	B C

Effets de la fructification

L'effet de la fructification annuelle moyenne sur la défoliation est très hautement significatif ($p < 0.0001$) (Tableau 12). La défoliation augmente d'environ 5% lorsque la moyenne annuelle de l'indice de fructification augmente d'une unité

Tableau 12 : Estimation du coefficient « Fructification annuelle moyenne » selon le Modèle 3 pour les hêtres

Terme	Coefficient	Prob. > t	IC95 (min)	IC95 (max)
Fructification annuelle moyenne	5.35	<0.0001	4.47	6.23

Les fluctuations interannuelles de la fructification affectent clairement l'évolution de la défoliation corrigée chez les hêtres ($R^2=0.62$), comme l'illustre la Figure 41. Certaines années, l'effet fructification représente jusqu'à 1/3 de la cote de défoliation. Notons qu'il ne peut s'agir d'un effet de l'alternance bisannuelle du sous-échantillon, car une perturbation du cycle de fructification s'est produite entre 2013 et 2014 : les pics de fructifications se produisaient aux années impaires avant ce moment, et aux années paires depuis lors.

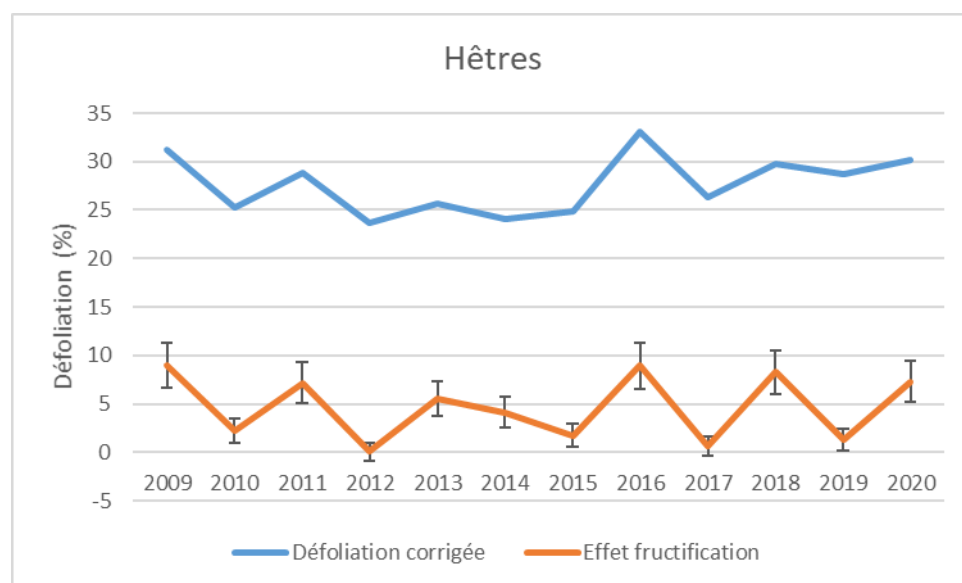


Figure 41 : Evolution comparée de la défoliation corrigée moyenne et de l'effet de la fructification annuelle moyenne pour les hêtres

Fluctuations résiduelles

Les fluctuations de la défoliation résiduelle (après déduction des effets « individus » et de l'effet fructification) sont présentées à la Figure 42. Les années 2016 et surtout 2019 se caractérisent par des valeurs supérieures à la moyenne générale, tandis que les années 2013 et 2014 présentent des valeurs inférieures. Nous avons vérifié qu'il n'existe aucune relation entre les variations de ce paramètre et les écarts entre équipes (UCLouvain – Bruxelles Environnement) relevés lors des visites de contrôle (R^2 0.006 ; p-valeur 0.82).

La comparaison 2 à 2 des moyennes (Tableau 13) indique que la valeur de 2020 est supérieure aux valeurs de 2010, 2013 et 2014, mais inférieure à la valeur de 2019.

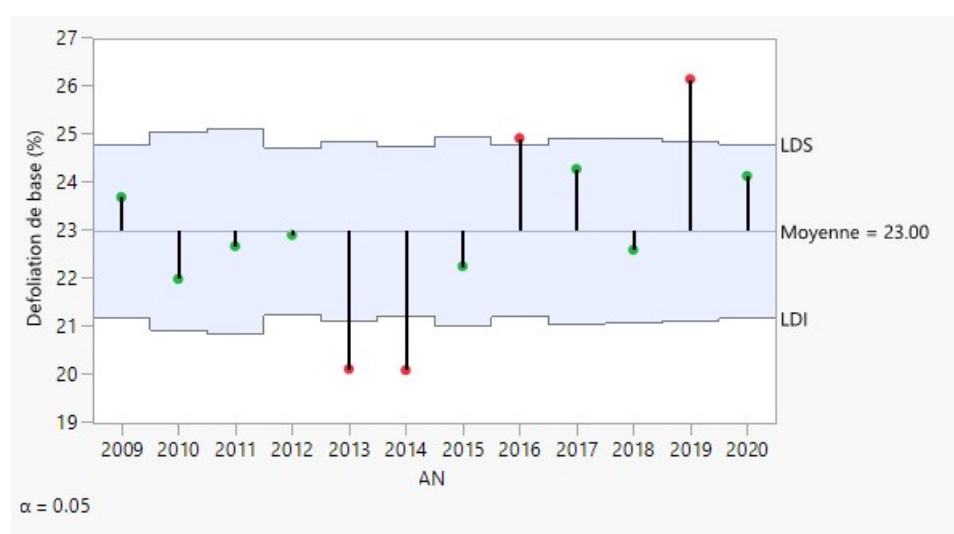


Figure 42 : Comparaison des moyennes annuelles par rapport à la moyenne globale, pour le paramètre « Défoliation de base » (Défoliation après déduction des effets « individus » et de l'effet « fructification moyenne ») ; les années dont le point est situé hors de la zone grisée (points rouges) présentent une moyenne significativement différente de la moyenne globale

Tableau 13 : Comparaison 2 à 2 des moyennes annuelles (Test de Student), pour le paramètre « Défoliation de base » (Défoliation après déduction des effets « individus » et de l'effet « fructification moyenne ») ; les années ne présentant aucune lettre commune sont caractérisées par des moyennes significativement différentes les couleurs représentent l'ordre des moyennes annuelles (vert foncé = valeur la plus basse ; rouge foncé = valeur la plus élevée)

Année	Moyenne	Lettres d'appariement
2009	23.7	B C D E
2010	22.0	E F
2011	22.7	C D E
2012	22.9	C D E
2013	20.1	F
2014	20.1	F
2015	22.3	D E
2016	24.9	A B
2017	24.3	A B C
2018	22.6	C D E
2019	26.2	A
2020	24.1	B C D

ANALYSE DES EFFETS « INDIVIDUS »

Les corrélations les plus élevées sont observées entre la constante de défoliation individuelle (DEFO_const) et la structure (Figure 43, Tableau 14). La simplification de la ramification et la mortalité de branches semblent donc être les principaux facteurs affectant la défoliation. Nous observons globalement des corrélations très hautement significatives entre les défoliations (constantes), les circonférences (constantes), la structure, la fructification et le voisinage. Ceci ne prouve pas l'existence de liens de causalité entre tous ces paramètres, mais nous permet d'avancer quelques hypothèses :

- La relation entre l'augmentation de la fructification (moyenne individuelle sur l'ensemble de la période) et la circonférence peut être expliquée par le fait que la reproduction est privilégiée lorsque l'arbre atteint la maturité.

- La production importante et récurrente de fruits peut affecter la structure et donc la défoliation à long terme, car les bourgeons floraux sont produits au détriment de bourgeons à l'origine de nouveaux rameaux. Cet effet individuel peut s'ajouter à un effet direct de la fructification sur le développement des feuilles, qui expliquerait aussi le lien étroit entre les fluctuations inter-annuelles de ces deux paramètres (cf ci-dessus).

- Les effets du voisinage sont clairement liés (négativement) à la circonférence et donc à l'âge en raison d'une ouverture progressive du couvert au cours du cycle sylvicole (en futaie régulière). Les relations de ce paramètre avec les autres paramètres pourraient donc être indirectes. Toutefois, le problème peut également être considéré dans l'autre sens : les passages en éclaircie peuvent engendrer des stress directs ou différés, tels que les blessures sur le tronc, la compaction du sol, la rupture de racines et la surchauffe de l'écorce. Le cumul de ces stress au cours de la vie de l'arbre pourrait partiellement expliquer la détérioration de son état sanitaire avec l'âge.

Le coefficient de défoliation individuel (DEFO_coeff) est positivement corrélé à la structure, indiquant que les arbres dont la structure est dégradée présentent une augmentation plus rapide de la défoliation, ce qui peut s'expliquer par l'impact majeur des branches mortes. La corrélation négative de ce paramètre avec le voisinage peut s'expliquer par le lien entre structure et voisinage expliqué ci-dessus.

Enfin, le coefficient individuel lié à la circonférence (C150_coeff), qui représente l'écart individuel par rapport à la croissance globale de l'échantillon, n'est corrélé significativement à aucun paramètre, à l'exception du voisinage. Ceci suggère que les dégradations de la partie supérieure du houppier, du moins dans la gamme de variation observée, n'affecterait pas la croissance en circonférence des hêtres. L'effet du voisinage pourrait quant-à lui s'expliquer par le lien indirect (et négatif) de ce paramètre avec l'âge des arbres de la placette, ou par un effet direct des stress résultant des passages en éclaircie (comme expliqué ci-dessus).

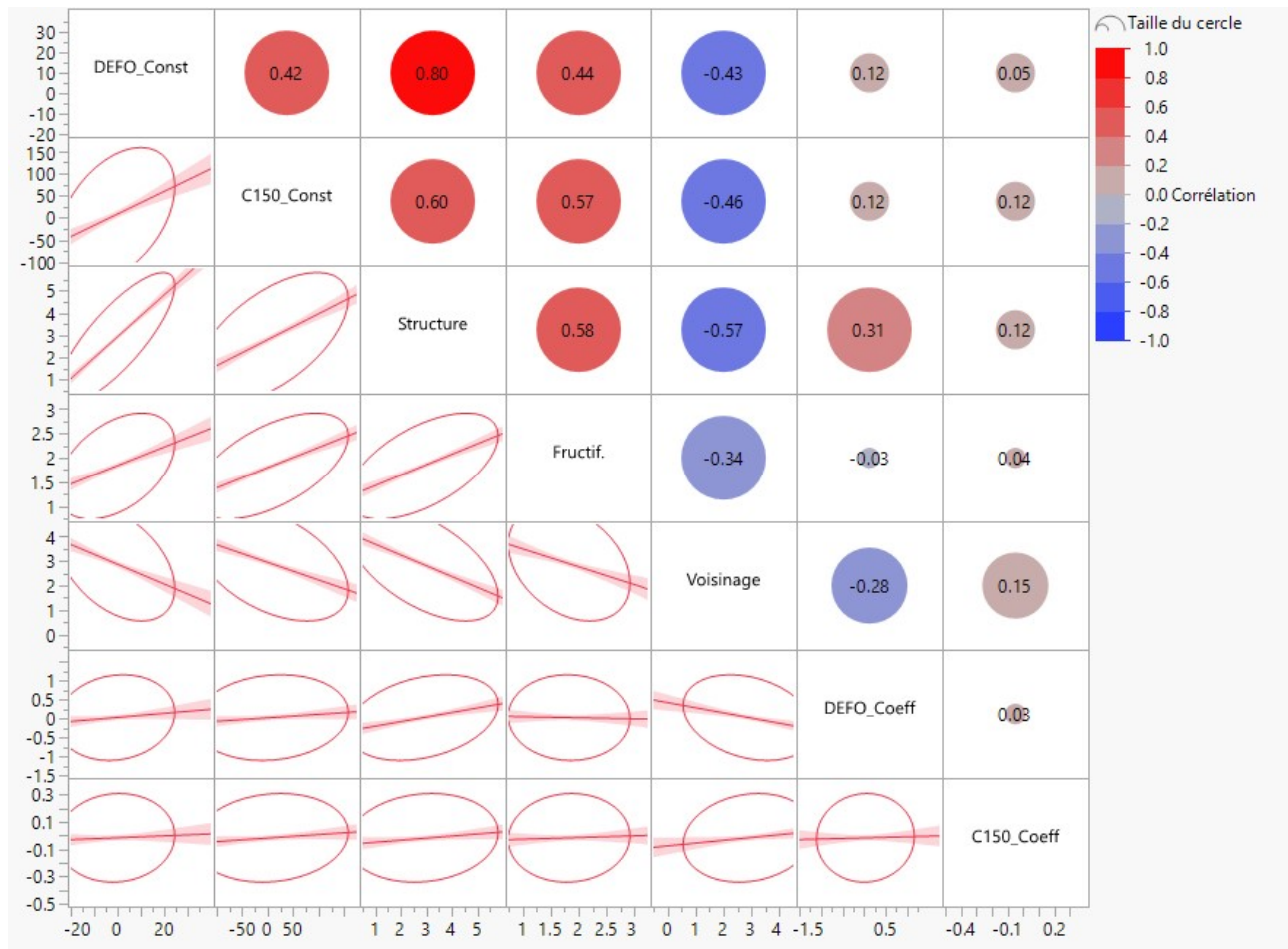


Figure 43 : Table de corrélation entre les différentes variables associées aux individus (arbres) pour les hêtres [les informations relatives aux différentes variables sont reprises dans la section méthodologique ci-dessus ; les coefficients de corrélation sont indiqués dans les bulles, dont la taille est inversement proportionnelle aux p-valeurs (cf Tableau 14) ; les ellipses reprenant 95% des points ainsi que les droites de régression avec intervalles de confiance sont représentées dans la partie inférieure de la table]

Tableau 14 : p-valeurs liées aux coefficients de corrélations pour les hêtres (valeurs significatives indiquées en gras)

	DEFO_Const	C150_Const	Structure	Fructif.	Voisinage	DEFO_Coeff	C150_Coeff
DEFO_Const		<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	0.1131	0.4699
C150_Const	<.0001		<.0001	<.0001	<.0001	0.1084	0.1128
Structure	<.0001	<.0001		<.0001	<.0001	<.0001	0.1333
Fructif.	<.0001	<.0001	<.0001		<.0001	0.7218	0.5824
Voisinage	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001		0.0001	0.0489
DEFO_Coeff	0.1131	0.1084	<.0001	0.7218	0.0001		0.7028
C150_Coeff	0.4699	0.1128	0.1333	0.5824	0.0489	0.7028	

5.6.4.3. Chênes pédonculés

EVOLUTION GLOBALE

Les résultats du modèles de prédiction de la défoliation sont présentés au Tableau 15. Le coefficient associé à l'année est non significatif dans les deux modèles. Il n'existe donc aucune évolution sur l'ensemble de la période.

Tableau 15 : Estimation des coefficients « Année » selon les Modèles 2 et Modèle 3 pour les chênes pédonculés

Terme	Coefficient	Prob. > t	IC95 (min)	IC95 (max)
Modèle 2	-0.32	0.09	-0.70	0.04
Modèle 3	-0.25	0.29	-0.72	0.22

Défoliation « corrigée »

La comparaison des moyennes pour le paramètre « défoliation corrigée » (effets « Individus » déduits) est présentée à la Figure 44. Par rapport à la moyenne globale, la valeur moyenne de 2010 est élevée et les valeurs de 2014 et 2017 sont basses. Notons que les années 2009 et 2011 comportent très peu de valeurs (Tableau 7), ce qui explique la plus grande largeur des intervalles de confiance correspondants.

La comparaison 2 à 2 des moyennes (Tableau 16) indique que la moyenne de 2020 est plus basse qu'en 2010, plus élevée qu'en 2017 et ne présente pas de différence statistique avec les autres années.

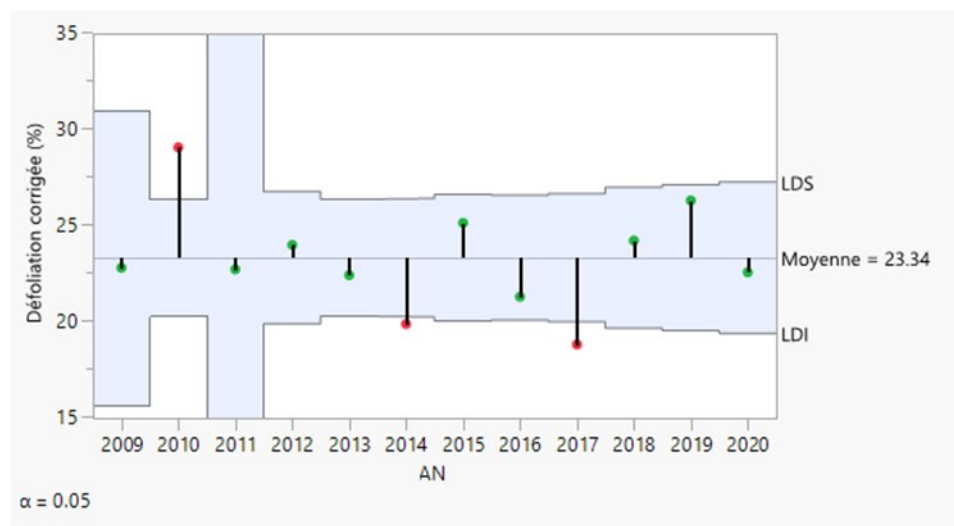


Figure 44 : Comparaison des moyennes annuelles par rapport à la moyenne globale, pour le paramètre « Défoliation corrigée » (Défoliation après déduction des effets aléatoires) ; les années dont le point est situés hors de la zone grisée (en rouge) présentent une moyenne significativement différente de la moyenne globale

Tableau 16 : Comparaison 2 à 2 des moyennes annuelles (Test de Student), pour le paramètre « Défoliation corrigée » (Défoliation après déduction des effets « individus ») ; les années ne présentant aucune lettre commune sont caractérisées par des moyennes significativement différentes ; les couleurs représentent l'ordre des moyennes annuelles (vert foncé = valeur la plus basse ; rouge foncé = valeur la plus élevée)

Année	Moyenne	Lettres d'appariement				
2009	22.8	B	C	D	E	F
2010	29.1	A				
2011	22.7	A	B	C	D	E
2012	24.0	B	C	D		
2013	22.4		C	D	E	
2014	19.9				E	F
2015	25.2	B	C			
2016	21.3			D	E	F
2017	18.8					F
2018	24.2	B	C	D		
2019	26.3	A	B			
2020	22.6	B	C	D	E	

Effets de la fructification

L'effet de la fructification annuelle moyenne sur la défoliation n'est pas du tout significatif (p-valeur 0.61) (Tableau 17).

Tableau 17 : Estimation du coefficient « Fructification annuelle moyenne » selon le Modèle 3 pour les chênes pédonculés

Terme	Coefficient	Prob. > t	IC95 (min)	IC95 (max)
Fructification annuelle moyenne	-0.78	0.61	-3.8	2.3

Fluctuations résiduelles

Vu l'absence d'effet de la fructification, ce paramètre n'a pas été calculé.

ANALYSE DES EFFETS « INDIVIDUS »

La corrélation la plus élevée est observée entre la constante de défoliation individuelle (DEFO_const) et la structure (Figure 45,

Tableau 18). La simplification de la ramification et la mortalité de branches semblent donc être les principaux facteurs affectant la défoliation. La croissance (C150_Coeff) est également corrélée à l'intensité de la fructification individuelle (moyenne sur l'ensemble de la période).

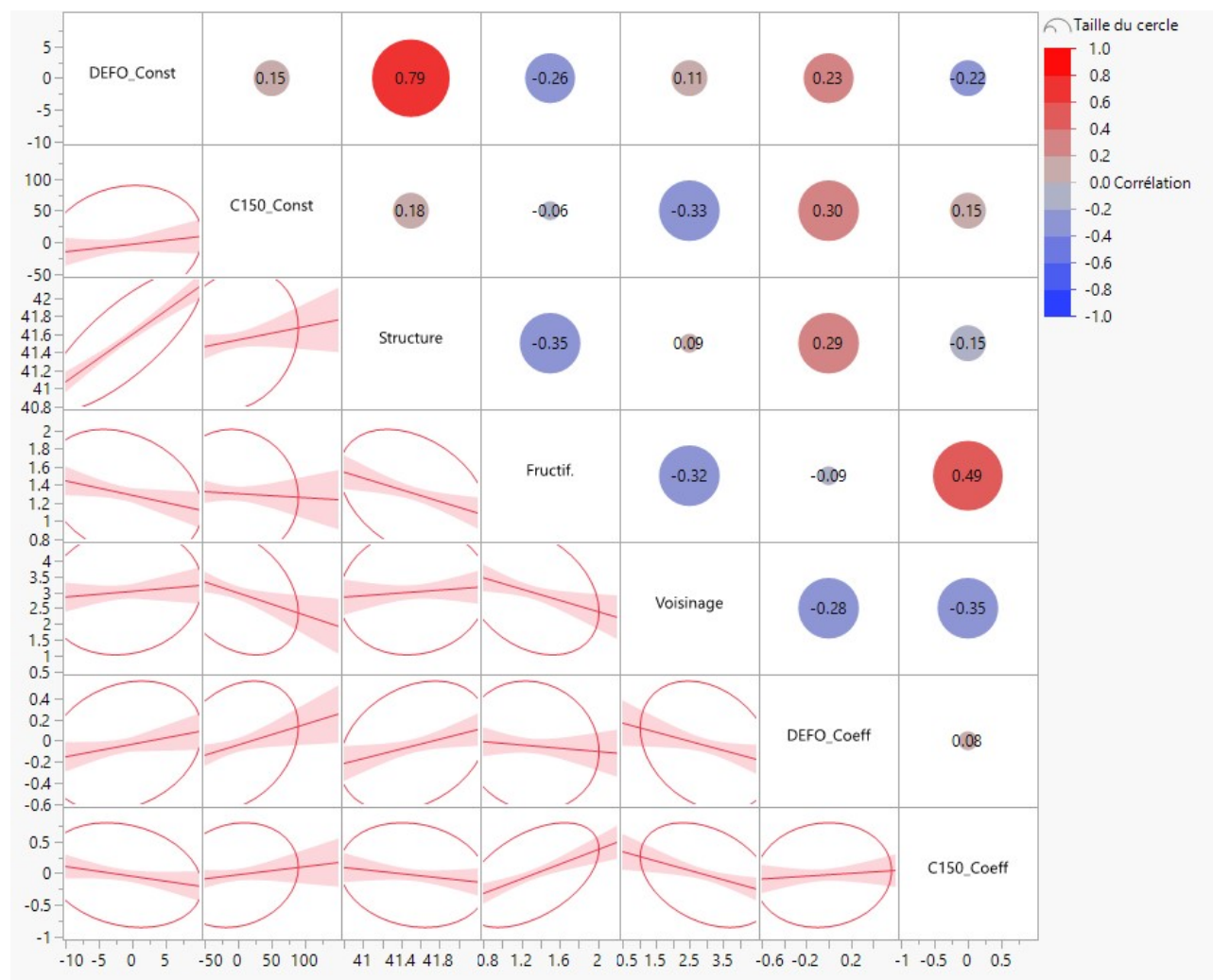


Figure 45 : Table de corrélation entre les différentes variables associées aux individus (arbres) pour les chênes pédonculés [les informations relatives aux différentes variables sont reprises dans la section méthodologique ci-dessus ; les coefficients de corrélation sont indiqués dans les bulles, dont la taille est inversement proportionnelle aux p-valeurs (cf Tableau 14) ; les ellipses reprenant 95% des points ainsi que les droites de régression avec intervalles de confiance sont représentées dans la partie inférieure de la table]

Tableau 18 : p-valeurs liées aux coefficients de corrélations pour les chênes pédonculés (valeurs significatives indiquées en gras)

	DEFO_ Const	C150_ Const	Structure	Fructif.	Voisinage	DEFO_ Coeff	C150_ Coeff
DEFO_Const		0.2823	<.0001	0.0522	0.4365	0.0943	0.1081
C150_Const	0.2823		0.1907	0.6681	0.013	0.0266	0.2858
Structure	<.0001	0.1907		0.0079	0.5266	0.0318	0.2624
Fructif.	0.0522	0.6681	0.0079		0.0187	0.5165	0.0001
Voisinage	0.4365	0.013	0.5266	0.0187		0.0406	0.0083
DEFO_Coeff	0.0943	0.0266	0.0318	0.5165	0.0406		0.5476
C150_Coeff	0.1081	0.2858	0.2624	0.0001	0.0083	0.5476	

5.6.4.4. Chênes sessiles

EVOLUTION GLOBALE

Le coefficient associé à l'année est non significatif dans les deux modèles (Tableau 19). Il n'existe donc aucune évolution sur l'ensemble de la période.

Tableau 19 : Estimation des coefficients « Année » selon les Modèles 2 et Modèle 3 pour les hêtres

Terme	Coefficient	Prob. > t	IC95 (min)	IC95 (max)
Modèle 2	0.009	0.09	-0.58	0.97
Modèle 3	-0.10	0.29	-0.65	0.70

ANALYSES DES FLUCTUATIONS

Défoliation « corrigée »

La comparaison des moyennes pour le paramètre « défoliation corrigée » (effets « Individus » déduits) est présentée à la Figure 44. Par rapport à la moyenne globale, seule la valeur la valeur de 2014 se distingue de la moyenne générale. Nous observons toutefois une fluctuation s'étalant sur plusieurs années, confirmée par les comparaisons 2 à 2 : une baisse de 2010 à 2014 suivie par une hausse à partir de 2014, (Tableau 20). La valeur atteinte en 2020 est semblable aux valeurs de 2010, 2012, 2018 et 2019, mais supérieure aux valeurs de 2013 à 2017.

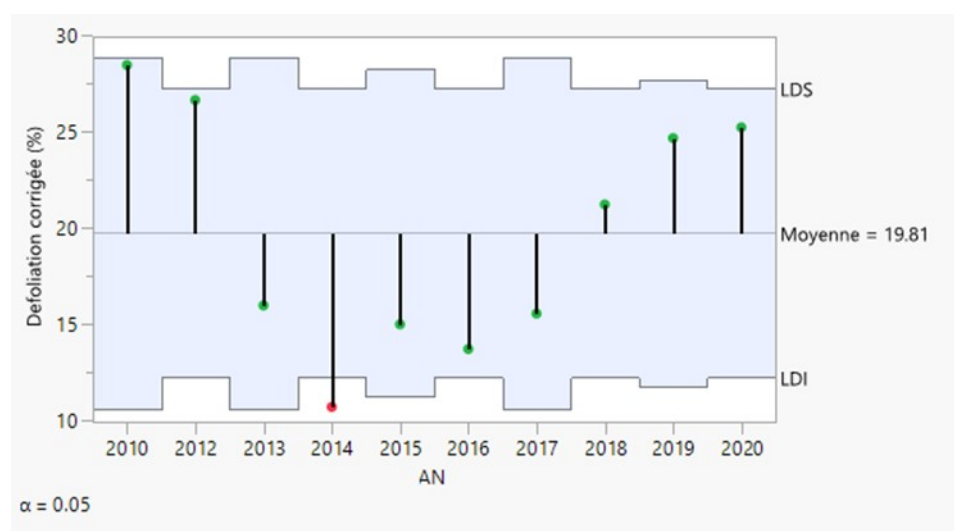


Figure 46 : Comparaison des moyennes annuelles par rapport à la moyenne globale, pour le paramètre « Défoliation corrigée » (Défoliation après déduction des effets aléatoires) ; les années dont le point est situé hors de la zone grisée (points rouges) présentent une moyenne significativement différente de la moyenne globale

Tableau 20 : Comparaison 2 à 2 des moyennes annuelles (Test de Student), pour le paramètre « Défoliation corrigée » (Défoliation après déduction des effets « individus ») ; les années ne présentant aucune lettre commune sont caractérisées par des moyennes significativement différentes ; les couleurs représentent l'ordre des moyennes annuelles (vert foncé = valeur la plus basse ; rouge foncé = valeur la plus élevée)

Année	Moyenne	Lettres d'appariement			
2010	28.5	A			
2012	26.7	A			
2013	16.0		B	C	D
2014	10.8				D
2015	15.1			C	D
2016	13.8			C	D
2017	15.6			C	D
2018	21.3	A	B	C	
2019	24.7	A	B		
2020	25.3	A			

Effets de la fructification

L'effet de la fructification annuelle moyenne sur la défoliation n'est pas du tout significatif (p-valeur 0.61) (Tableau 21).

Tableau 21 : Estimation du coefficient « Fructification annuelle moyenne » selon le Modèle 3 pour les hêtres

Terme	Coefficient	Prob. > t	IC95 (min)	IC95 (max)
Fructification annuelle moyenne	-0.28	0.87	-3.9	3.4

Fluctuations résiduelles

Vu l'absence d'effet de la fructification, ce paramètre n'a pas été calculé.

ANALYSE DES EFFETS « INDIVIDUS »

Nous observons une corrélation hautement significative entre la structure et la constante de défoliation individuelle (DEFO_const) (Figure 45,

Tableau 18). La simplification de la ramification et la mortalité de branches semblent donc être les principaux facteurs affectant la défoliation. Contrairement au chêne pédonculé, la défoliation est en outre positivement corrélée à l'intensité de la fructification (moyenne individuelle). De plus, nous observons une corrélation négative entre l'évolution de la défoliation (DEFO_coeff) et son niveau (DEFO_const). Ceci s'explique par le fait que les arbres dont la défoliation est plus faible que la moyenne (donc proche de zéro) ne peuvent que se dégrader. Cette dégradation est compensée par une amélioration de certains arbres fortement dégradés, étant donné que la tendance globale est non significative.

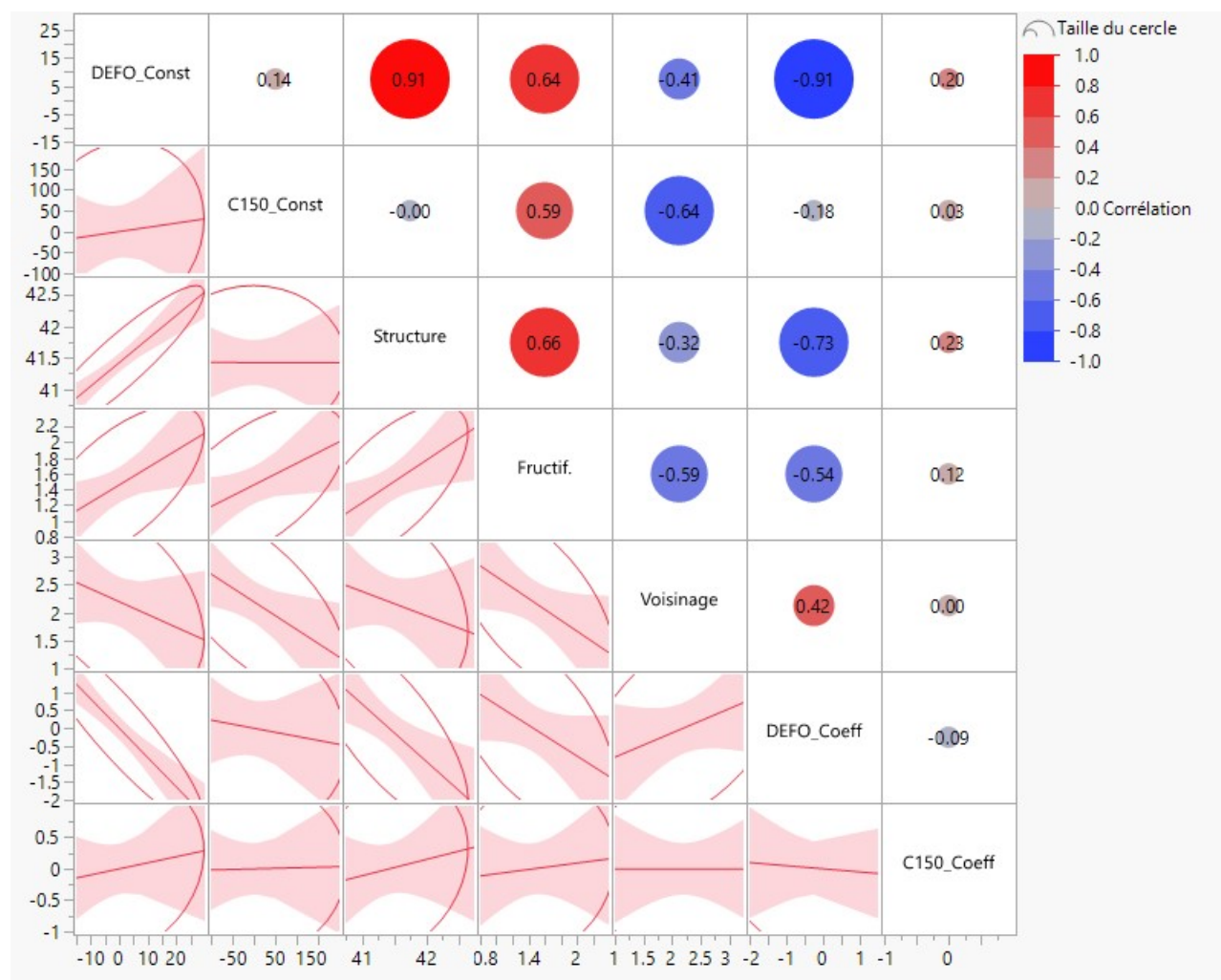


Figure 47 : Table de corrélation entre les différentes variables associées aux individus (arbres) pour les chênes sessiles [les informations relatives aux différentes variables sont reprises dans la section méthodologique ci-dessus ; les coefficients de corrélation sont indiqués dans les bulles, dont la taille est inversement proportionnelle aux p-valeurs (cf Tableau 14) ; les ellipses reprenant 95% des points ainsi que les droites de régression avec intervalles de confiance sont représentées dans la partie inférieure de la table]

Tableau 22 : p-valeurs liées aux coefficients de corrélations pour les chênes sessiles (valeurs significatives indiquées en gras)

	DEFO_ Const	C150_ Const	Structure	Fructif.	Voisinage	DEFO_ Coeff	C150_ Coeff
DEFO_Const		0.6818	0.0001	0.0326	0.213	0.0001	0.5457
C150_Const	0.6818		0.9896	0.058	0.0331	0.5917	0.9387
Structure	0.0001	0.9896		0.0277	0.3372	0.0103	0.5016
Fructif.	0.0326	0.058	0.0277		0.0558	0.0865	0.7192
Voisinage	0.213	0.0331	0.3372	0.0558		0.196	0.9997
DEFO_Coeff	0.0001	0.5917	0.0103	0.0865	0.196		0.7821
C150_Coeff	0.5457	0.9387	0.5016	0.7192	0.9997	0.7821	

5.7. 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.

Aucune attaque d'insectes défoliateurs n'a été observée, ni pour les chênes, ni pour les hêtres.

Pour le hêtre, le principal dommage observé est la mortalité de branches, qui affecte près de 30% des arbres. Cette année, un chablis a été constaté parmi les arbres suivis.

Tableau 23: Dommages observés sur les hêtres et proportion des arbres affectés

Partie affectée	Symptôme	Proportion d'arbres affectés
Arbre entier	Chablis	1%
Feuilles	Vert clair à jaune	1%
Branches fines	Mortes ou mourantes	28%
Branches de 2 >= \varnothing <10 cm	Mortes ou mourantes	5%
Branches de \varnothing >=10 cm	Mortes ou mourantes	2%
Tronc	Ecoulement de sève	1%
	Blessure	1%

Chez les chênes pédonculés, aucun dégât n'a été rapporté.

Chez les chênes sessiles, la présence de branches fines mortes a été notée sur 2 arbres (20% des effectifs) et l'oïdium sur 1 arbre.

Tableau 24: Dommages observés sur les chênes sessiles et proportion des arbres affectés

Partie affectée	Symptôme	Proportion d'arbres affectés
Branches fines	Mortes	20 %
Feuilles	Oïdium	10%

6. Suivi photographique des houppiers à partir du sol

La collecte de clichés se poursuit avec beaucoup de soin, pour la 6^e année consécutive. Le traitement systématique de ces images n'a pas encore débuté, mais nous explorons avec intérêt les nouvelles perspectives offertes par les techniques de « machine learning ». En outre, 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 branches mortes (cf rapport 2019).

Cette année, nous présentons l'exemple d'un arbre (2877_9) qui a subi une augmentation brutale de la défoliation entre 2018 et 2019, mais qui a bien récupéré en 2020. Cette fluctuation pourrait être en partie liée à la fructification, car il s'agit d'un des seuls hêtres qui a produit plus de fruits en 2019 qu'en 2018 et 2020. Mais surtout, cette augmentation de défoliation en 2019 n'est pas liée à une mortalité de branches, rendant dès lors possible une récupération rapide.



Figure 48 : Exemple de récupération d'un hêtre en 2020 après une important perte de feuille en 2019

7. Discussion générale

Les évolutions de la défoliation sont très contrastées selon l'essence considérée :

- Sur l'ensemble de la période, nous observons une augmentation lente, mais significative, de la défoliation des hêtres (0.23% par an). La défoliation des hêtres présente d'importantes fluctuations interannuelles qui sont clairement liées aux fluctuations de l'intensité de la fructification. Les valeurs de défoliations observées en 2020 sont significativement supérieures à la moyenne globale, mais cet écart devient non significatif (pratiquement nul) si l'on déduit l'effet de la fructification. Les valeurs de 2019 sont par contre nettement supérieures à celles des autres années après déduction de l'effet de la fructification.
- La défoliation des chênes pédonculés ne présente pas d'évolution significative sur l'ensemble de la période et les fluctuations ne sont pas liées aux fluctuations de la fructification. Les valeurs observées en 2020 sont semblables aux moyennes sur l'ensemble de la période.
- La défoliation des chênes sessiles ne présente pas d'évolution significative sur l'ensemble de la période. Par contre, nous observons une diminution de 2010 à 2014 suivie d'une augmentation. Les fluctuations de la fructification ne sont pas corrélées à ces variations de défoliation.

L'analyse des relations entre variables au niveau de l'individu a fait ressortir pour les 3 essences une forte corrélation entre la structure et la défoliation, ce qui suggère que la mortalité des branches et la simplification de la ramification sont les principales causes du déficit foliaire. Les autres causes, telles que la chute prématurée ou les attaques de chenilles, n'ont pas de rôle significatif dans le contexte de cette étude.

En outre, nous observons chez le hêtre de fortes corrélations positives entre défoliation, structure, fructification et circonférence, ainsi que de fortes corrélations négatives entre ces variables et l'indice de voisinage. Cette relation avec la circonférence peut s'expliquer par l'effet de l'âge de l'arbre (arrêt de la croissance en hauteur, production de fruits privilégiée par rapport à la ramification, ...). La forte corrélation (négative) entre l'indice de voisinage et les deux principaux paramètres sanitaires (défoliation et structure) peut s'expliquer par un lien commun de ces variables avec l'âge de l'arbre, mais des effets directs liés à la l'enlèvement des arbres voisins (blessures au tronc et aux racines, tassement du sol, ...) peuvent également être envisagés. Sur base de la relation individuelle défoliation-circonférence et de la croissance moyenne, nous avons calculé une augmentation de défoliation de 0.13% par an, ce qui est situé dans l'intervalle de confiance de l'augmentation calculée par l'analyse des tendances de défoliation (0.03 – 0.43% par an).

8. Conclusions et perspectives

Après une sécheresse exceptionnelle en 2018 et un pic de chaleur record en 2019, l'année 2020 se caractérise par une sécheresse printanière suivie d'une période caniculaire estivale. Toutefois, l'état sanitaire des chênes et des hêtres en forêt de Soignes ne s'est pas détériorée par rapport aux années précédentes. Au contraire, l'état sanitaires des hêtres, après déduction de l'effet de la fructification, s'est amélioré par rapport à l'année 2019, marquée par un pic attribué à un effet différé de la sécheresse de 2018. Il est toutefois trop tôt pour observer l'effet éventuel des conditions climatiques de 2020, *a fortiori* la canicule du mois d'août. Son effet pourrait se manifester en 2021 voire en 2022.

Sur base des analyses des évolutions sur l'ensemble de la période 2009-2020, nous avons mis en évidence une augmentation de la défoliation de 0.23% par an pour les hêtres, qui pourrait être attribuée à l'augmentation de l'âge des arbres au cours de la période. Globalement, les observations suggèrent que le seuil critique de résistance n'a pas été dépassé en forêt de Soignes, et ce malgré les sécheresses répétées et les pics de chaleurs extrêmes observés ces dernières années. Cette résistance pourrait être liée à leur capacité à utiliser les des réserves d'eau dans les couches profondes du sol, comme cela a été suggéré lors de l'étude dendrométrique en forêt de Soignes (https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/ART_201512_DendrochronoHetreSoignes_V F). Certes, leur état sanitaire est plutôt mauvais depuis le début de la période de suivi, et il ne devrait pas s'améliorer avec l'âge, mais aucun paramètre ne suggère une accélération récente de cette dégradation.

Pour les chênes, aucune tendance linéaire significative n'est détectée, mais nous observons pour les chênes sessiles une diminution rapide entre 2010 et 2014, suivie d'une lente augmentation entre 2014 et 2020. Cette augmentation n'a pas pu être expliquée, mais elle ne semble pas inquiétante car les niveaux de défoliation moyens étaient extrêmement faibles en 2014 et car une stabilisation se dessine depuis 2019.

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 (%)	C150
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