

Université catholique
de Louvain



Bruxelles-Environnement



Earth and Life Institute
Environmental
Sciences



Suivi de l'état sanitaire en forêt de Soignes bruxelloise 2019

Réalisation
Technicien
Promoteur

Hugues Titeux
Frédéric Hardy
Quentin Ponette

Décembre 2019

Convention UCL – Bruxelles Environnement 2019

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 le but est d'évaluer la vitalité actuelle de la forêt mais aussi son évolution au fil des années.

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.

Depuis 2014, un suivi photographique a été mis en place afin de mieux comprendre les facteurs impliqués dans l'évolution de la défoliation moyenne et de la structure du houppier des hêtres et des chênes. Les photographies sont prises annuellement en été et en hiver.

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 2019, 104 hêtres, 42 chênes pédonculés et 9 chênes sessiles, sur 23 placettes, ont été observés par les adjoints forestiers de Bruxelles Environnement. Après application de filtres (statut de l'arbre, visibilité), un échantillon de 40 chênes indigènes et 88 hêtres a été retenu pour caractériser l'état

sanitaire actuel de la forêt de Soignes, son évolution et les relations entre les différents paramètres appréhendés.

Malgré une sécheresse très prononcée en 2018, et un pic de chaleur cette année, nous n'observons pas de dégradation anormale des hêtres en 2019. Leur situation est en effet très proche de celle de 2017. La situation des chênes s'est par contre globalement dégradée durant cette période.

En analysant les évolutions à plus long terme, et en déduisant les effets de la fructification et de la variabilité inter-individu, nous avons mis en évidence une augmentation de la défoliation depuis 2014 pour les 3 essences suivies. Bien que significative, cette évolution est lente pour les chênes pédonculés et les hêtres (+1%), mais nettement plus élevée pour les chênes sessiles (+2.7%). Ces analyses statistiques pourront être complétées à l'avenir par l'introduction d'autres variables telles que la circonférence, la densité et l'architecture du houppier.

Date de fin : Décembre 2019.

Table des matières

Résumé	3
Table des figures.....	6
Table des tableaux.....	8
1. Contexte	9
2. Objectifs	11
3. Description de la forêt de Soignes	12
3.1. Composition spécifique	12
3.2. Sols.....	12
3.3. Climat.....	15
4. Mise en place de la campagne du suivi sanitaire de 2019	17
4.1. Plan d'échantillonnage	17
4.2. Protocole d'évaluation.....	20
4.3. La défoliation, indicateur de vitalité des arbres	20
4.4. Caractéristiques des arbres observés.....	22
4.4.1. Effectifs et distribution des arbres en classes de grosseurs	22
4.4.2. Concurrence – Indice d'ombrage.....	24
4.4.3. Statut social.....	25
4.4.4. Visibilité.....	26
4.5. Encodage et traitement des données.....	27
4.6. Contrôle-qualité.....	27
5. Résultats et discussions.....	30
5.1. Fructification	30
5.2. Structure de la couronne	31
5.3. Pousses épïcormiques	35
5.4. Décoloration des feuilles	36
5.5. Défoliation	37
5.5.1. Défoliation moyenne des arbres de la campagne 2019	37
5.5.2. Lien entre la défoliation et d'autres variables	39
5.5.2.1. Défoliation et circonférence.....	39
5.5.2.2. Défoliation et concurrence.....	41
5.5.2.3. Défoliation et décoloration	42
5.5.2.4. Défoliation et fructification.....	44
5.5.2.5. Défoliation et structure du houppier	46
5.5.3. Evolution de la défoliation	47
5.5.3.1. Comparaisons 2017-2019.....	47
5.5.3.2. Evolution des moyennes de 2009 à 2019.....	49
5.5.3.3. Analyse des tendances	52
5.6. Dommages	58
6. Suivi photographique des houppiers à partir du sol	59
7. Conclusions générales et perspectives.....	62
Annexe 1 : Liste des arbres du suivi photographique	63

Table des figures

Figure 1: Proportion des types de peuplements en forêt de Soignes bruxelloise (Braem <i>et al.</i> , 2010)	12
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).....	13
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).....	14
Figure 4 : Température et précipitations mensuelles mesurées à la station météorologique d'Uccle, 1981-2010 (IRM, 2011).....	15
Figure 5: Localisation des placettes en hêtraie (étoiles bleues et vertes) et chênaie (croix rouges) ...	19
Figure 6 : Distribution des arbres de l'échantillon analysé en 2019 selon les classes de circonférence	23
Figure 7 : Distribution des arbres selon le degré de concurrence pour l'échantillon analysé en 2019	24
Figure 8 : Proportion des statuts sociaux en fonction des essences pour l'échantillon analysé en 2019	25
Figure 9: Distribution des arbres en fonction de la visibilité et de l'essence pour l'échantillon analysé en 2019.....	26
Figure 10 : Distribution des arbres selon la visibilité pour l'ensemble des arbres non dominés observés en 2018.	27
Figure 11 : Comparaison des valeurs de défoliation selon les équipes BE et UCL en 2019 ; 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 %.....	29
Figure 12 : Evolution du degré de fructification de 2010 à 2018 pour les chênes et les hêtres.....	30
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.....	31
Figure 14: Fiche de terrain différenciant les 8 formes du houppier du hêtre.....	32
Figure 15 : Distribution des chênes pédonculés selon la structure de la couronne (n= 35).....	33
Figure 16 : Distribution des chênes sessiles selon la structure de la couronne (n=9)	33
Figure 17 : Distribution des hêtres selon la structure de la couronne (n=88) ; les codes se réfèrent à la Figure 14. Notons que le code 8 n'a pas été observé sur ce sous-échantillon.	34
Figure 18 : Distribution des arbres selon l'abondance des pousses épïcormiques	35
Figure 19 : Distribution des arbres selon le pourcentage de décoloration du feuillage.....	36
Figure 20 : Défoliation des chênes et des hêtres en 2019 (CP= chênes pédonculés ; CS = chênes sessiles ; HE = hêtres) ; les moyennes sont représentées par des points rouges	37
Figure 21 : Défoliation des chênes (CP= chênes pédonculés ; CS = chênes sessiles) et des hêtres (HE) par placette en 2019. Certains box-plots sont incomplets en raison du nombre réduit d'effectifs (c'est surtout le cas lorsque des chênes sont présents en hêtraie, ou pour des hêtres du suivi photo)	38
Figure 22 : Régression linéaire de la défoliation des hêtres en fonction de la circonférence en cm (C150) en 2019	40
Figure 23 : Défoliation des chênes indigènes (CP : chêne pédonculé ; CS : chêne sessile) et des hêtres (HE) selon l'indice d'ombrage en 2019	41
Figure 24 : Défoliation des chênes indigènes (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles) et des hêtres (HE) en 2019 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%].....	42
Figure 25 : Evolution de la défoliation des chênes indigènes (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles) et des hêtres (HE) entre 2017 et 2019 selon l'intensité de la décoloration en 2017 [classe 0 : 0 à-10% ; classe 1 : 10-25% ; classe 2 : 25-60% ; classe 3 : >60%].....	43
Figure 26 : Effet de la fructification sur l'apparence globale de la cime des hêtres	44
Figure 27 : Distribution de la défoliation des chênes (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles) et des hêtres (HE) selon l'abondance de la fructification en 2019.....	45

Figure 28: Distribution de la défoliation des chênes (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles) et des hêtres (HE) selon la forme du houppier en 2019 (la signification des codes est indiquée aux Figure 13 et Figure 14)	46
Figure 29 : Comparaison des classes de défoliation de 2017 et 2019 pour les chênes (la taille des bulles correspond au nombre de points ayant les mêmes coordonnées)	47
Figure 30 : Comparaison des classes de défoliation de 2017 et 2019 pour les hêtres observés ces deux années (la taille des bulles correspond au nombre de points ayant les mêmes coordonnées)	48
Figure 31 : Evolution de la défoliation des chênes pédonculés (CP), des chênes sessiles (CS) et des hêtres (HE) de 2009 à 2019	49
Figure 32 : Evolution comparée des défoliations moyennes de Hêtres en forêt de Soignes bruxelloise (BXL), en Wallonie (RW) et en Flandre (VL) depuis 2010	50
Figure 33 : Evolution comparée des défoliations moyennes de chênes en forêt de Soignes bruxelloise (BXL), en Wallonie (RW) et en Flandre (VL) depuis 2010	51
Figure 34 : Evolution des valeurs de défoliation « corrigées » (après déduction des effets « individus » et de l'effet de la fructification) pour les hêtres	53
Figure 35 : Evolution des valeurs de défoliation « corrigées » (après déduction des effets « individus ») pour les chênes pédonculés.....	54
Figure 36 : Evolution des valeurs de défoliation « corrigées » (après déduction des effets « individus » et de l'effet de la fructification) pour les chênes sessiles	55
Figure 37 : Coefficients associés à l'année pour chaque arbre (= somme de l'effet fixe et de l'effet aléatoire individu-dépendant) pour la période 2014-2019 ; les couleurs sont fonction des écarts à la moyenne de ces coefficients pour chaque essence.....	56
Figure 38 : Coefficients associés à l'année pour chaque arbre (= somme de l'effet fixe et de l'effet aléatoire individu-dépendant) pour la période 2014-2019 en fonction de la défoliation moyenne sur la même période ; les couleurs sont fonction des écarts à la moyenne de défoliation pour chaque essence	57
Figure 39 : Exemple d'augmentation continue de la défoliation couplée à un effet de la fructification en 2016 et 2018 (flèches rouges : branches mortes durant l'année écoulée ; flèches grises : emplacement de branches mortes tombées ou cassées durant l'année écoulée)	60
Figure 40 : Exemple de récupération partielle après une dégradation brutale en 2017 (flèches rouges : branches mortes durant l'année écoulée ; flèches grises : emplacement de branches mortes tombées ou cassées durant l'année écoulée).....	61

Table des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques et exemples de facteurs de dépérissement.	10
Tableau 2 : Caractéristiques climatiques mesurées en saison de végétation 2019 comparées aux normales mensuelles calculées sur la période 1981-2010 (IRM, Uccle)	16
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	18
Tableau 4 : Effectifs (placettes, arbres) lors des campagnes d'observation de 2009 à 2019	22
Tableau 5 : Moyenne des écarts de défoliation par essence observée en 2019 et résultats des tests t de Student	28
Tableau 6 : Corrélation entre la circonférence et la défoliation en fonction de l'essence et de l'année	39
Tableau 7: Résultats des régressions linéaires significatives (p valeur < 0.05) entre la circonférence (x ; cm) et la défoliation (y ;%) par année.	40
Tableau 8: Valeurs moyennes de défoliation par année et par essence (les effectifs sont repris entre parenthèses).....	49
Tableau 9 : Tests sur les facteurs fixes du modèle mixte [Eq1] pour les hêtres (les coefficients associés à la fructification indiquent des écarts de défoliation liés entre les codes 2 et 1 ou 3 et 2 ; 1 = absente, 2 = rare, 3 = abondante).....	53
Tableau 10 : Tests sur les facteurs fixes du modèle mixte [Eq1] pour les chênes pédonculés (les coefficients associés à la fructification indiquent des écarts de défoliation liés entre les codes 2 et 1 ou 3 et 2 ; 1 = absente, 2 = rare, 3 = abondante)	54
Tableau 11 : Tests sur les facteurs fixes du modèle mixte [Eq1] pour les chênes sessiles (les coefficients associés à la fructification indiquent des écarts de défoliation liés entre les codes 2 et 1 ou 3 et 2 ; 1 = absente, 2 = rare, 3 = abondante).	55
Tableau 12: Symptômes et dommages observés sur les chênes pédonculés et proportion des arbres affectés	58
Tableau 13: Symptômes et dommages observés sur les hêtres et proportion des arbres affectés.....	58

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.

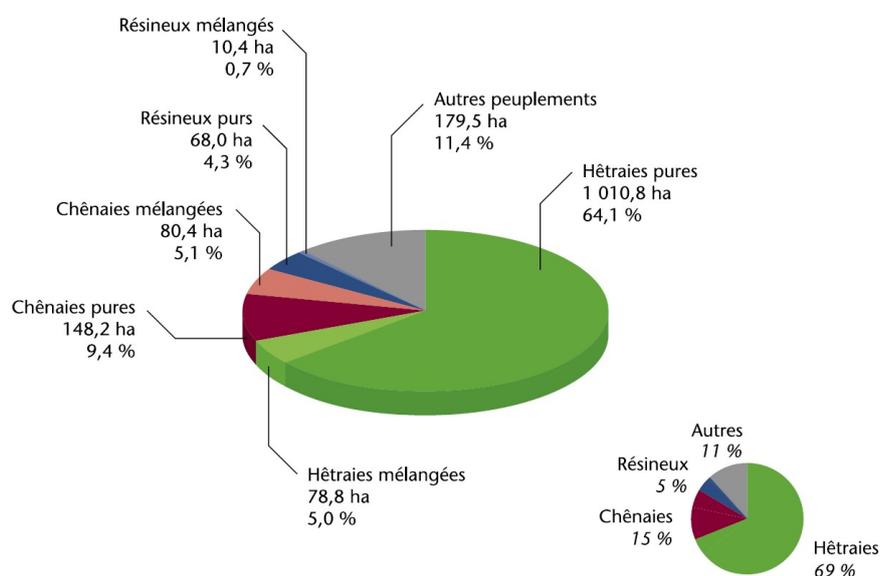


Figure 1: Proportion des types de peuplements en forêt de Soignes bruxelloise (Braem *et al.*, 2010)

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

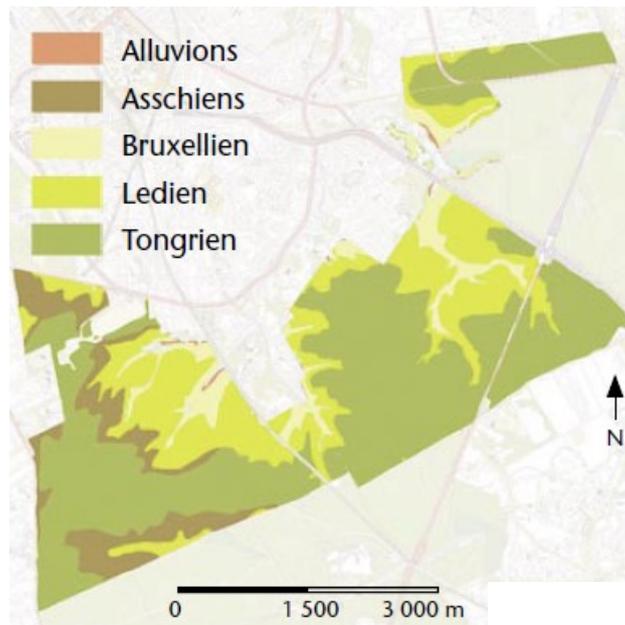


Figure 2: Roche-mère géologique présente sous le limon éolien. Les teintes jaunes présentent les assises à dominance sableuse (source: carte géologique de la Belgique, numérisation: BE-IBGE)

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.

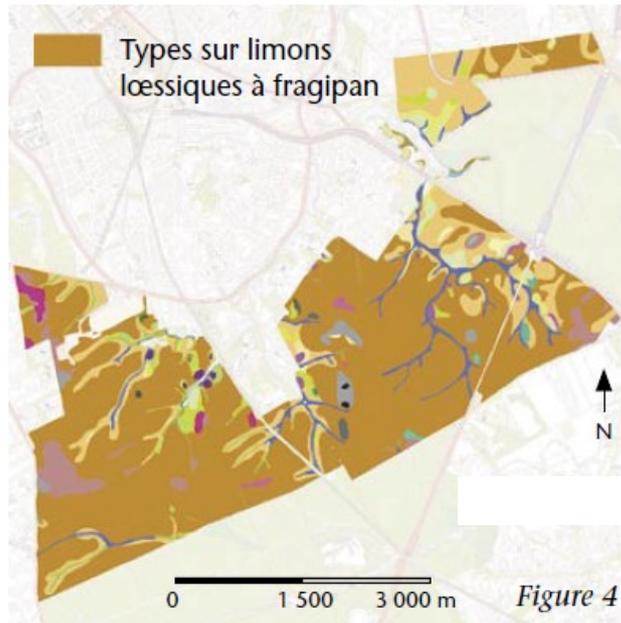


Figure 3 : Les sols de la Forêt de Soignes sont dominés par le type Abc interprété comme étant un sol limoneux à fragipan (source: cartes des sols de Belgique; numérisation BE-IBGE)

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.

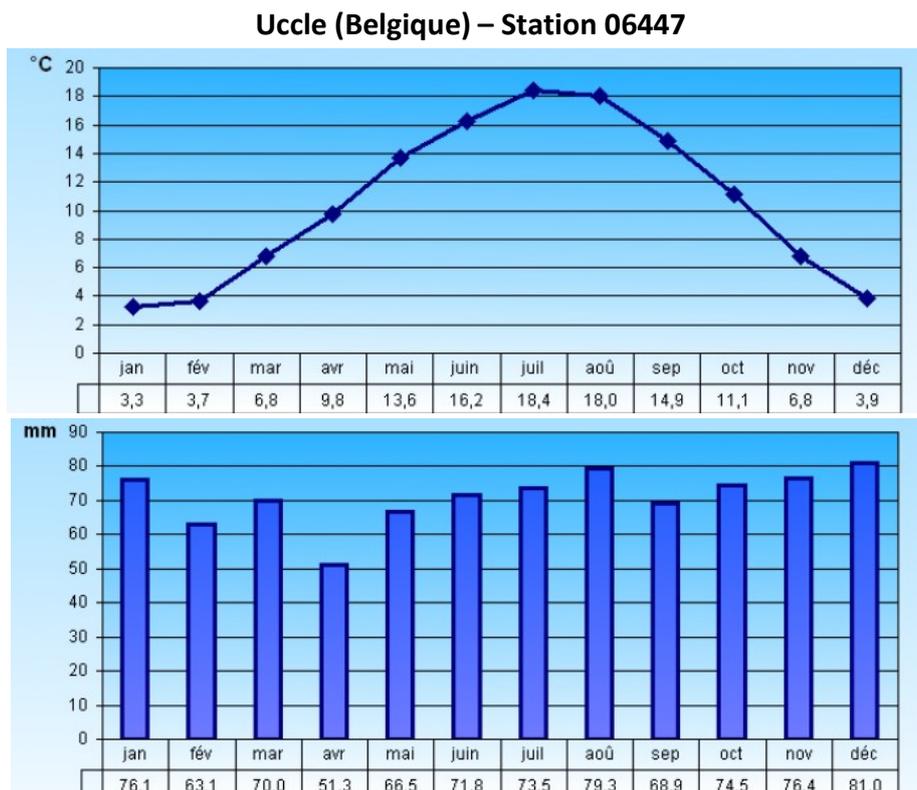


Figure 4 : Température et précipitations mensuelles mesurées à la station météorologique d'Uccle, 1981-2010 (IRM, 2011).

Les valeurs météorologiques mesurées à Uccle durant la période de végétation de 2019 sont présentées au

Tableau 2. Par rapport aux normales mensuelles observées de 1981 à 2010, les températures moyennes sont anormalement élevées en juin, mais des pics de températures supérieures à 40°C ont été enregistrées fin juillet. Les précipitations sont légèrement inférieures à la normale en avril, mai, juillet et août, et légèrement supérieures en juin. Globalement, la période de végétation peut être qualifiée de « normale », à l'exception d'un pic de température extrême fin juillet.

Tableau 2 : Caractéristiques climatiques mesurées en saison de végétation 2019 comparées aux normales mensuelles calculées sur la période 1981-2010 (IRM, Uccle)

	Préc (mm)	Préc normale (mm)	T° moy (°C)	T° normale (°C)
Avril 2019	36.0	51,3	11.0	9,8
Mai 2019	55.0	66,5	11.9	13,6
Juin 2019	98.1	71,8	18.5	16,2
Juillet 2019	52.8	73,5	19.5	18,4
Août 2019	47.9	79,3	19.2	18
Sept. 2019	62.6	68.9	15.2	14.9

4. Mise en place de la campagne du suivi sanitaire de 2019

Les activités suivantes ont été réalisées en 2019 :

- (i) Le suivi de l'état sanitaire de 23 placettes de la forêt de Soignes, incluant :
 - a. La mise à jour du plan d'échantillonnage
 - b. Les observations réalisées par les adjoints forestiers conformément au protocole *ICP Forests*
 - c. La mise en place du suivi photographique des houppiers
- (ii) Le contrôle qualité, comprenant
 - a. La formation pratique des adjoints forestiers le 29 juin 2019
 - b. La revisite de 7 placettes du suivi sanitaire par l'UCL
- (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 2019 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.

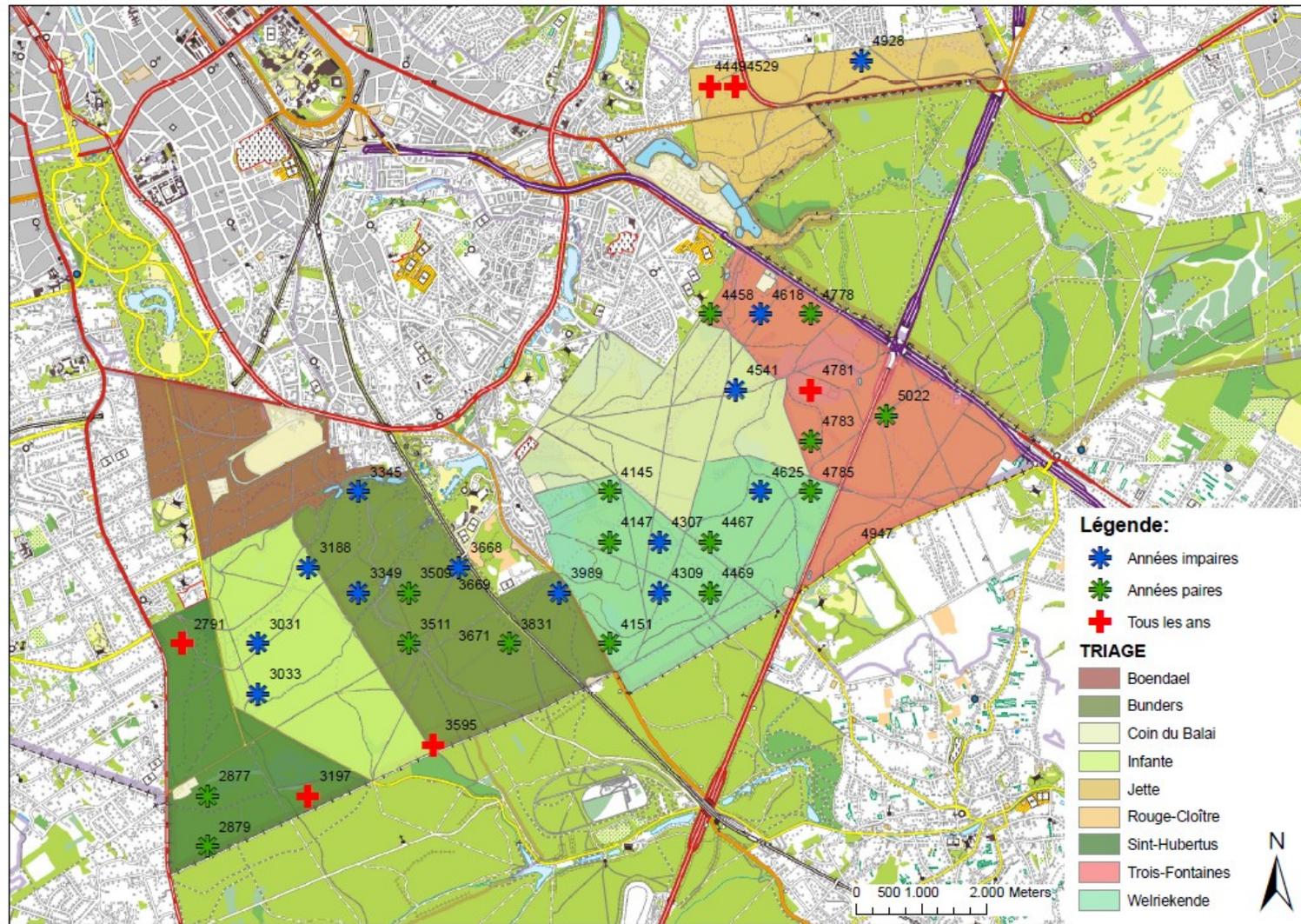
Nous avons donc introduit depuis 2018 une modification du plan d'échantillonnage, consistant à effectuer un suivi annuel (bisannuel jusqu'alors) sur les hêtres faisant l'objet du suivi photographique (cf Annexe), soit 30 arbres. Ce sous-échantillon, sélectionné pour être représentatif de l'échantillon 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 compensé 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 (paires et impaires).

Pour les hêtres non sélectionnés pour le suivi photographique, l'évaluation continue à être effectuées 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 (15 placettes)	Années impaires (13 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	3031 (2, 4, 5, 6, 9), 3345 (2, 4), 3349 (2, 3), 3989 (2), 4309 (1, 2, 3, 4, 5), 4618 (7, 12)	2877 (5, 7, 8, 9, 10), 2879 (1), 4145 (1, 8), 4147 (18, 19, 20), 4469 (2, 3, 4), 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 2019, 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.

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 2019

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Placettes	34	21	19	21	19	21	19	21	19	22	23
Chênes pédonculés	9	68	1	37	47	45	45	44	43	40	42
Chênes sessiles	1	7		10	7	10	8	8	7	10	9
Chênes non déterminé	2	1					1		1		
Hêtre	119	115	70	111	102	124	106	119	106	109	104
Total arbres	131	191	71	161	157	179	160	171	157	159	155

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 2019 portent sur un échantillon plus restreint : **88 hêtres, 31 chênes pédonculés et 9 chênes sessiles.**

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

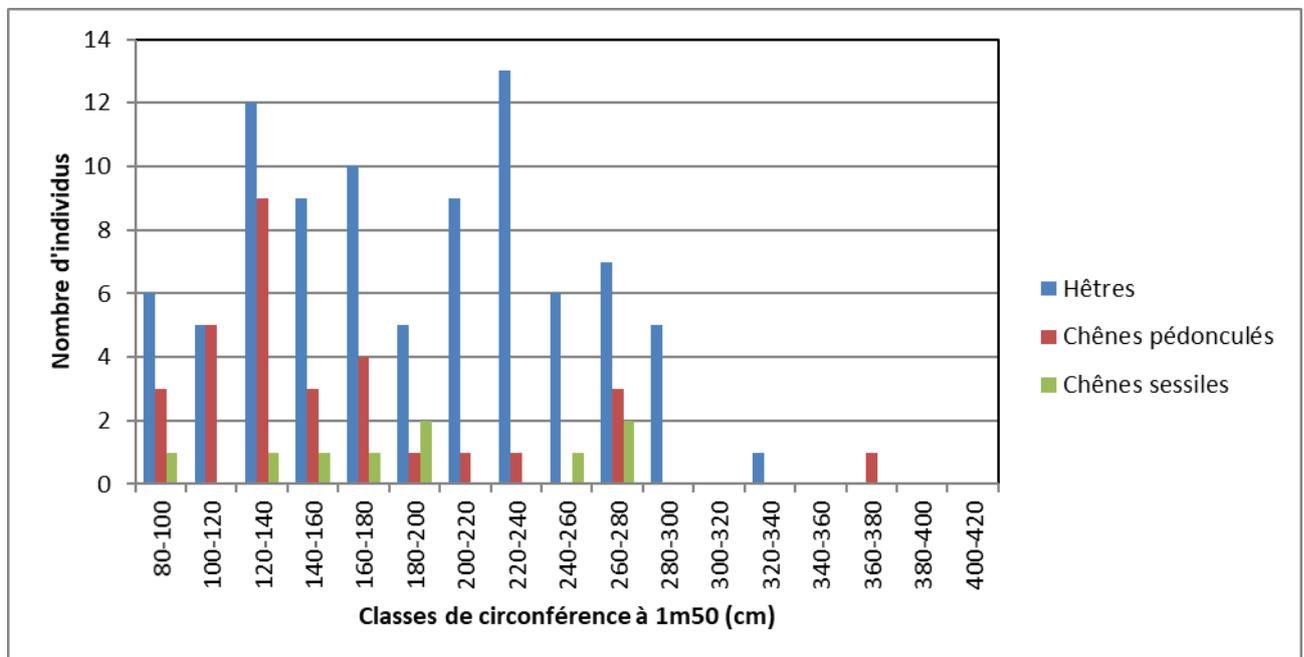


Figure 6 : Distribution des arbres de l'échantillon analysé en 2019 selon les classes de circonférence

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 ; les arbres en croissances libres ou faiblement concurrencés ont souvent 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.

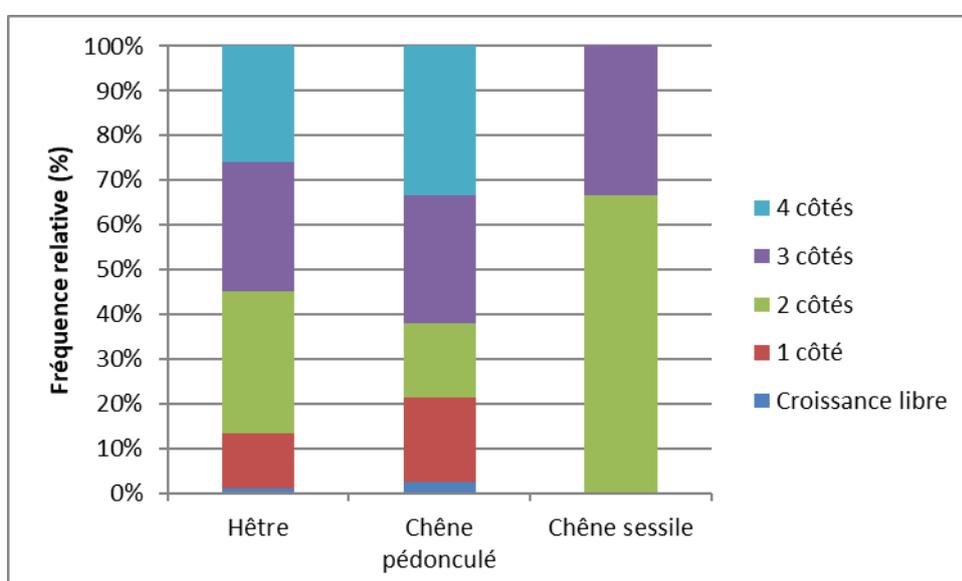


Figure 7 : Distribution des arbres selon le degré de concurrence pour l’échantillon analysé en 2019

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.

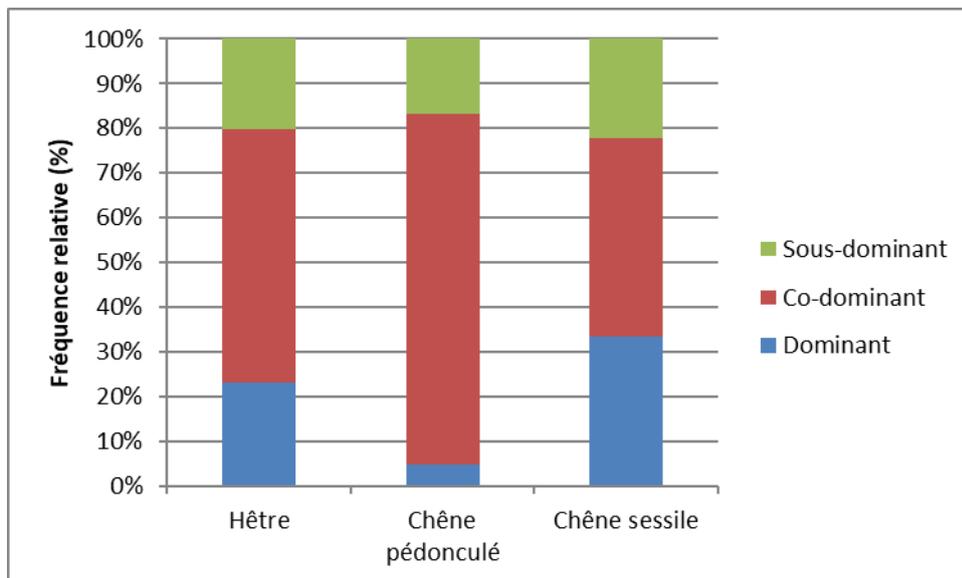


Figure 8 : Proportion des statuts sociaux en fonction des essences pour l'échantillon analysé en 2019

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.

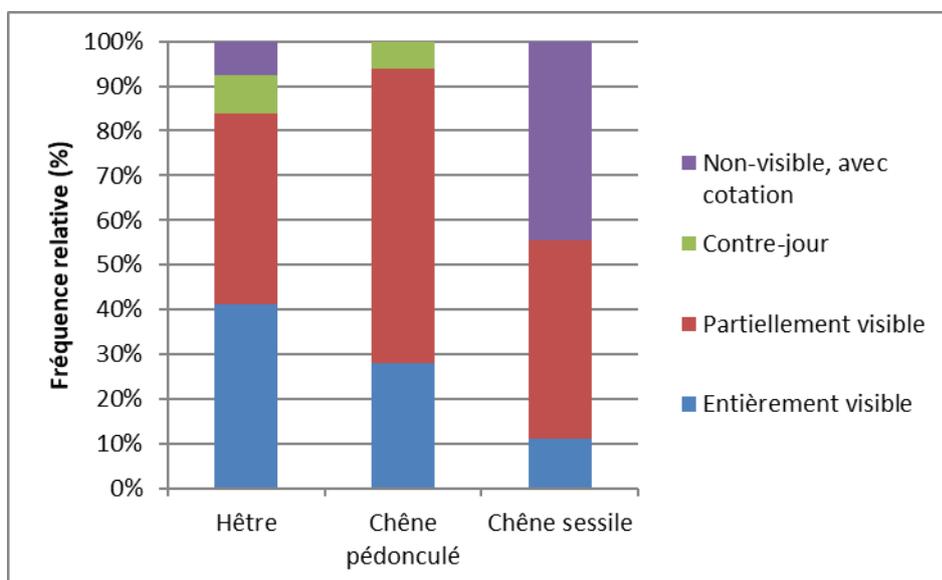


Figure 9: Distribution des arbres en fonction de la visibilité et de l'essence pour l'échantillon analysé en 2019

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 22% 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.

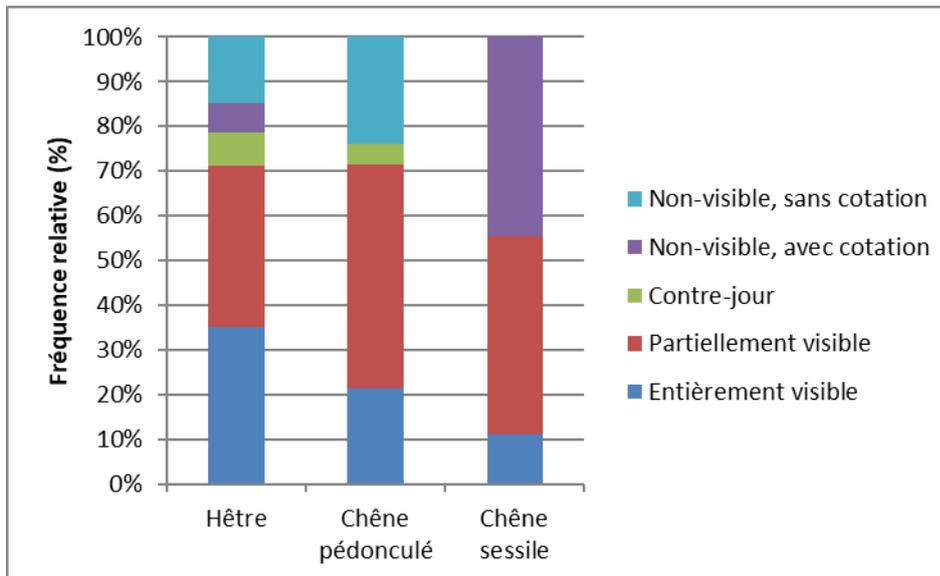


Figure 10 : Distribution des arbres selon la visibilité pour l'ensemble des arbres non dominés observés en 2018.

4.5. Encodage et traitement des données

L'ensemble des données recueillies durant la campagne 2019 ont été encodées dans la base de données MS Access, puis exportées en MS Excel pour préparer les traitements statistiques (logiciel JMP pro 14, dépendant du 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 qu'en 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 9 placettes réparties sur les deux brigades durant le mois de juillet : 6 placettes en hêtraie (n° 3031, 3345, 3989, 4541, 4618 et 4928) et 3 placettes en chênaie (n° 3197, 4449 et 4529). 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 57 arbres a été contrôlé, comprenant 38 hêtres, 17 chênes pédonculés et 1 chêne sessile, soit respectivement 45%, 52% et 10% 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 89% pour les hêtres, 82% pour les chênes pédonculés et 0% pour le chêne sessile. Le critère de qualité est donc largement atteint pour les 2 premières essences. Pour le chêne sessile, l'échantillon est bien trop faible (1 individu) pour tirer un quelconque enseignement.

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	38	45	34.8	33.6	-1.05	Prob.> t = 0.47
Chênes pédonculés	17	52	24.7	26.7	2.06	Prob.> t = 0.51
Chênes sessiles	1	10	15	40	25	

D'autre part, nous observons que la moyenne des écarts de défoliation entre IBGE et l'UCL est de -1 % pour les hêtres, de +2% pour les chênes pédonculés et de +25% pour le chêne sessile (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). 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 est très élevé pour le chêne sessile, mais il n'est pas exclu qu'il y ait une erreur d'identification de l'individu, vu les travaux d'éclaircie récents dans la placette concernée (4529).

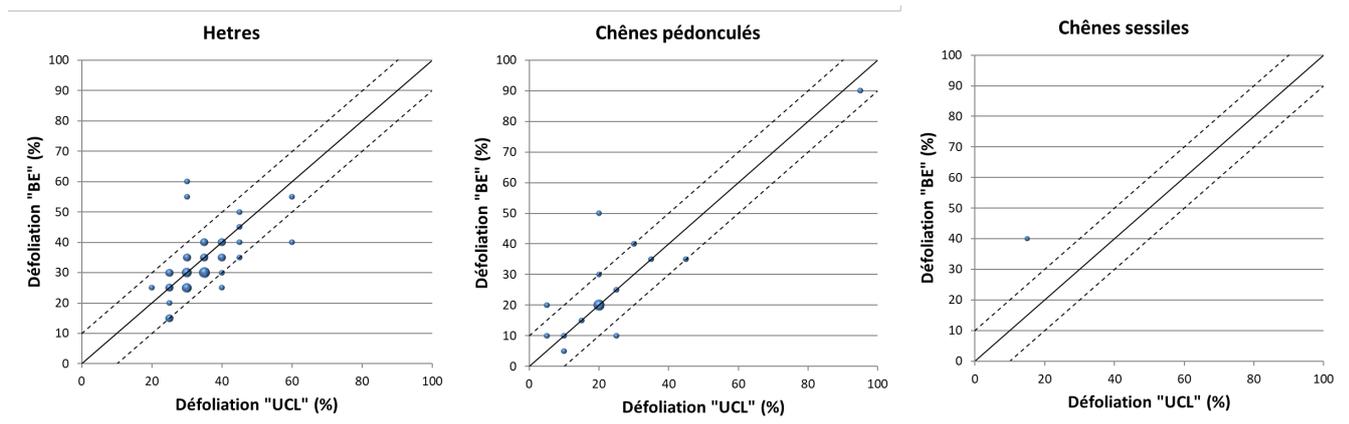


Figure 11 : Comparaison des valeurs de défoliation selon les équipes BE et UCL en 2019 ; la surface des bulles illustre le nombre de points de mêmes coordonnées ; la droite continue correspond au rapport 1:1 ; les droites pointillées correspondent aux seuils de +/- 10 %.

Les résultats sont donc globalement excellents, mais il sera important au cours des prochaines années de s'assurer d'avoir chaque fois un nombre suffisant de chênes sessiles dans le sous-échantillon contrôlé et d'éviter les problèmes d'identification en marquant systématiquement les arbres observés avec une peinture discrète et permanente.

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, après une année 2018 marquée par de forte fructification, l'année 2019 est caractérisée par une fructification globalement faible (Figure 12), ce qui est conforme au cycle bisannuel propre à cette essence. Nous notons toutefois que la fructification en 2019 n'était pas nulle et que certains arbres (5%) présentaient même une fructification abondante. Etant donné l'alternance bisannuelle des observations, il n'est pas possible de déterminer si ces arbres avaient aussi fructifié en 2018.

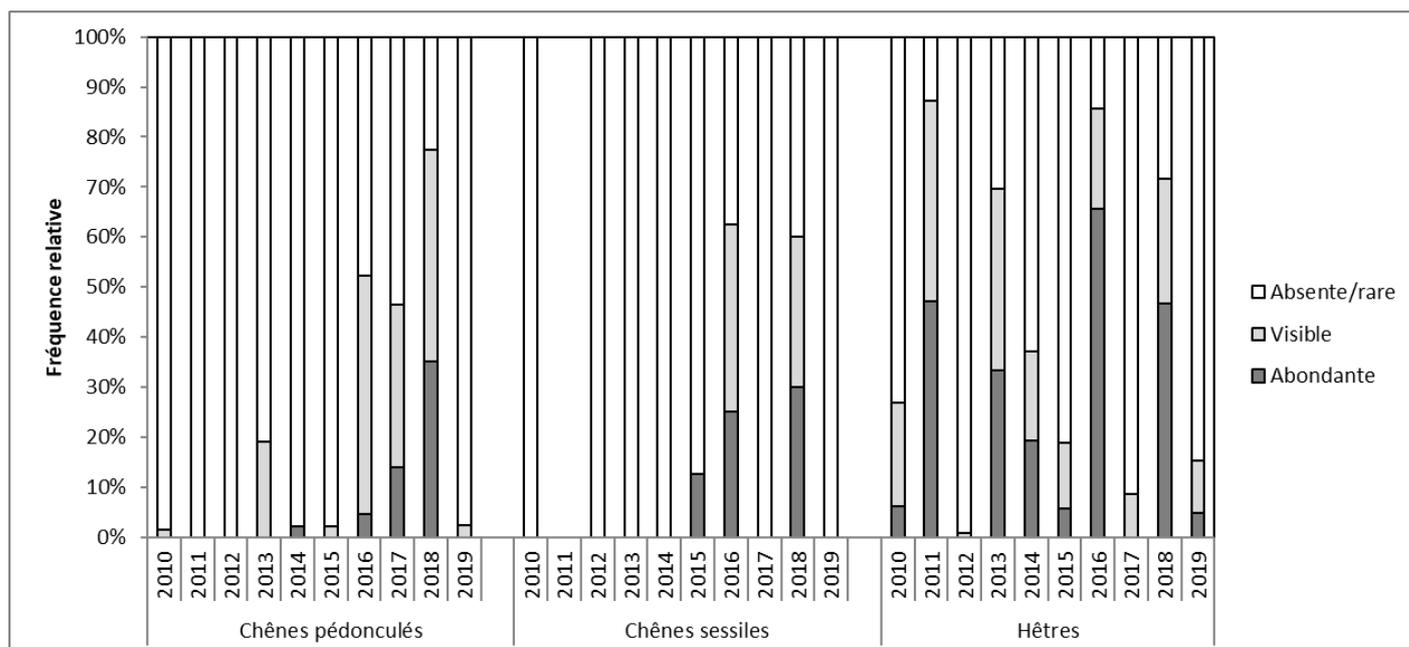


Figure 12 : Evolution du degré de fructification de 2010 à 2018 pour les chênes et les hêtres

Chez les chênes, pratiquement aucune fructification n'est observée après une vague de fructification exceptionnelle entre 2016 et 2018.

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.

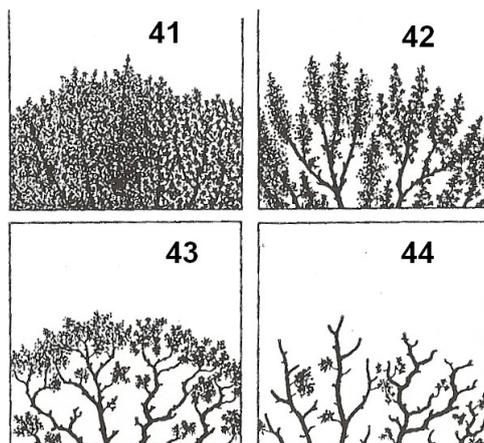


Figure 13 : Les quatre formes de houppier des chênes, avec leurs codes (Eichhorn et al., 2010)
41 : ramification dense ; 42 : simplification légère ; 43 : simplification importante ; 44 : déclin

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 2019 (Figure 15 et Figure 16). Toutefois, la proportion de la classe « ramification dense » reste dominante pour les deux espèces.

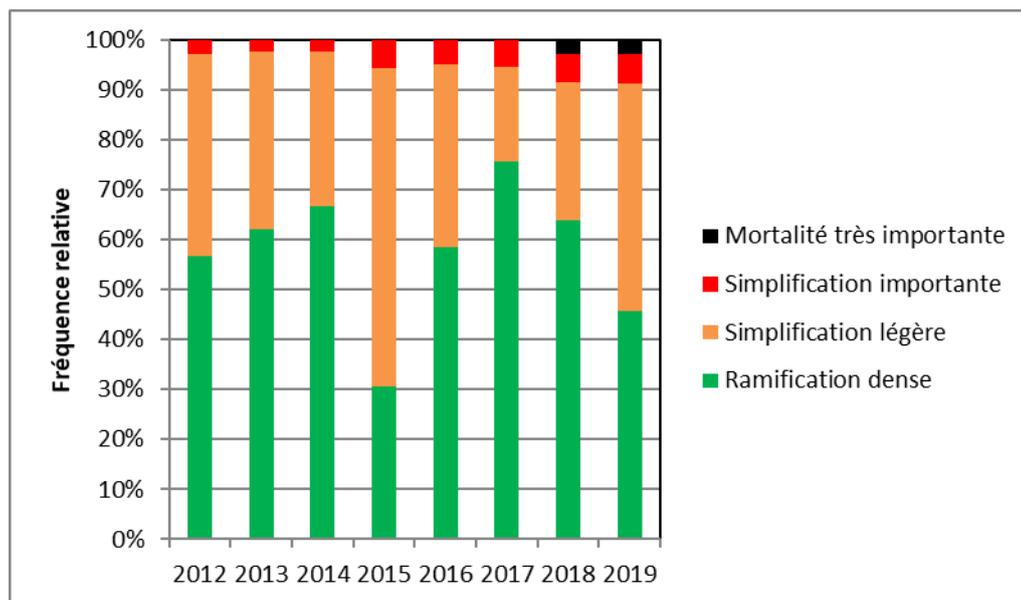


Figure 15 : Distribution des chênes pédonculés selon la structure de la couronne (n= 35)

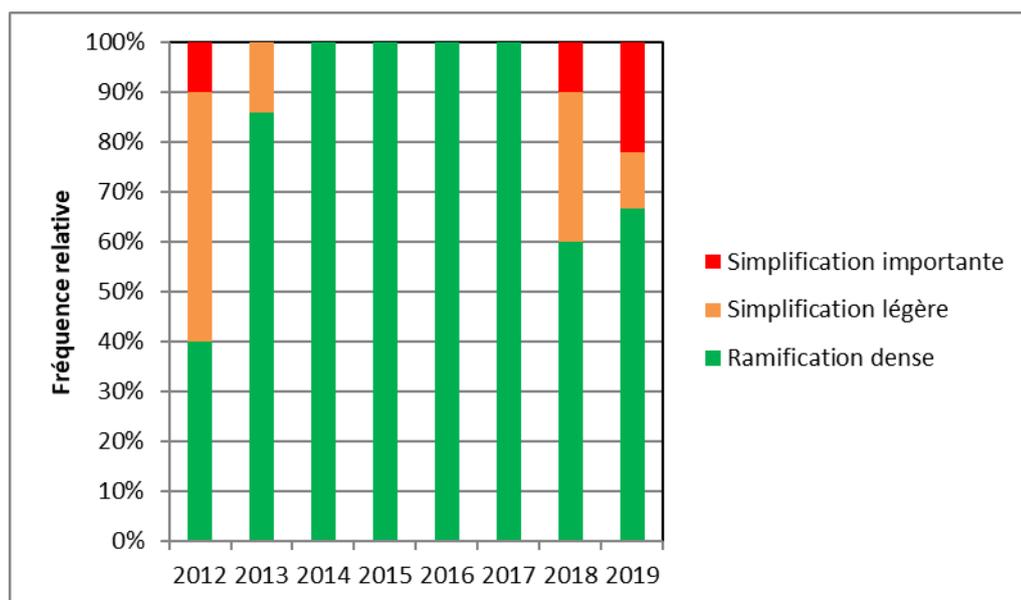


Figure 16 : Distribution des chênes sessiles selon la structure de la couronne (n=9)

Suite à l'instauration de nouvelles classes pour le hêtre en 2013, les résultats antérieurs ne sont pas présentés. Les observations de 2019 sont comparées aux années 2013, 2015 et 2017 en raison de l'alternance bisannuelle des placettes visitées. Par rapport à 2017, nous observons une nette diminution des classes les moins dégradées (1 et 2) et une augmentation de la fréquence des classes intermédiaires (3 et 4) (Figure 17). La fréquence cumulée des classes les plus dégradées (5 à 7) n'est toutefois que de 11%. Sur l'ensemble de la période considérée, le cumul des classes 1 et 2 diminue alors que le cumul des classes 4 à 7 augmente, indiquant une dégradation progressive de la structure.

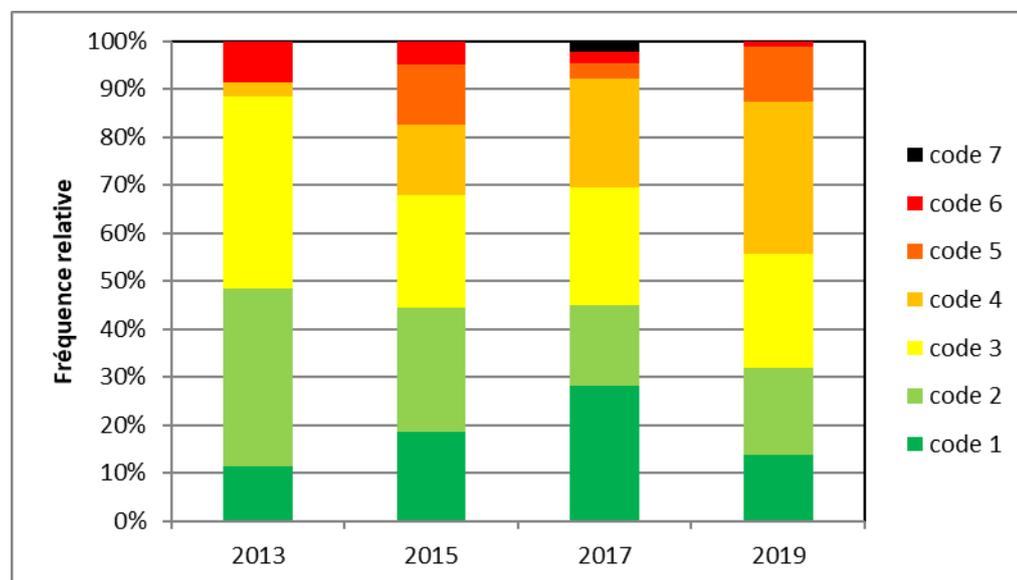


Figure 17 : Distribution des hêtres selon la structure de la couronne (n=88) ; les codes se réfèrent à la Figure 14. Notons que le code 8 n'a pas été observé sur ce sous-échantillon.

5.3. Pousses épïcormiques

Les pousses épïcormiques (« gourmands ») proviennent du débourement 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 2019 (Figure 18). Chez les hêtres, les gourmands sont peu fréquents et en lente diminution.

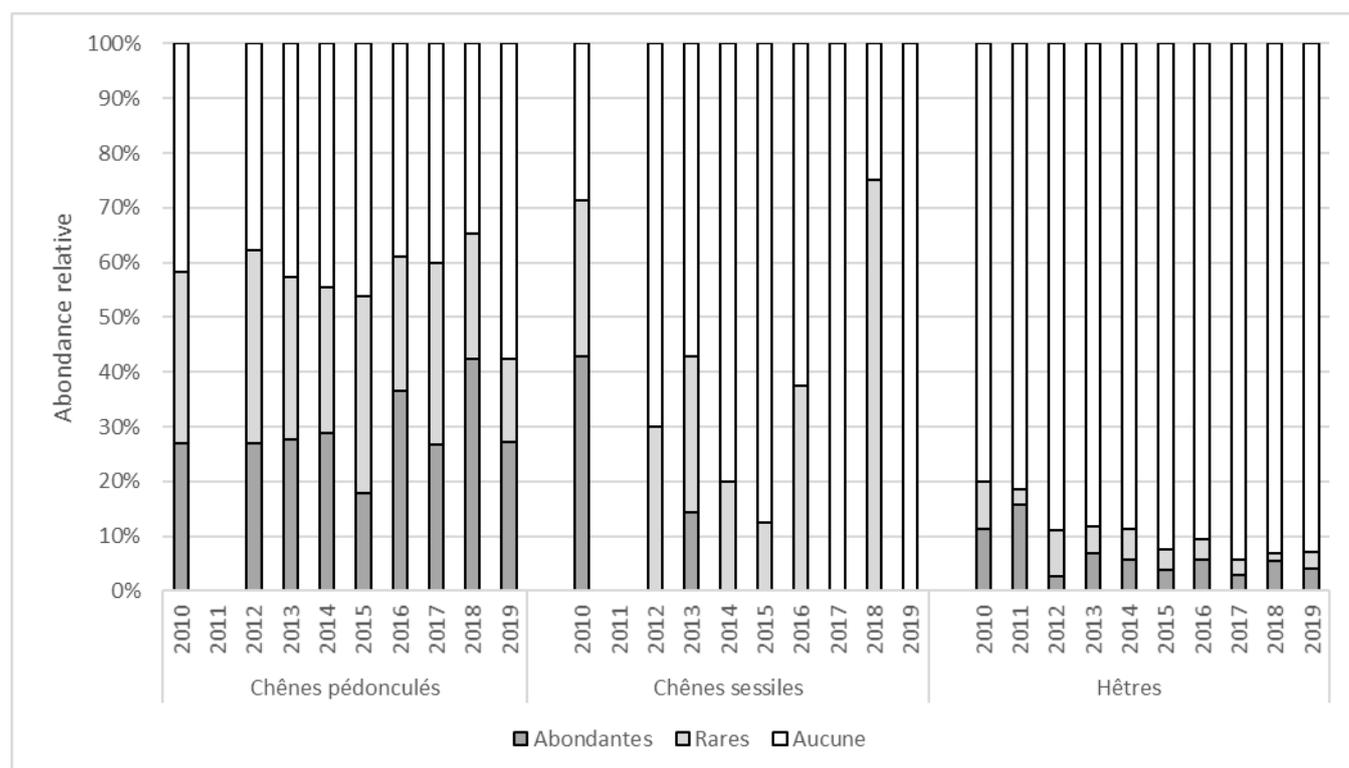


Figure 18 : Distribution des arbres selon l'abondance des pousses épïcormiques

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 2019, la proportion de hêtre présentant une décoloration >10% était assez élevée, tout comme en 2017. Pour la première fois, quelques individus (5%) étaient considérés comme fortement décolorés (25-60%). Il est possible que cette décoloration relativement prononcée soit la conséquence des températures élevées de cet été. Cependant, le pic de 2017 ne peut être expliqué par ce facteur, vu que l'été ne fut pas aussi chaud. Par contre, nous avons formulé en 2017 l'hypothèse d'un lien avec la fructification très abondante l'année précédente. La production de fruits s'accompagne en effet d'une forte mobilisation de nutriments, particulièrement de P, qui pourrait affecter temporairement l'équilibre nutritif des arbres. Cette hypothèse pourrait également s'appliquer aux résultats de 2019, car l'année 2018 a aussi été marquée par une forte fructification.

Les chênes sont généralement faiblement décolorés, sauf en 2012. Nous constatons toutefois en 2019 que quelques individus de chênes pédonculés sont caractérisés par des niveaux de décoloration forte à très forte. Chez les chênes, la décoloration est souvent associée au développement de l'oïdium sur les pousses épicorniques.

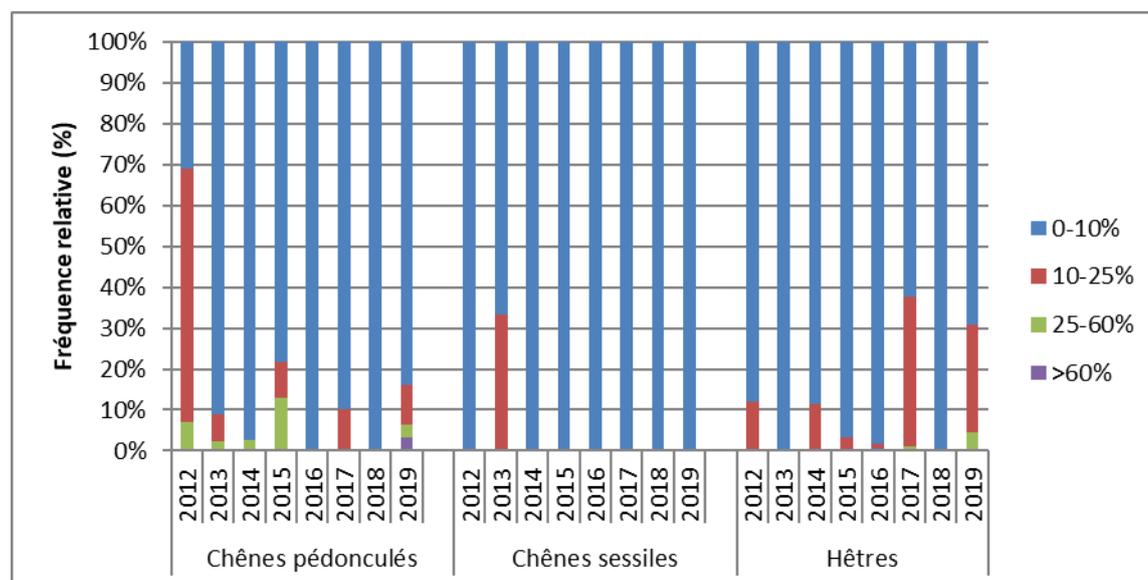


Figure 19 : Distribution des arbres selon le pourcentage de décoloration du feuillage

5.5. Défoliation

5.5.1. Défoliation moyenne des arbres de la campagne 2019

La Figure 20 présente la distribution des valeurs de défoliation pour les échantillons de 40 chênes et les 88 hêtres répartis au sein des 23 placettes. La défoliation moyenne est de 28% pour les chênes pédonculés, 25% pour les chênes sessiles et de 30% pour les hêtres. La proportion d'arbres dont la défoliation est supérieure à 25%, considéré comme un seuil de vigilance, permet également de quantifier l'état sanitaire global. Cette proportion s'élève cette année à 60% pour les hêtres, 35% pour les chênes pédonculés et 33% pour les chênes sessiles. La proportion est très élevée pour les hêtres, mais semble stable. Une analyse détaillée de l'évolution de la défoliation est présentée à la section (5.5.3.3).

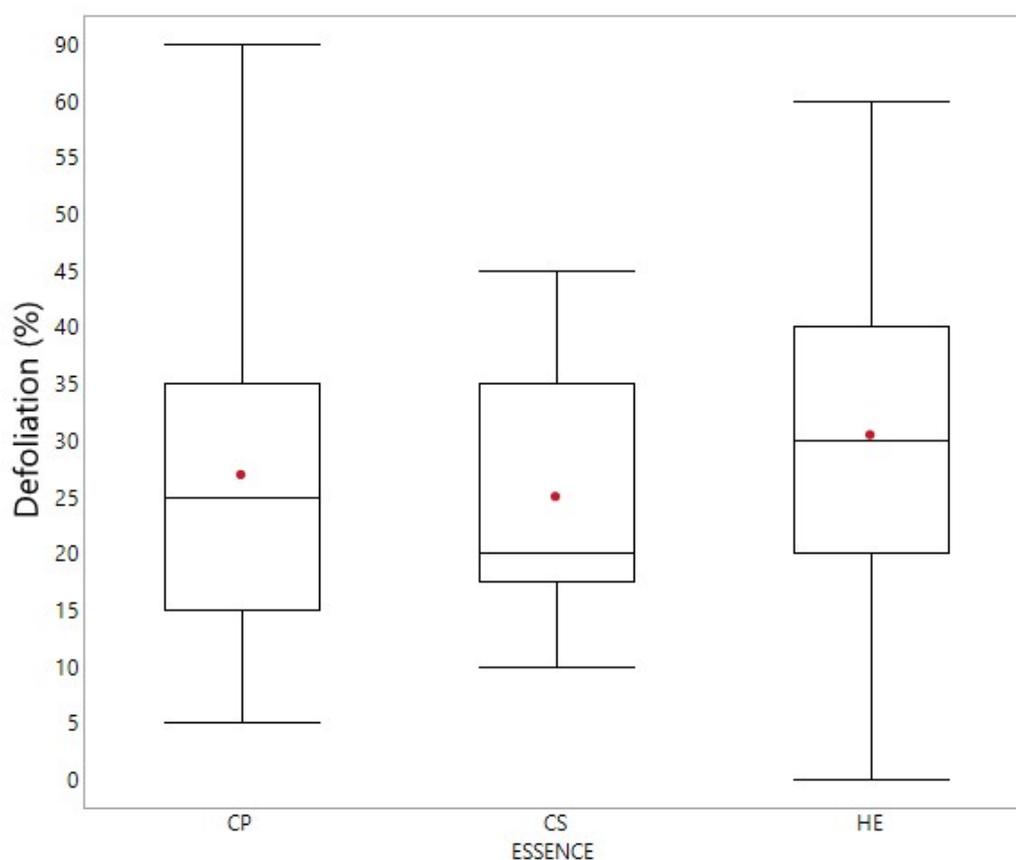


Figure 20 : Défoliation des chênes et des hêtres en 2019 (CP= chênes pédonculés ; CS = chênes sessiles ; HE = hêtres) ; les moyennes sont représentées par des points rouges

Les taux de défoliation par placette sont présentés à la Figure 21. La comparaison statistique entre les placettes ne peut être effectuée car la stratégie d'échantillonnage n'a pas été conçue dans ce but. Néanmoins, nous observons d'importantes différences entre placettes, tant au niveau des moyennes que de la dispersion des valeurs au sein de la placette.

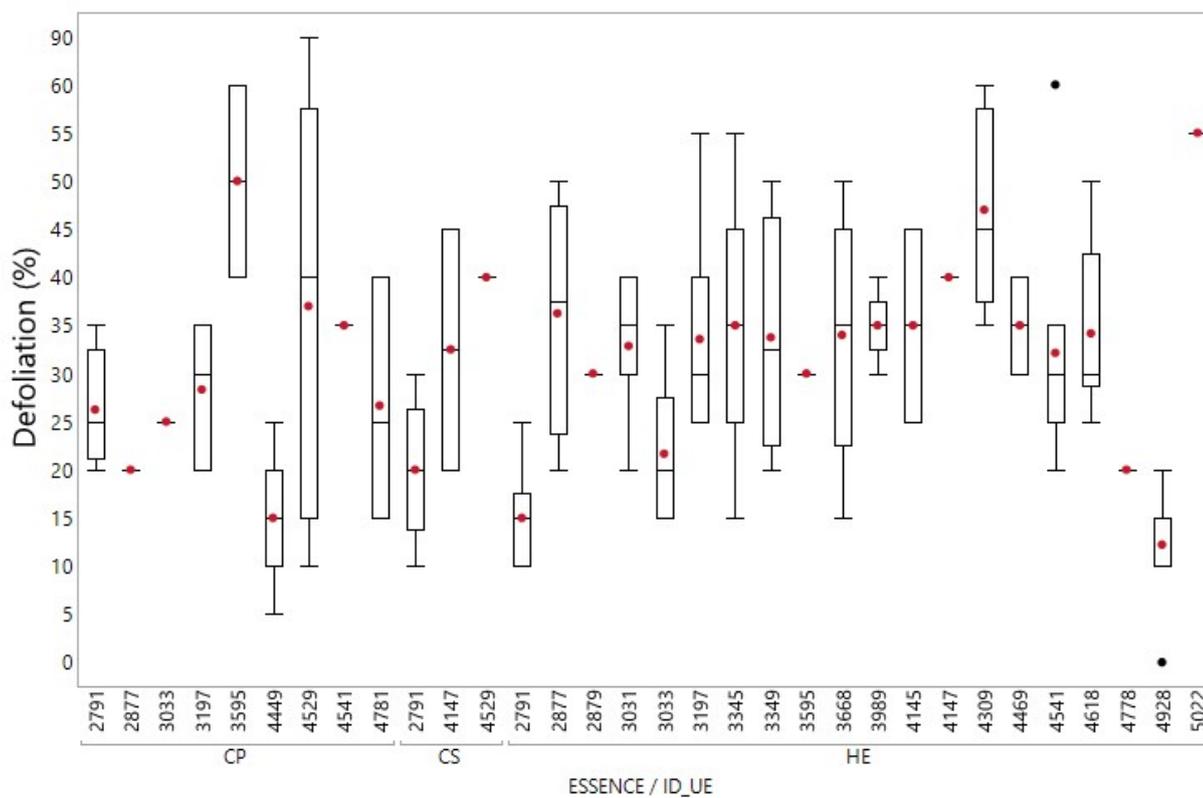


Figure 21 : Défoliation des chênes (CP= chênes pédonculés ; CS = chênes sessiles) et des hêtres (HE) par placette en 2019. Certains box-plots sont incomplets en raison du nombre réduit d'effectifs (c'est surtout le cas lorsque des chênes sont présents en hêtraie, ou pour des hêtres du suivi photo)

5.5.2. Lien entre la défoliation et d'autres variables

5.5.2.1. Défoliation et circonférence

Le Tableau 6 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. Pour la première fois, nous observons également en 2019 une corrélation significative positive entre ces 2 paramètres pour les chênes sessiles.

Tableau 6 : Corrélation entre la circonférence et la défoliation en fonction de l'essence et de l'année

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)

Les régressions linéaires illustrant la relation entre la défoliation et la circonférence ont été calculées uniquement lorsque les corrélations sont significatives (Tableau 7).

Tableau 7: 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

La Figure 22 illustre la relation entre les valeurs de défoliation des hêtres en 2019 et la circonférence à 1m50 mesurée au même moment. Le coefficient de pente est proche de 0,1. En d'autres termes, sur base des données de 2019, la défoliation augmenterait de 10% lorsque la circonférence d'un hêtre augmente de 100 cm.

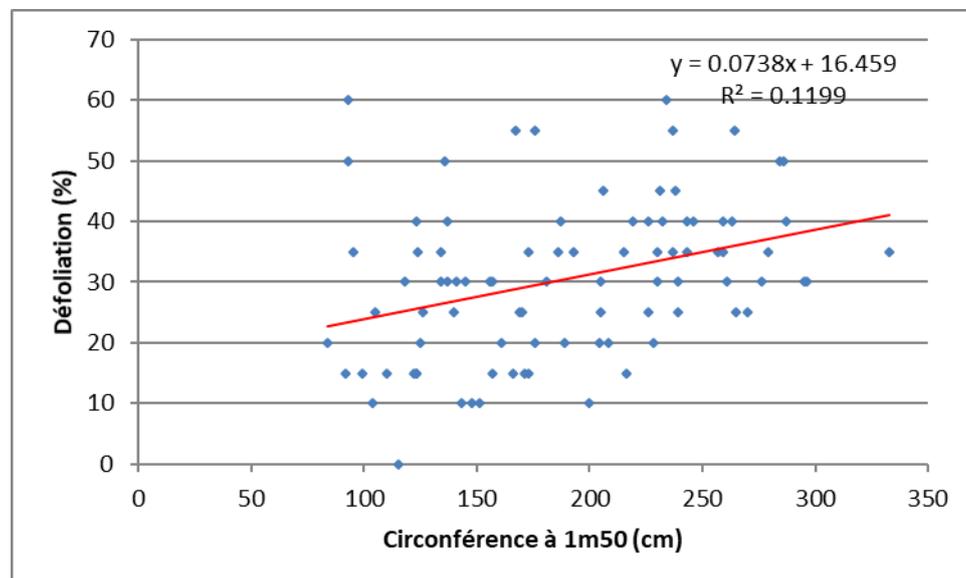


Figure 22 : Régression linéaire de la défoliation des hêtres en fonction de la circonférence en cm (C150) en 2019

5.5.2.2. 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 « arbre dominé », qui reflète un degré maximum de concurrence. Pour rappel, les arbres appartenant à cette dernière classe sont exclus de l'échantillon étudié.

La Figure 23 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 doit être en partie lié à l'âge du peuplement, qui augmente parallèlement à l'ouverture du couvert (éclaircies).

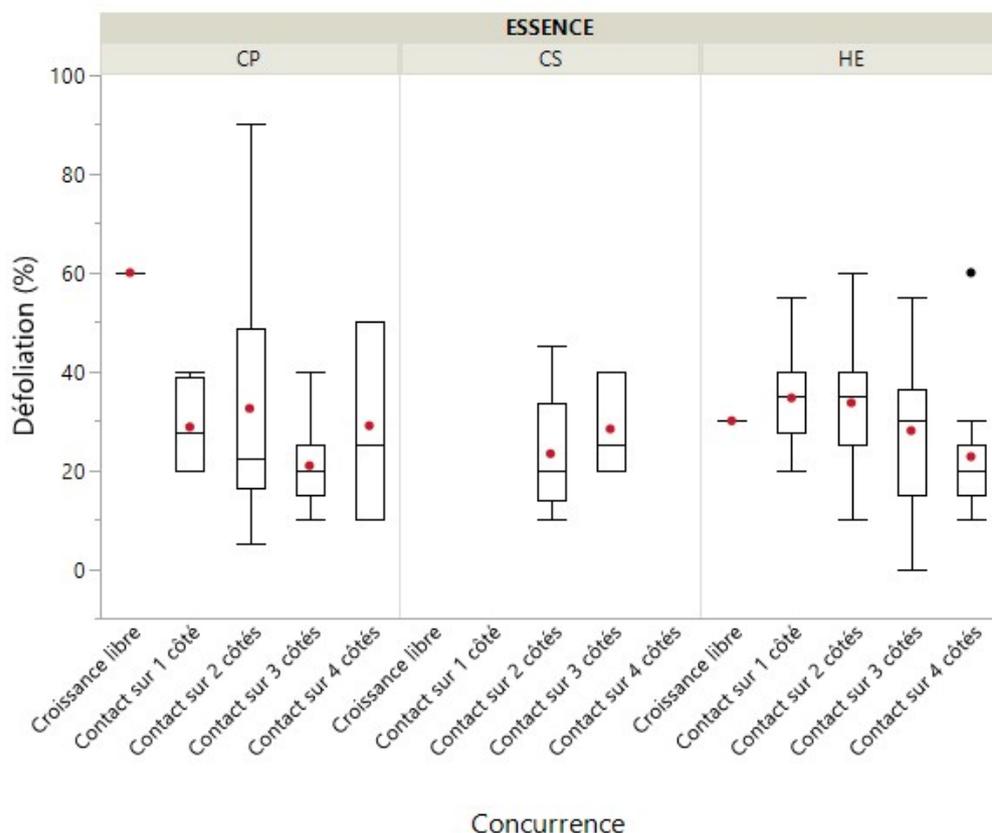


Figure 23 : Défoliation des chênes indigènes (CP : chêne pédonculé ; CS : chêne sessile) et des hêtres (HE) selon l'indice d'ombrage en 2019

5.5.2.3. Défoliation et décoloration

Nous n'observons pas de relation claire entre la défoliation et la décoloration mesurée la même année (Figure 24). Les observations de 2018 suggéraient toutefois un lien possible entre décoloration et défoliation au cours des années suivantes pour les chênes pédonculés. Certains arbres fortement décolorés en 2017 présentaient une forte augmentation de défoliation de 2017 à 2018. Nous avons testé graphiquement (Figure 25) si cet effet se marque toujours en 2019. Seuls 3 chênes pédonculés présentant une décoloration significative en 2017 font partie de l'échantillon analysé en 2019. Parmi ceux-ci, un seul présente une augmentation élevée, mais les 2 autres ne se démarquent pas. Concernant les hêtres, nous observons également un individu décoloré en 2017 qui présente une forte dégradation entre les 2 années, mais globalement, aucun effet de la décoloration n'est observé.

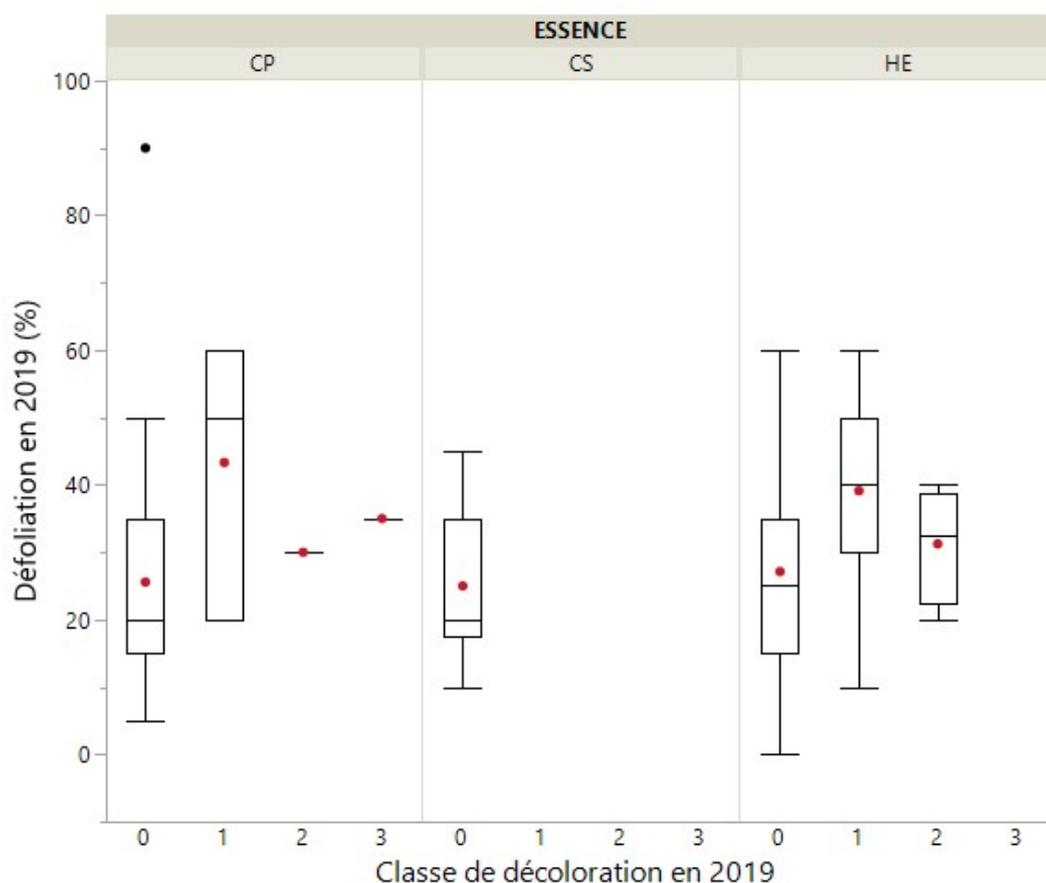


Figure 24 : Défoliation des chênes indigènes (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles) et des hêtres (HE) en 2019 selon l'intensité de la décoloration la même année [classe 0 : 0 à-10% ; classe 1 : 10-25% ; classe 2 : 25-60% ; classe 3 : >60%]

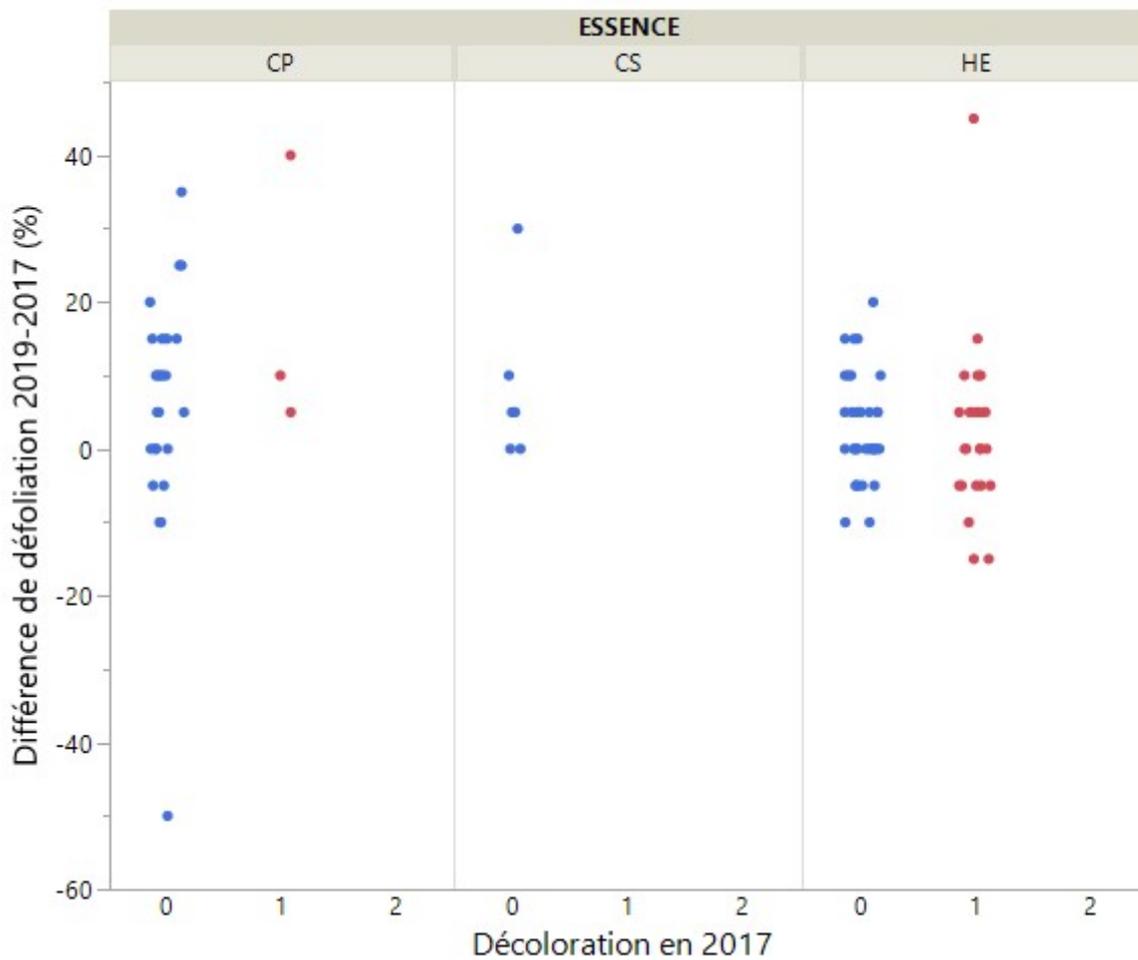


Figure 25 : Evolution de la défoliation des chênes indigènes (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles) et des hêtres (HE) entre 2017 et 2019 selon l'intensité de la décoloration en 2017 [classe 0 : 0 à-10% ; classe 1 : 10-25% ; classe 2 : 25-60% ; classe 3 : >60%]

5.5.2.4. Défoliation et fructification

Pour les chênes, cette relation ne peut être testée cette année car la fructification est pratiquement absente.

Pour le hêtre, certaines observations de terrain suggèrent un effet très marqué de la fructification (Figure 26). Toutefois, l'analyse graphique suggère une très faible augmentation de la défoliation lorsque l'intensité de la fructification augmente et l'analyse statistique (ANOVA) confirme que cet effet n'est pas significatif. Ce paramètre ne permet donc pas d'expliquer une part significative de la variabilité inter-individus en 2019.



Figure 26 : Effet de la fructification sur l'apparence globale de la cime des hêtres

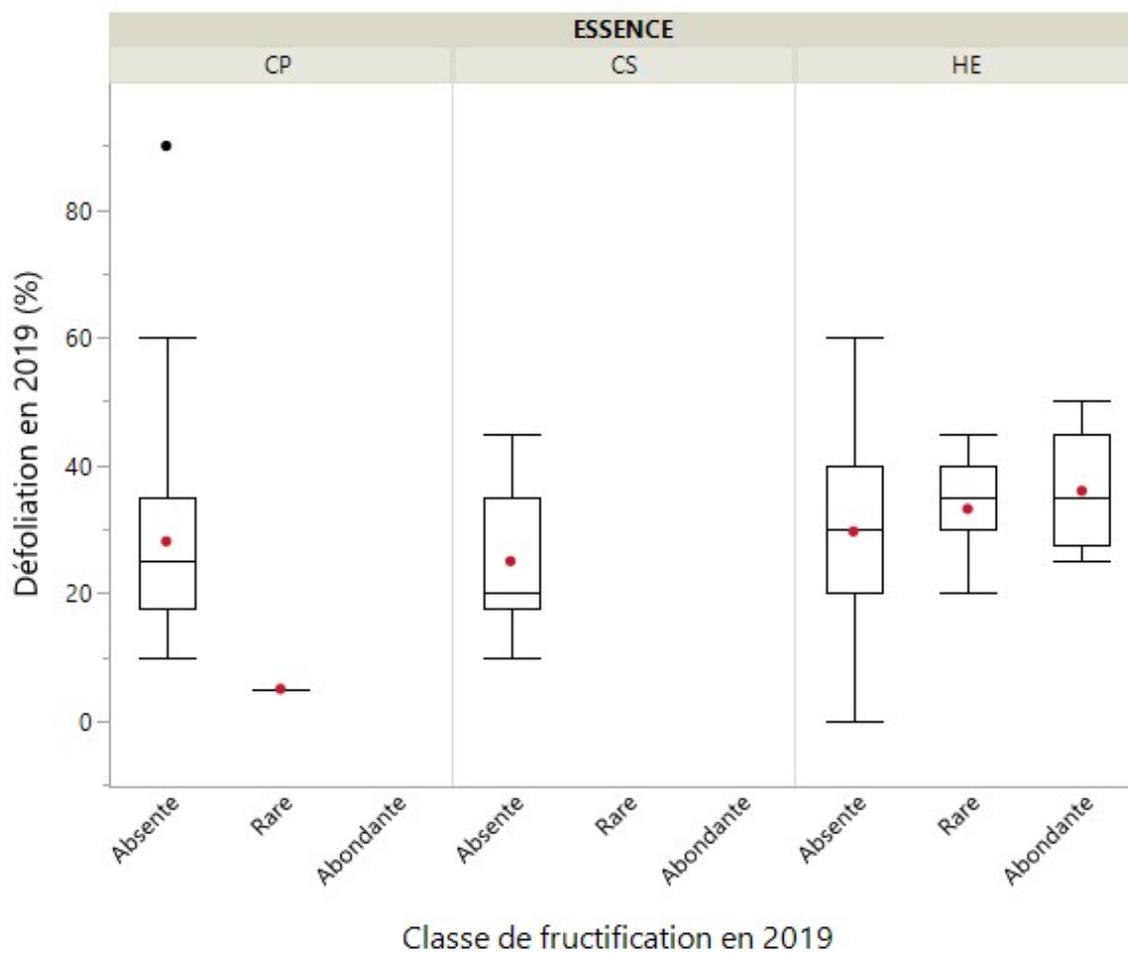


Figure 27 : Distribution de la défoliation des chênes (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles) et des hêtres (HE) selon l'abondance de la fructification en 2019

5.5.2.5. Défoliation et structure du houppier

Chez les chênes pédonculés et les hêtres, il existe une relation très claire entre la défoliation et la structure de la partie supérieure de leur houppier (Figure 28). 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. Le caractère très marqué de cet effet suggère que la simplification de la structure serait le principal mécanisme conduisant à une augmentation de la défoliation dans le contexte de cette étude.

Pour les chênes sessiles, une relation similaire semble exister, mais les classes 42 et 43 ne comportent qu'un individu chacune.

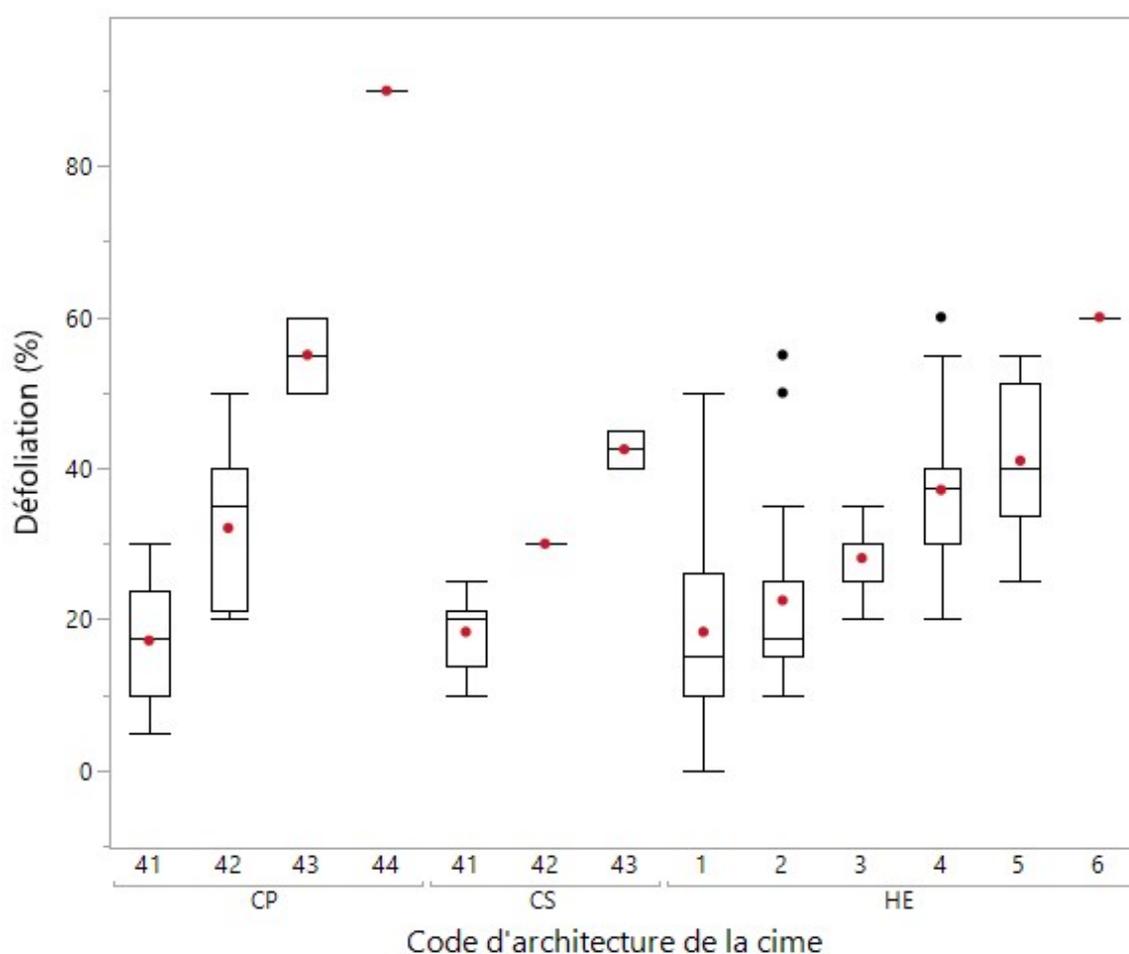


Figure 28: Distribution de la défoliation des chênes (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles) et des hêtres (HE) selon la forme du houppier en 2019 (la signification des codes est indiquée aux Figure 13 et Figure 14)

5.5.3. Evolution de la défoliation

5.5.3.1. Comparaisons 2017-2019

L'évolution à court terme des niveaux de défoliation est abordée via la comparaison des valeurs individuelles en 2017 et 2019. Ce pas de 2 ans a été choisi en raison du caractère bisannuel des visites en hêtraie et du fait que certains chênes sont situés sur des placettes de « hêtraie ». Les résultats sont présentés sous forme de graphes à bulles (Figure 29 et Figure 30), permettant de visualiser les points qui se superposent (données catégorielles).

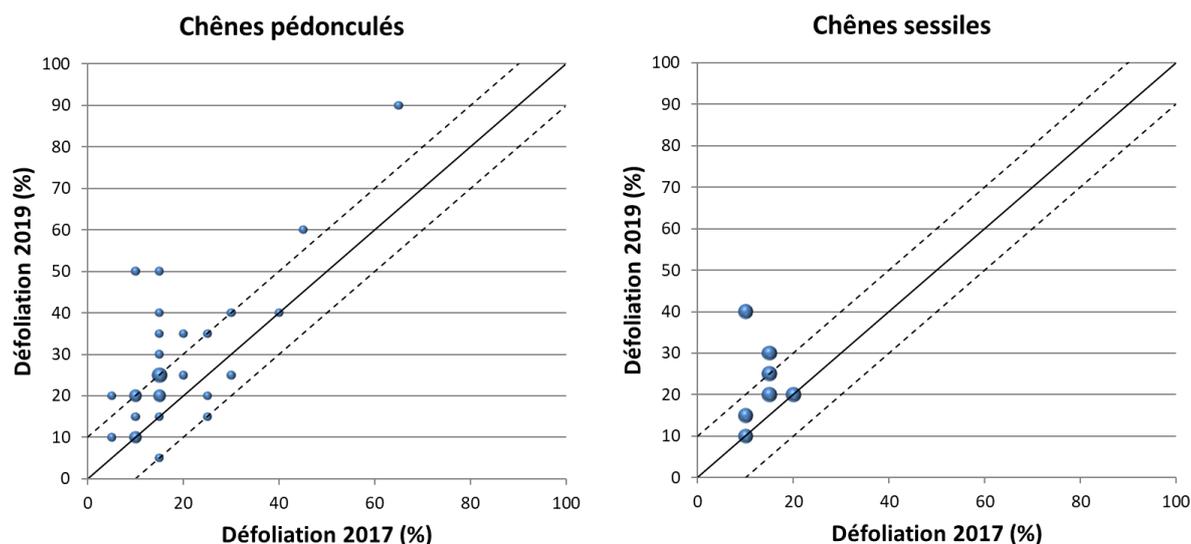


Figure 29 : Comparaison des classes de défoliation de 2017 et 2019 pour les chênes (la taille des bulles correspond au nombre de points ayant les mêmes coordonnées)

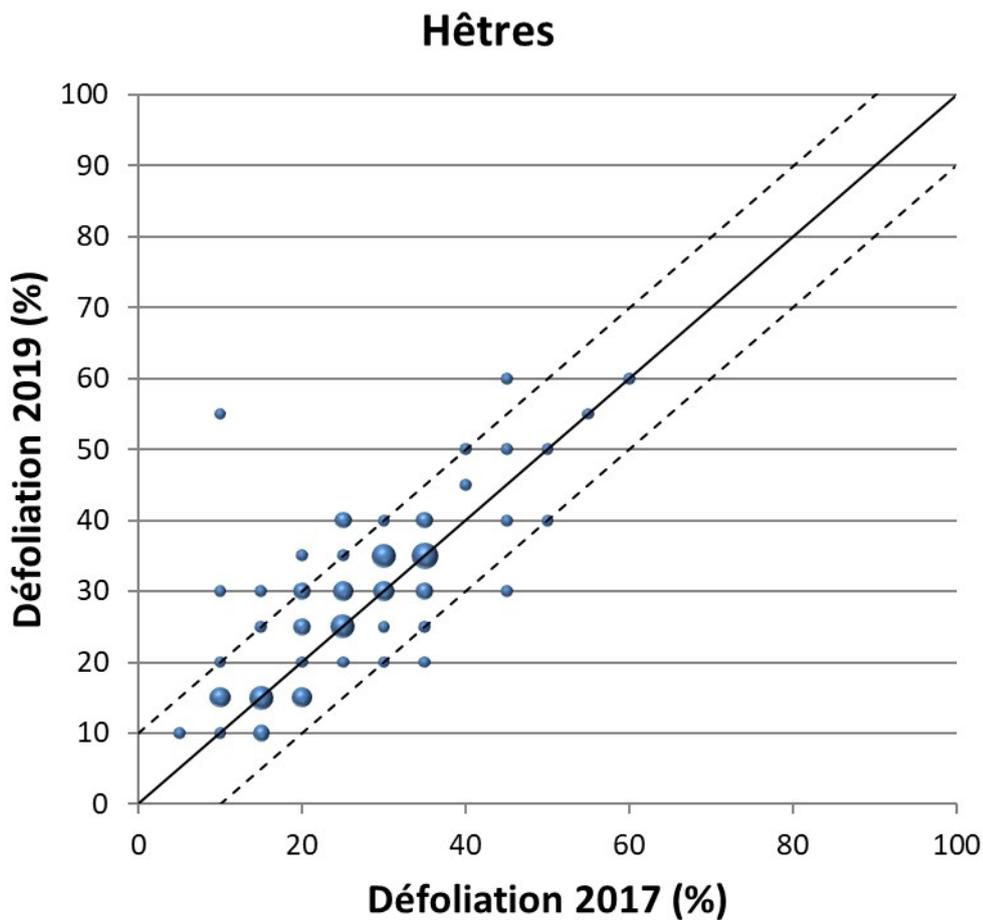


Figure 30 : Comparaison des classes de défoliation de 2017 et 2019 pour les hêtres observés ces deux années (la taille des bulles correspond au nombre de points ayant les mêmes coordonnées)

Les valeurs de défoliation individuelles des chênes pédonculés en 2019 sont globalement supérieures aux valeurs de 2017, et les différences sont particulièrement marquées pour certains individus. Les chênes sessiles présentent des évolutions généralement positives, mais les effectifs sont très réduits.

Les hêtres présentent des différences de défoliation (2019-2017) plus souvent positives, mais peu marquées (dépassant rarement 10%), à l'exception d'un arbre qui s'est fortement dégradé (+45%).

5.5.3.2. Evolution des moyennes de 2009 à 2019

L'évolution moyenne de la défoliation des arbres non dominés est présentée à la Figure 31. Les valeurs moyennes sont reprises dans le Tableau 8. Notons que les effectifs varient d'une année à l'autre en raison de l'alternance bisannuelle (hêtres), d'amélioration ou de détérioration de la visibilité, de coupes, d'éclaircies, d'inclusion d'arbre ayant atteint le seuil de circonférence de 80 cm et de la détermination tardive de l'espèce pour certains individus de chênes (non pris en compte avant détermination). L'évolution de ces moyennes est fournie à titre indicatif et ne peut remplacer les analyses statistiques présentées dans la section (5.5.3.3).

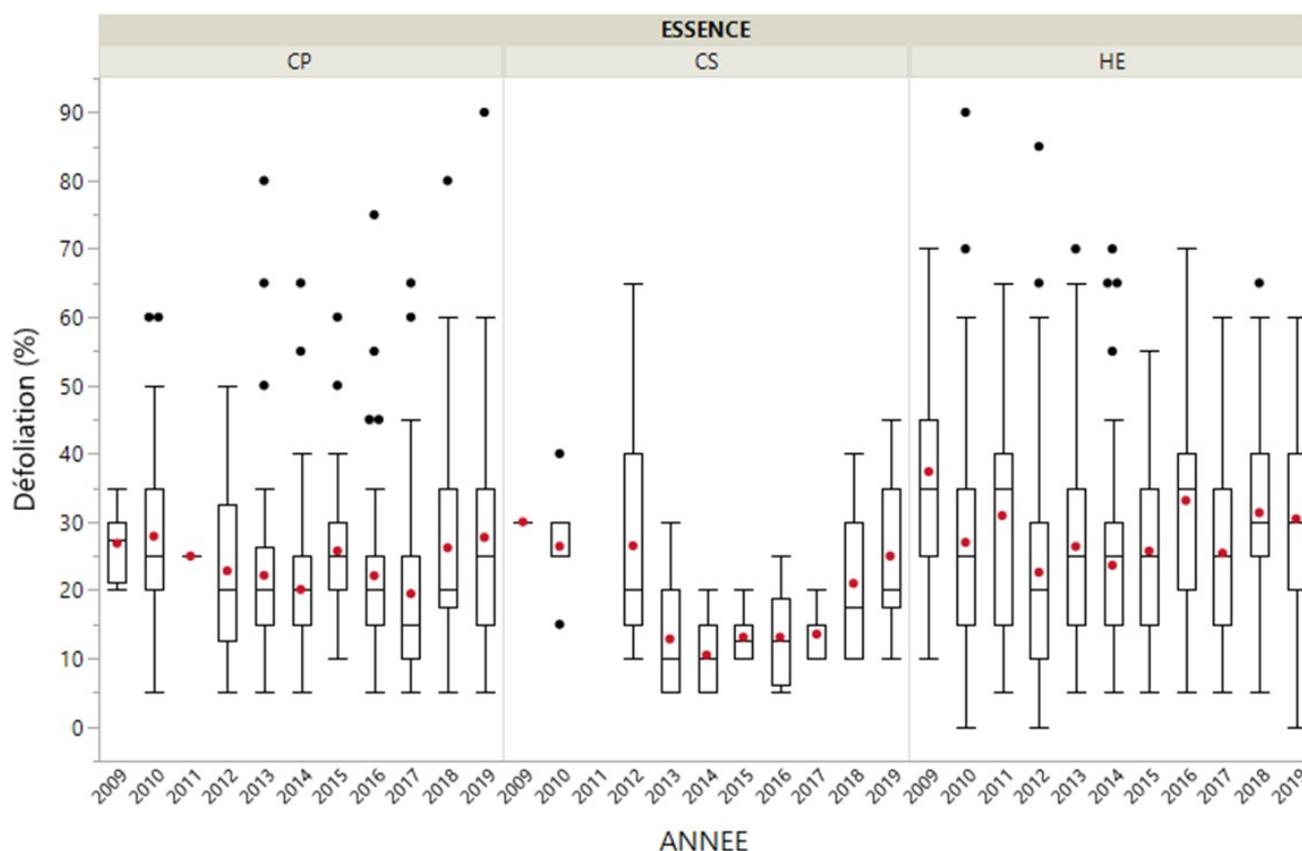


Figure 31 : Evolution de la défoliation des chênes pédonculés (CP), des chênes sessiles (CS) et des hêtres (HE) de 2009 à 2019

Tableau 8: Valeurs moyennes de défoliation par année et par essence (les effectifs sont repris entre parenthèses)

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
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)
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)
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)

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 des arbres suivis en Wallonie (Figure 32). Le suivi en Wallonie est effectué sur 10 placettes en hêtraie, 10 placettes en chênaie et 10 placettes en forêt mixtes (chênes-hêtres), selon une méthode de cotation identique, mais sans alternance bisannuelle.

Pour le hêtre (Figure 32), les moyennes sont environ 10% plus basses en forêt de Soignes par rapport à la Wallonie et 10% plus élevées qu'en Flandre, mais l'évolution des courbes est remarquablement synchrone. Nous observons des pics moins importants en 2016 et 2018 en Wallonie, car l'intensité de la fructification est généralement moins marquée en Ardenne, où se situe la majorité des placettes wallonnes, qu'en moyenne Belgique,

En ce qui concerne les chênes (Figure 33), nous observons que les valeurs de défoliation sont nettement plus élevées en Wallonie avant 2013 et que cet écart diminue au fil des années, jusqu'à devenir nul pour le chêne sessile depuis 2016. 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 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 32 : Evolution comparée des défoliations moyennes de Hêtres en forêt de Soignes bruxelloise (BXL), en Wallonie (RW) et en Flandre (VL) depuis 2010

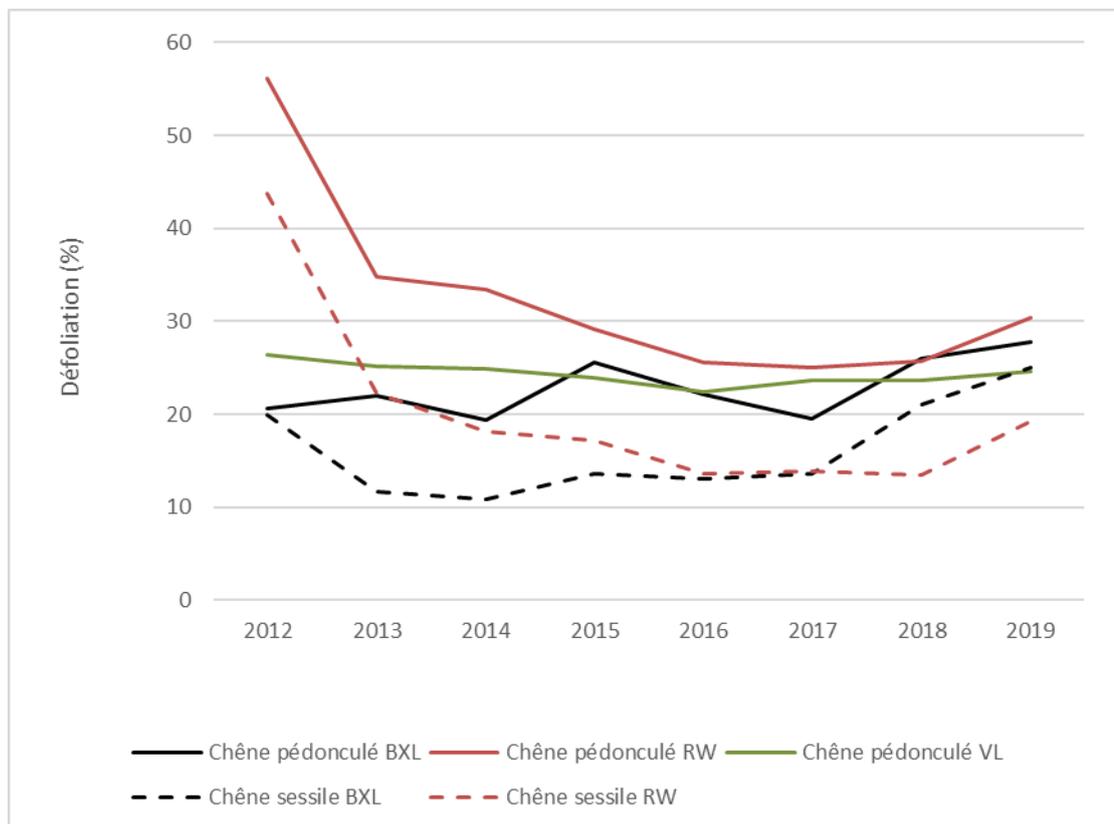


Figure 33 : Evolution comparée des défoliations moyennes de chênes en forêt de Soignes bruxelloise (BXL), en Wallonie (RW) et en Flandre (VL) depuis 2010

5.5.3.3. Analyse des tendances

Nous avons opté cette année pour une nouvelle approche statistique permettant d'analyser les évolutions sur l'ensemble du jeu de données, en incluant les deux sous-échantillons de hêtres (visites bisannuelles), les arbres qui ont été exploités en cours d'étude et les placettes qui ne sont plus suivies pour d'autres raisons. Cette approche 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 attribuable à cette variable de la variabilité globale afin de mieux isoler les effets des facteurs fixes. Les facteurs fixes considérés sont l'année (variable continue) et l'intensité de la fructification (variable semi-quantitative). Nous avons également intégré dans le modèle l'interaction (imbriquée) entre l'année et l'individu (qui doit également être considérée comme un facteur aléatoire).

Le modèle peut être résumé par l'équation suivante ; les variables aléatoires étant indiquées en italique:

$$[Eq1] \text{ Défoliation} = f(\text{Constante} + \text{Année} + \text{Fructification} + \textit{Individu} + \textit{Année}(\textit{Individu}))$$

Nous avons testé ce modèle sur l'ensemble de la période (11 ans), ainsi que sur deux sous-périodes distinctes : 2009-2013 et 2014-2019. L'observation de la Figure 31 suggère en effet une légère diminution des défoliations durant les premières années d'observation, suivie d'une hausse entre 2014 et 2019.

Hêtres

Les résultats du modèle (Tableau 9) indiquent un effet très marqué de la fructification : quelle que soit la période, les coefficients associés à la fructification sont hautement significatifs et on note un écart de défoliation de l'ordre de 7 à 9% entre les codes 1 (fructification absente) et 3 (fructification abondante). Sur la totalité de la période d'étude, aucune évolution significative de la défoliation n'est observée, mais on note une baisse significative (-1.3 % par an) durant la période 2009-2013 suivie d'une hausse significative (+ 1.0 % par an) de 2014 à 2019. Il est possible d'isoler l'effet du temps en déduisant les effets « individus » (y compris leur interaction avec l'année) et les effets « fructification » des valeurs de défoliation brutes. Les résultats de ces calculs permettent une confirmation visuelle de ces évolutions (Figure 34). Bien que faible, l'augmentation de 2014 et 2019 est clairement visible.

Tableau 9 : Tests sur les facteurs fixes du modèle mixte [Eq1] pour les hêtres (les coefficients associés à la fructification indiquent des écarts de défoliation liés entre les codes 2 et 1 ou 3 et 2 ; 1 = absente, 2 = rare, 3 = abondante)

Période	Facteur	Estimation	Prob. > t	Intervalle de confiance 95%	
				borne inf	borne sup.
2009-2019	Année	0.20	0.1147	-0.05	0.44
	Fructif[2-1]	3.64	<.0001	2.13	5.15
	Fructif[3-2]	4.88	<.0001	3.25	6.52
2009-2013	Année	-1.28	<.0001	-1.87	-0.69
	Fructif[2-1]	3.79	0.0047	1.17	6.41
	Fructif[3-2]	3.69	0.0084	0.96	6.43
2014-2019	Année	1.04	<.0001	0.63	1.45
	Fructif[2-1]	2.94	0.0029	1.01	4.87
	Fructif[3-2]	5.74	<.0001	3.74	7.74

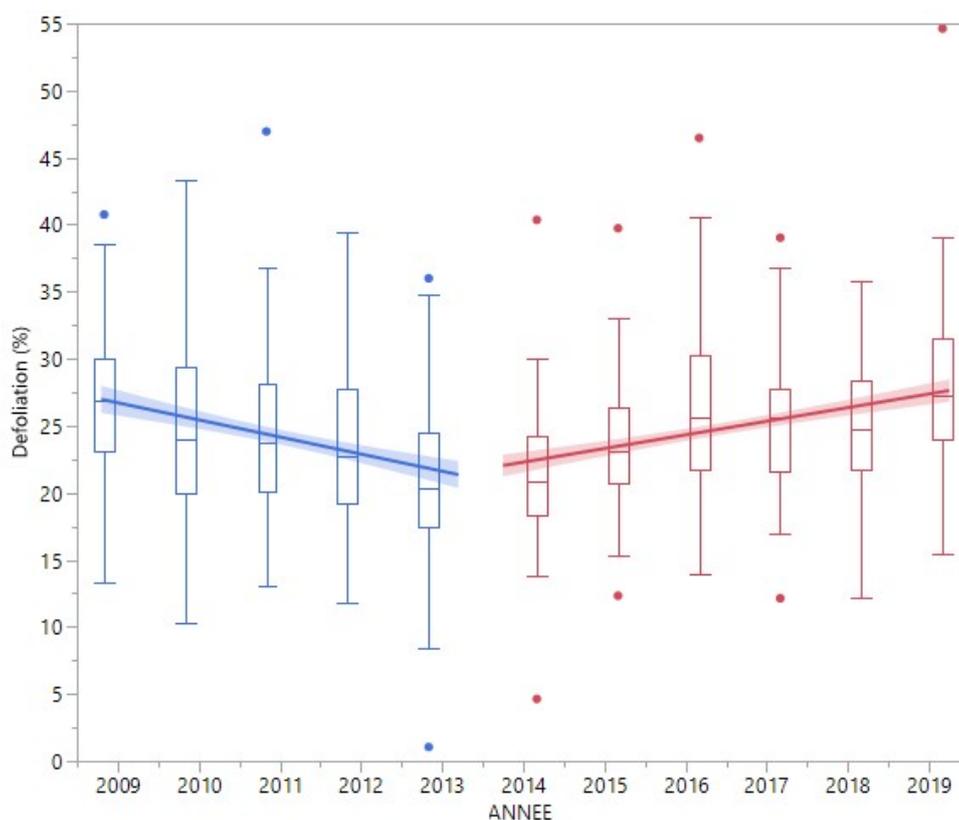


Figure 34 : Evolution des valeurs de défoliation « corrigées » (après déduction des effets « individus » et de l'effet de la fructification) pour les hêtres

Chênes pédonculés

Contrairement au hêtre, les résultats du modèle (Tableau 10) indiquent l'absence d'effet de la fructification sur la totalité de la période d'étude, aucune évolution significative de la défoliation n'est observée, mais on note une baisse significative (-1.4 % par an) durant la période 2009-2013 suivie d'une hausse significative (+ 1.0 % par an) de 2014 à 2019. Nous avons isolé l'effet du temps en déduisant les effets « individus » (y compris leur interaction avec l'année) des valeurs de défoliation brutes. Les résultats de ces calculs permettent une confirmation visuelle de ces évolutions (Figure 35). Tout comme pour les hêtres, l'augmentation de 2014 et 2019 est faible, mais visible. Néanmoins, les évolutions sont moins régulières que pour le hêtre ; on détecte des « oscillations » non linéaires.

Tableau 10 : Tests sur les facteurs fixes du modèle mixte [Eq1] pour les chênes pédonculés (les coefficients associés à la fructification indiquent des écarts de défoliation liés entre les codes 2 et 1 ou 3 et 2 ; 1 = absente, 2 = rare, 3 = abondante)

Période	Facteur	Estimation	Prob. > t	Intervalle de confiance 95%	
				borne inf	borne sup.
2009-2019	Année	-0.21	0.2928	-0.61	0.19
	Fructif[2-1]	-1.99	0.1641	-4.80	0.82
	Fructif[3-2]	2.51	0.2834	-2.08	7.10
2009-2013	Année	-1.40	0.0218	-2.58	-0.21
	Fructif[2-1]	-0.50	0.886	-7.36	6.36
	Fructif[3-2]	nd	nd	nd	nd
2014-2019	Année	0.98	0.0227	0.14	1.81
	Fructif[2-1]	-2.68	0.0973	-5.86	0.49
	Fructif[3-2]	1.68	0.4817	-3.02	6.38

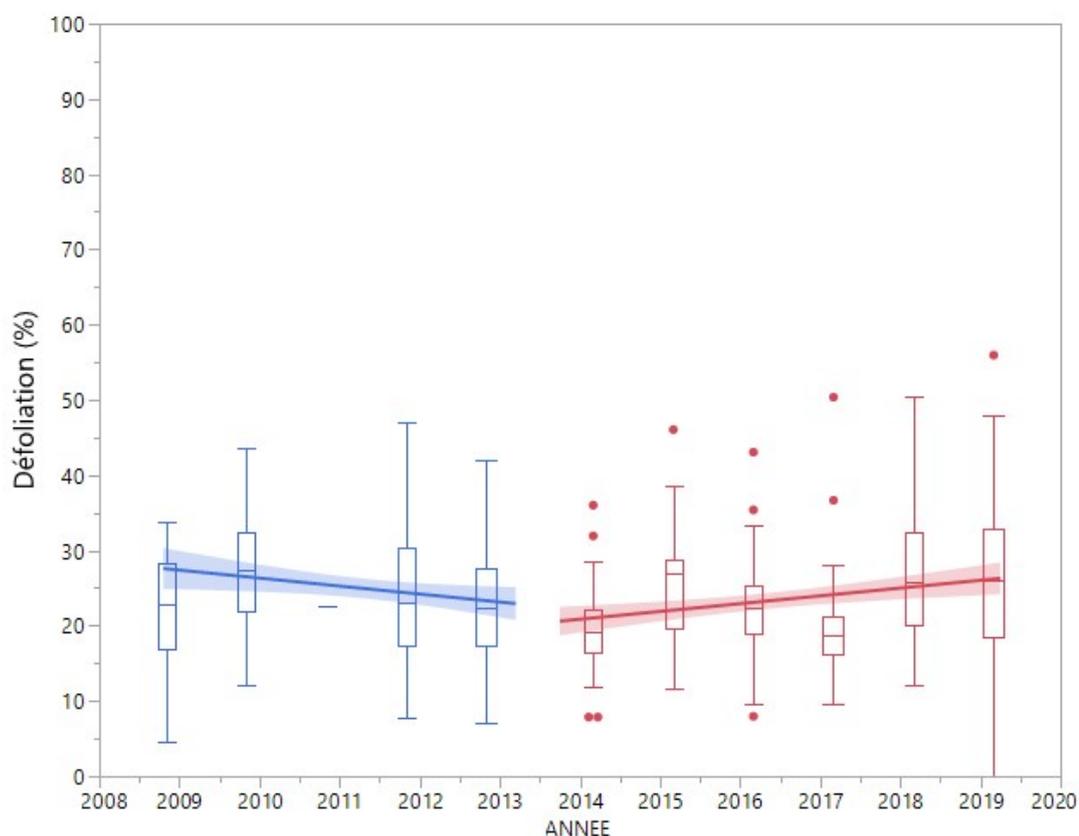


Figure 35 : Evolution des valeurs de défoliation « corrigées » (après déduction des effets « individus ») pour les chênes pédonculés

Chênes sessiles

Les résultats du modèle (Tableau 11) indiquent un effet de la fructification, mais uniquement si l'on compare les codes 2 et 3 sur l'ensemble de la période. Aucune évolution significative de la défoliation n'est observée sur l'ensemble de la période, ni sur la période 2009-2013. On note par contre une hausse significative (+ 2.7 % par an) de 2014 à 2019. Nous avons d'isolé l'effet du temps en déduisant les effets « individus » (y compris leur interaction avec l'année) des valeurs de défoliation brutes. Les résultats de ces calculs permettent une confirmation visuelle de ces évolutions (Figure 36). L'augmentation de 2014 à 2019 est plus forte que pour les autres essences, et bien visible. Néanmoins, on détecte des « oscillations » non linéaires, comme pour les chênes pédonculés.

Tableau 11 : Tests sur les facteurs fixes du modèle mixte [Eq1] pour les chênes sessiles (les coefficients associés à la fructification indiquent des écarts de défoliation liés entre les codes 2 et 1 ou 3 et 2 ; 1 = absente, 2 = rare, 3 = abondante).

Période	Facteur	Estimation	Prob. > t	Intervalle de confiance 95%	
				borne inf	borne sup.
2009-2019	Année	-0.24	0.8112	nd	nd
	Fructif[2-1]	-1.36	0.5427	-5.78	3.07
	Fructif[3-2]	3.39	0.0071	0.95	5.83
2009-2013	Année	-4.16	0.2591	-11.60	3.29
	Fructif[2-1]	-9.50	0.5521	-42.11	23.12
	Fructif[3-2]				
2014-2019	Année	2.72	0.0022	1.25	4.19
	Fructif[2-1]	-1.43	0.6224	-7.29	4.42
	Fructif[3-2]	3.44	0.3861	-4.50	11.39

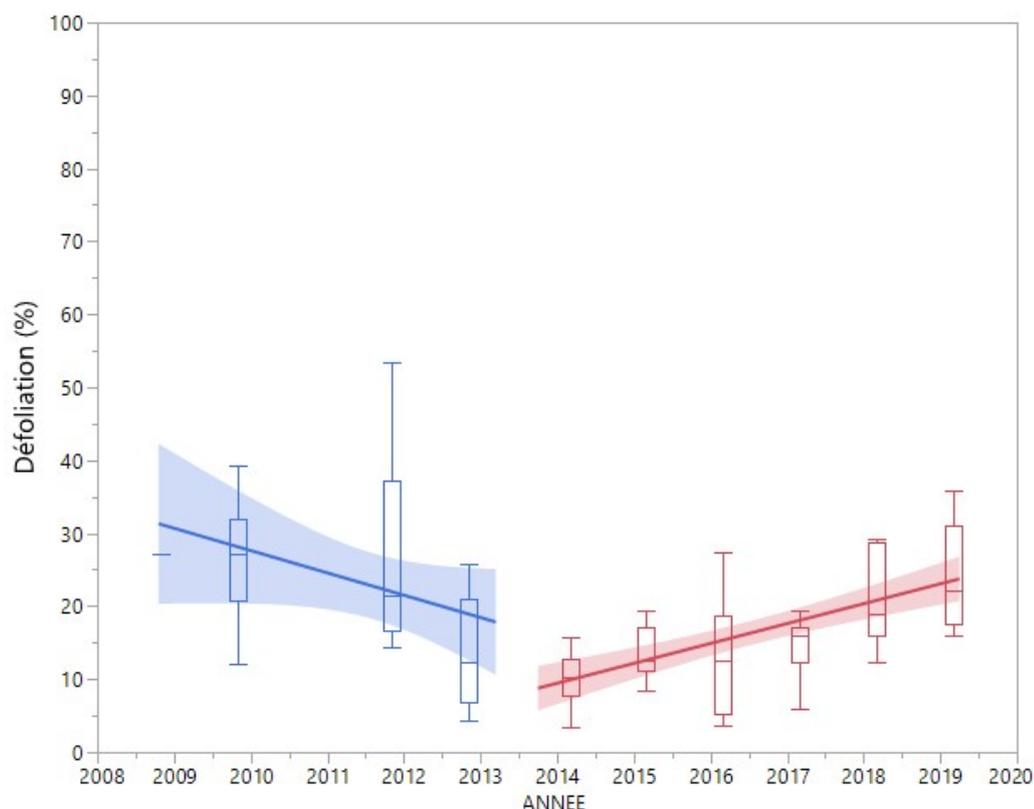


Figure 36 : Evolution des valeurs de défoliation « corrigées » (après déduction des effets « individus » et de l'effet de la fructification) pour les chênes sessiles

Détection des arbres « dépérissants » sur la période 2014-2019

Les effets aléatoires liés aux individus sont déduits de la variabilité globale pour mieux mettre en évidence les tendances globales, comme ci-dessus. D'autre part, ces effets peuvent servir à détecter les individus qui se distinguent du reste du groupe.

Premièrement, nous avons calculé les coefficients « années » pour chaque « individu » pour la période 2014-2019, en additionnant les coefficient années « fixes » issus des tables ci-dessus (pour la période et l'essence correspondante) et les coefficients années de chaque individu (effets aléatoires imbriqués) (Figure 37). Ceci permet de détecter une dizaine de hêtres, 3 chênes pédonculés et un chêne sessile qui se dégradent plus vite que la plupart des autres, mais aussi d'isoler 2 hêtres qui présentent une diminution de la défoliation. En ce qui concerne les chênes sessiles, la dispersion est plus importante que pour les deux autres essences, en raison notamment du nombre limité d'individus.

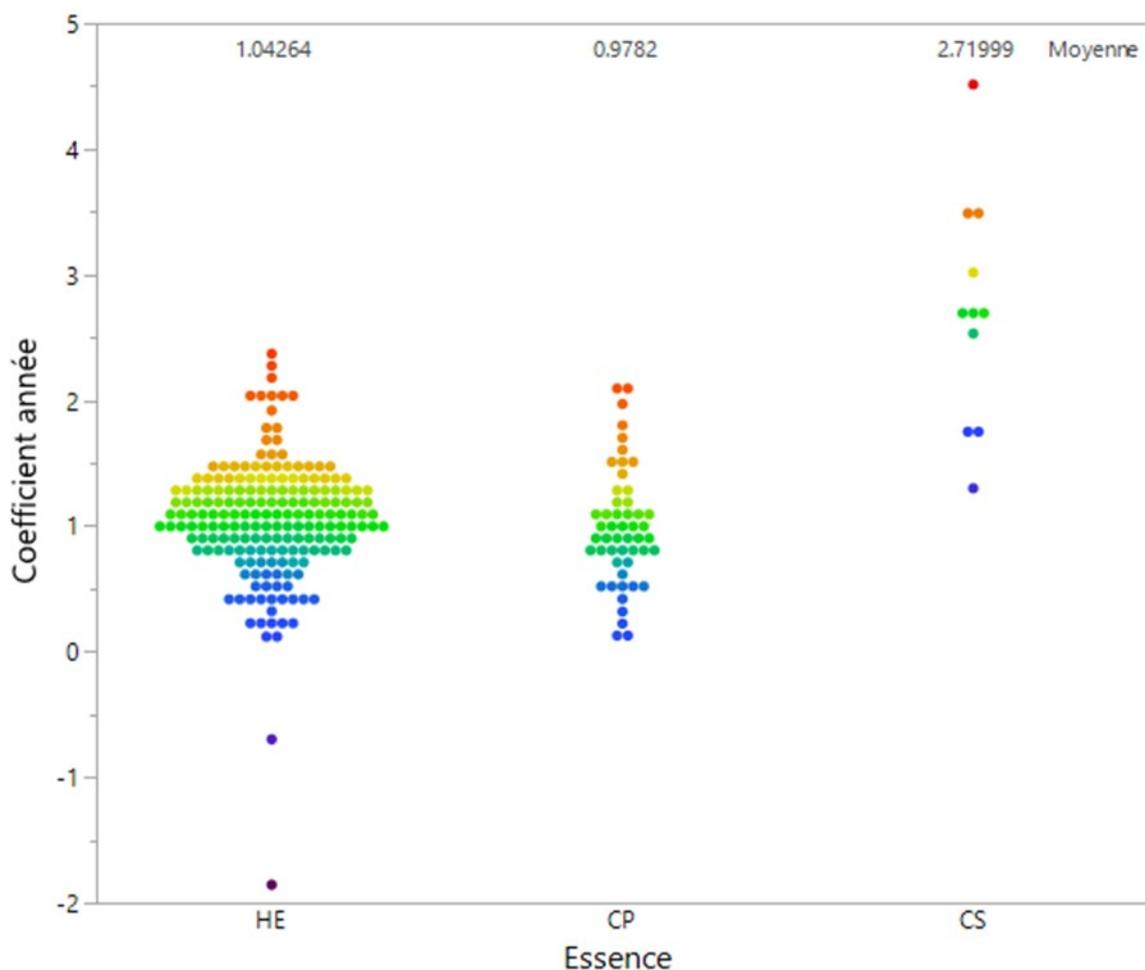


Figure 37 : Coefficients associés à l'année pour chaque arbre (= somme de l'effet fixe et de l'effet aléatoire individu-dépendant) pour la période 2014-2019 ; les couleurs sont fonction des écarts à la moyenne de ces coefficients pour chaque essence

Si l'on croise ces résultats avec la défoliation moyenne de chaque individu sur la période 2014-2019, nous pouvons identifier les arbres dont la dégradation anormalement élevée est combinée avec un niveau de défoliation élevée (Figure 38). La combinaison de ces paramètres pourrait conduire à l'établissement d'un critère pour qualifier un arbre de « dépérissants ».

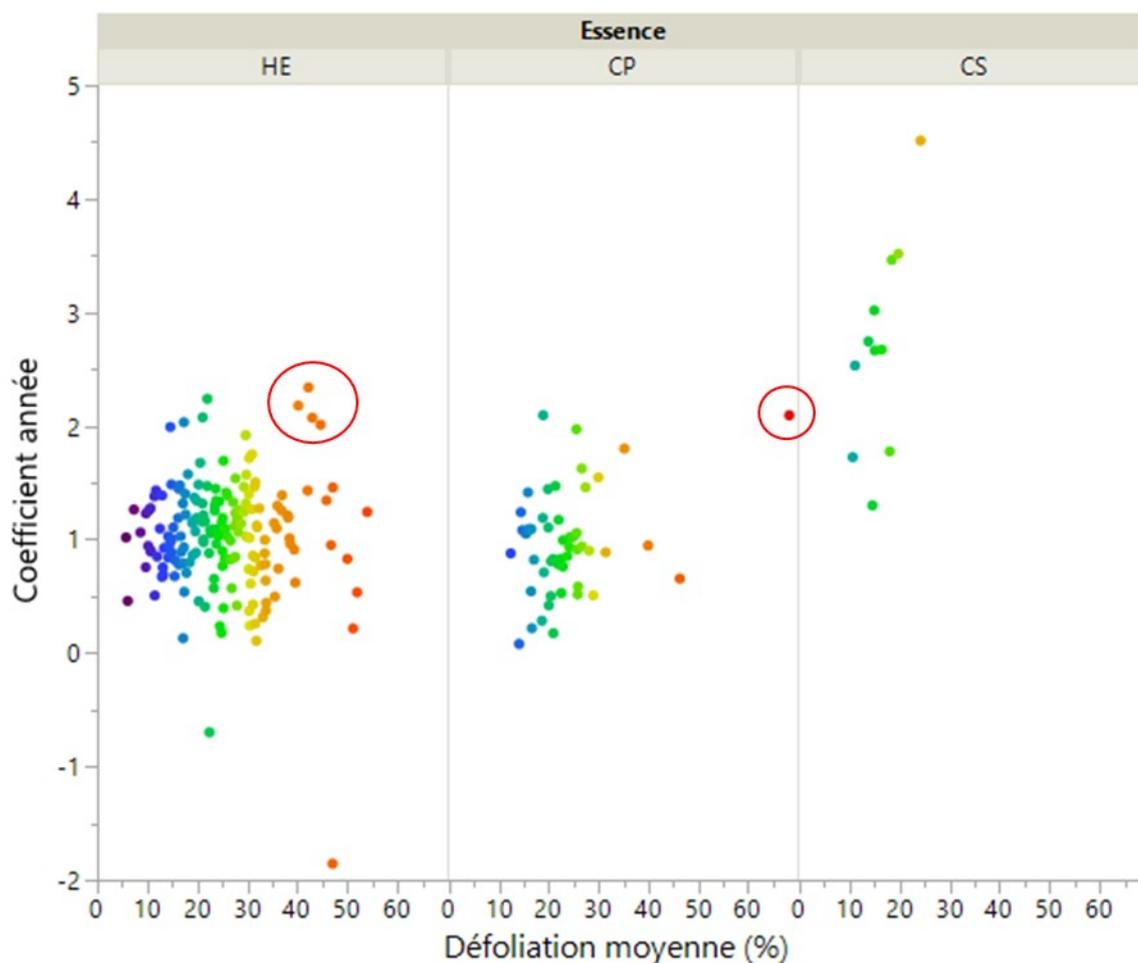


Figure 38 : Coefficients associés à l'année pour chaque arbre (= somme de l'effet fixe et de l'effet aléatoire individu-dépendant) pour la période 2014-2019 en fonction de la défoliation moyenne sur la même période ; les couleurs sont fonction des écarts à la moyenne de défoliation pour chaque essence

5.6. Dommages

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

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

Pour les chênes pédonculés, la présence d'oïdium a été notée sur 3% des arbres.

Tableau 12: Symptômes et dommages observés sur les chênes pédonculés et proportion des arbres affectés

Partie affectée	Symptôme	Proportion d'arbres affectés
Branches fines	Mortes	3 %
Feuilles	Vert clair à jaune	3%
	Oïdium	3%

Pour le hêtre, les principaux dommages observés sont le jaunissement (17% des arbres) et la mortalité de branches (18% des arbres).

Tableau 13: Symptômes et dommages observés sur les hêtres et proportion des arbres affectés

Partie affectée	Symptôme	Proportion d'arbres affectés
Feuilles	Vert clair à jaune	17%
Branches fines	Mortes ou mourantes	18%
Branches de 2 >= ϕ <10 cm	Mortes ou mourantes	3%
Branches de ϕ >=10cm	Mortes ou mourantes	2%
Racines visibles et collet	Manifestation de champignons	2%

6. Suivi photographique des houppiers à partir du sol

La collecte de clichés se poursuit avec beaucoup de soin, pour la 5^e années consécutive. Durant l'hiver 2018-2019, des prises de vue verticales ont été réalisées pour la seconde fois. Le traitement systématique de ces images n'a pas encore débuté. Nous présentons ci-dessous deux exemples d'évolutions : une augmentation marquée de la défoliation superposée à un effet de la fructification (Figure 39) et un exemple de récupération du feuillage après une dégradation brutale non liée à la fructification (Figure 40). Dans les deux cas, des branches mortes apparaissent (flèches rouges), et d'autres tombent (flèches grises). Dans le second cas, la formation de nouvelles ramifications à l'intérieur du houppier compense la mortalité des branches. Sur la période considérée, la cime de l'arbre ne s'est pas développée, alors qu'elle tend clairement à diminuer dans le premier cas. Ces images devront servir à mieux comprendre les liens entre l'évolution de la défoliation, la mortalité de branches et le développement de nouvelles branches.



Figure 39 : Exemple d'augmentation continue de la défoliation couplée à un effet de la fructification en 2016 et 2018 (flèches rouges : branches mortes durant l'année écoulée ; flèches grises : emplacement de branches mortes tombées ou cassées durant l'année écoulée)



Figure 40 : Exemple de récupération partielle après une dégradation brutale en 2017 (flèches rouges : branches mortes durant l'année écoulée ; flèches grises : emplacement de branches mortes tombées ou cassées durant l'année écoulée)

7. Conclusions générales et perspectives

Après une sécheresse exceptionnelle en 2018, nous avons connu un pic de chaleur extrême en 2019. Malgré cela, l'état sanitaire des chênes et des hêtres ne s'est pas détérioré de façon spectaculaire. Quelques arbres ont subi une forte dégradation, mais l'immense majorité des hêtres présente des valeurs proches de celles de 2017, avant la forte fructification de 2018. La situation des chênes s'est par contre globalement dégradée durant cette période.

En analysant les évolutions à plus long terme, et en déduisant les effets de la fructification et de la variabilité inter-individu, nous avons mis en évidence une augmentation de la défoliation depuis 2014 pour les 3 essences suivies. Bien que significative, cette évolution est lente (+1%) pour les chênes pédonculés et les hêtres, mais nettement plus élevée pour les chênes sessiles (+2.7%). Ces analyses statistiques pourront être complétées à l'avenir par l'introduction d'autres variables telles que la circonférence, la densité et l'architecture du houppier.

D'autre part, les photographies récoltées depuis 5 ans pourront être exploitées pour mieux caractériser l'évolution de l'architecture et de la mettre en relation avec l'évolution de la défoliation.

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