

Université catholique
de Louvain



Bruxelles-Environnement
BE-IBGE



Earth and Life Institute
Environmental
Sciences



Suivi de l'état sanitaire en forêt de Soignes bruxelloise 2017

Réalisation
Technicien
Promoteur

Hugues Titeux
Frédéric Hardy
Quentin Ponette

Janvier 2018

Convention UCL – Bruxelles Environnement 2017

Institutions : Université catholique de Louvain

*Earth and Life Institute
Environmental Sciences*

Bruxelles-Environnement (BE-IBGE)

Département Nature, Eaux et Forêts

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 seront 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 2017, 13 placettes en hêtraie visitées les années impaires et 6 placettes en chênaie ont été observées par les adjoints forestiers de BE-IBGE. Un échantillon de 133 arbres (46 chênes indigènes et 87 hêtres) a été étudié pour caractériser l'état sanitaire actuel de la forêt de Soignes, son évolution et les relations entre les différents paramètres appréhendés.

Après une forte dégradation des hêtres en 2016, liée à une fructification très abondante, les observations de l'été 2017 ont mis en évidence une nette amélioration et un retour à la situation de 2015. Les conditions climatiques très chaudes et sèches en fin d'été 2016 ainsi qu'au printemps 2017 n'ont pas eu d'incidence sur la défoliation en 2017. Par contre, elles pourraient être responsable de la décoloration des feuilles très répandue cette année. Il est possible que ce phénomène constitue un début de dégradation sanitaire, c'est pourquoi l'évolution de la défoliation devra être suivie avec attention en 2018 et 2019. Chez les chênes pédonculés, la fructification a été abondante deux

années consécutives, mais sans conséquence sur l'état sanitaire qui s'améliore nettement depuis 2015. Les chênes sessiles n'ont pas fructifié en 2017 et leur état sanitaire est très bon et stable.

Le suivi photographique a permis pour la 3^e années consécutive de récolter les images des houppiers de 40 arbres en été et en hiver. Malgré une situation globalement semblable entre 2015 et 2017, certains arbres présentent une évolution clairement visible sur les photos, ce qui est encourageant pour la mise au point d'un traitement automatisé des images.

Date de fin : Janvier 2018.

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.....	14
4. Mise en place de la campagne du suivi sanitaire de 2017	17
4.1. Plan d'échantillonnage	17
4.2. Protocole d'évaluation.....	19
5.1.1. La défoliation, indicateur de vitalité des arbres	19
4.3. Caractéristiques des arbres observés.....	21
4.3.1. Effectifs et distribution des arbres en classes de grosseurs	21
4.3.2. Concurrence – Indice d'ombrage.....	23
4.3.3. Statut social.....	23
4.3.4. Visibilité.....	24
4.4. Encodage et traitement des données.....	26
4.5. Contrôle-qualité.....	26
5. Résultats et discussions.....	28
5.1. Défoliation	28
5.1.2. Défoliation moyenne des arbres de la campagne 2017	29
5.1.3. Evolution de la défoliation moyenne de 2009 à 2017	32
5.1.4. Evolution de la défoliation d'un même échantillon d'arbres	34
5.1.4. Comparaison avec la situation en Wallonie.....	38
5.2. Fructification.....	40
5.3. Structure de la couronne.....	41
5.4. Pousses épïcormiques	45
5.5. Décoloration des feuilles	46
5.6. Lien entre la défoliation et d'autres variables.....	47
5.6.1. Analyses statistiques.....	47
5.6.2. Défoliation et circonférence	48
5.6.3. Défoliation et concurrence	50
5.6.4. Défoliation et décoloration	51
5.6.5. Défoliation et fructification.....	52
5.6.6. Défoliation et structure du houppier.....	53
5.7. Dommages.....	54
5.7.1. Distribution des dommages	54
7. Suivi photographique des houppiers à partir du sol	55
8. Conclusion générales et perspectives	58
Annexe 1 : Liste des arbres du suivi photographique	59

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) ...	18
Figure 6 : Distribution des arbres de l'échantillon analysé en 2017 selon les classes de circonférence	22
Figure 7 : Distribution des arbres selon le degré de concurrence pour l'échantillon analysé en 2017	23
Figure 8: Proportion des statuts sociaux en fonction des essences pour l'échantillon analysé en 2017	24
Figure 9: Distribution des arbres en fonction de la visibilité et de l'essence pour l'échantillon analysé en 2017.....	25
Figure 10 : Distribution des arbres selon la visibilité pour l'ensemble des arbres non dominés observés en 2017.	25
Figure 11 : Comparaison des valeurs de défoliation selon les équipes IBGE et UCL ; 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 %.....	27
Figure 12 : Informations dérivées des graphiques en boîtes à moustaches (box-plot).....	28
Figure 13 : Défoliation des chênes et des hêtres en 2017 (CP= chênes pédonculés ; CS = chênes sessiles ; HE = hêtres); les moyennes sont représentées par un point rouge et les valeurs extrêmes par des points noirs	29
Figure 14 : Défoliation des chênes et des hêtres par placette. Certains box-plots sont incomplets en raison du nombre réduit d'effectifs (c'est le cas lorsque des chênes sont présents en hêtraie, ou inversement)	30
Figure 15 : Distribution des valeurs de défoliation selon la classe de visibilité (1 : bien visible → 4 : visible uniquement par le dessous).....	31
Figure 16 : Evolution de la défoliation des hêtres (HE), des chênes non déterminés (CH), des chênes pédonculés (CP) et des chênes sessiles (CS) de 2009 à 2017.....	32
Figure 17: Evolution de la défoliation des 35 chênes pédonculés observés durant les 5 campagnes de 2013 à 2017 (les petites lettres indiquent le résultats de la comparaison des moyennes ; deux années sont caractérisées par des moyennes significativement différentes si elle ne présentent aucune lettre identique)	34
Figure 18: Evolution de la défoliation des 8 chênes sessiles observés durant les 5 campagnes de 2013 à 2017 (les petites lettres indiquent le résultats de la comparaison des moyennes ; deux années sont caractérisées par des moyennes significativement différentes si elle ne présentent aucune lettre identique)	35
Figure 19: Evolution de la défoliation des 34 hêtres observés tous les deux ans depuis 2009 (les petites lettres indiquent le résultats de la comparaison des moyennes ; deux années sont caractérisées par des moyennes significativement différentes si elle ne présentent aucune lettre identique)	36
Figure 20 : Comparaison des classes de défoliation de 2015 et 2017 pour les 33 chênes observés durant toute cette période (la taille des bulles correspond au nombre de points ayant les mêmes coordonnées)	37
Figure 21 : Comparaison des classes de défoliation de 2015 et 2017 pour les 45 hêtres observés durant toute cette période (la taille des bulles correspond au nombre de points ayant les mêmes coordonnées)	37

Figure 22 : Evolution comparée des défoliations moyennes en forêt de Soignes (BXL) et en Wallonie (RW) depuis 2010.	39
Figure 23 : Evolution du degré de fructification de 2010 à 2017 pour les chênes et les hêtres.....	40
Figure 24 : 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.....	41
Figure 25: Fiche de terrain différenciant les 8 formes du houppier du hêtre.....	42
Figure 26 : Distribution des chênes pédonculés selon la structure de la couronne	43
Figure 27 : Distribution des chênes sessiles selon la structure de la couronne.....	43
Figure 28 : Distribution des hêtres selon la structure de la couronne.....	44
Figure 29 : Distribution des arbres selon l'abondance des pousses épïcormiques	45
Figure 30: Distribution des arbres selon le pourcentage de décoloration du feuillage.....	46
Figure 31 : Régression linéaire de la défoliation des hêtres en fonction de la circonférence en cm (C150) en 2017	49
Figure 32: Défoliation des chênes indigènes et des hêtres selon l'indice d'ombrage en 2017	50
Figure 33: Défoliation des chênes indigènes et des hêtres selon l'intensité de la décoloration en 2017	51
Figure 34: Distribution de la défoliation des chênes et des hêtres selon l'abondance de la fructification en 2017	52
Figure 35: Distribution de la défoliation des hêtres selon la forme du houppier en 2017 (la signification des codes est indiquée aux Figure 24 et Figure 25).....	53
Figure 36 : Dégradation des houppiers des arbres 3345-4 et 4469-2 entre 2015 et 2017	56
Figure 37 : Amélioration de l'état des houppiers des arbres 2871-1 et 4469-4 entre 2015 et 2017 ...	57

Table des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques et exemples de facteurs de dépérissement.	10
Tableau 2 : Valeurs climatiques mesurées en saison de végétation 2017 comparées aux normales mensuelles calculées sur la période 1981-2010 (IRM, Uccle).....	16
Tableau 3 : Placettes des sous-échantillons. Les numéros correspondent aux identifiants des placettes	17
Tableau 4 : Effectifs (placettes, arbres) lors des campagnes d'observation de 2009 à 2016	21
Tableau 5 : Moyenne des écarts de défoliation par essence observée en 2017 et résultats des tests t de Student	27
Tableau 6: Valeurs moyenne de défoliation par année et essence	33
Tableau 7 : Corrélacion entre la circonférence et la défoliation en fonction de l'essence et de l'année	48
Tableau 8: Résultats des régressions linéaires entre la circonférence (y ; cm) et la défoliation (x) par année.....	48
Tableau 9: Symptômes et dommages observés sur les hêtres et proportion des arbres affectés.....	54

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 spécifique 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.

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, pourritures, 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.

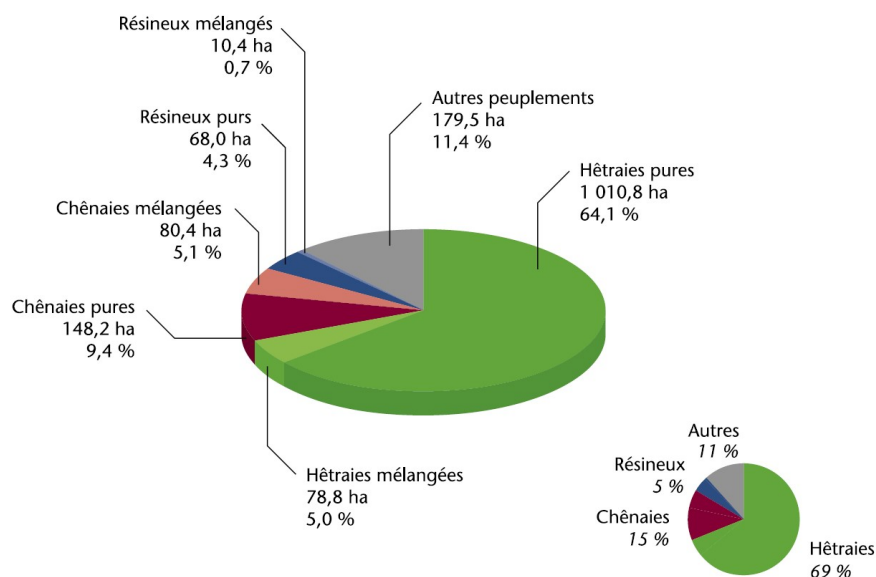


Figure 1: Proportion des types de peuplements en forêt de Soignes bruxelloise (Braem *et al.*, 2010)

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

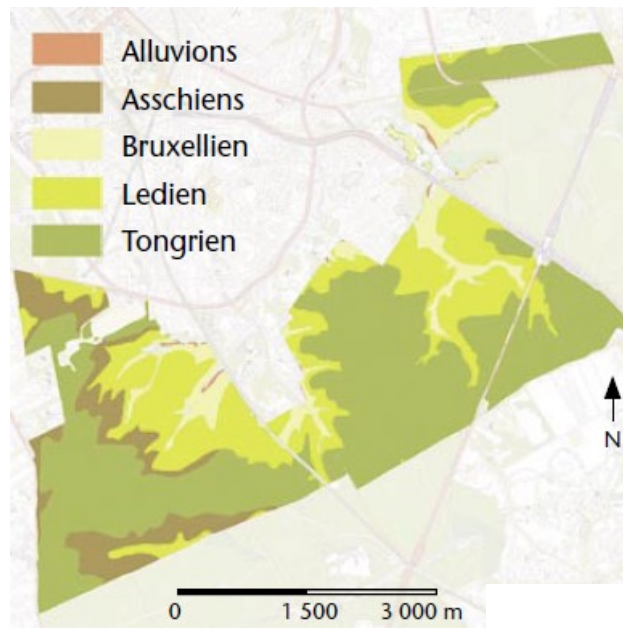


Figure 2: Roche-mère géologique présente sous le limon éolien. Les teintes jaunes présentent les assises à dominance sableuse (source: carte géologique de la Belgique, numérisation: BE-IBGE)

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.

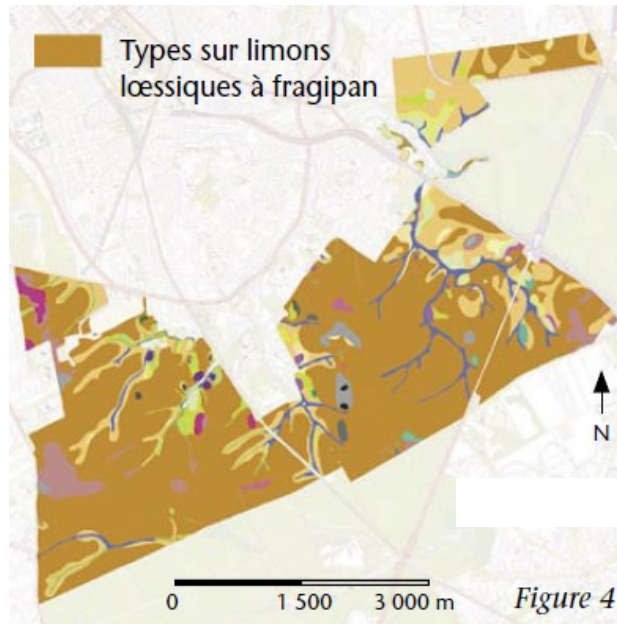


Figure 3 : Les sols de la Forêt de Soignes sont dominés par le type Abc interprété comme étant un sol limoneux à fragipan (source: cartes des sols de Belgique; numérisation BE-IBGE)

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.

Uccle (Belgique) – Station 06447

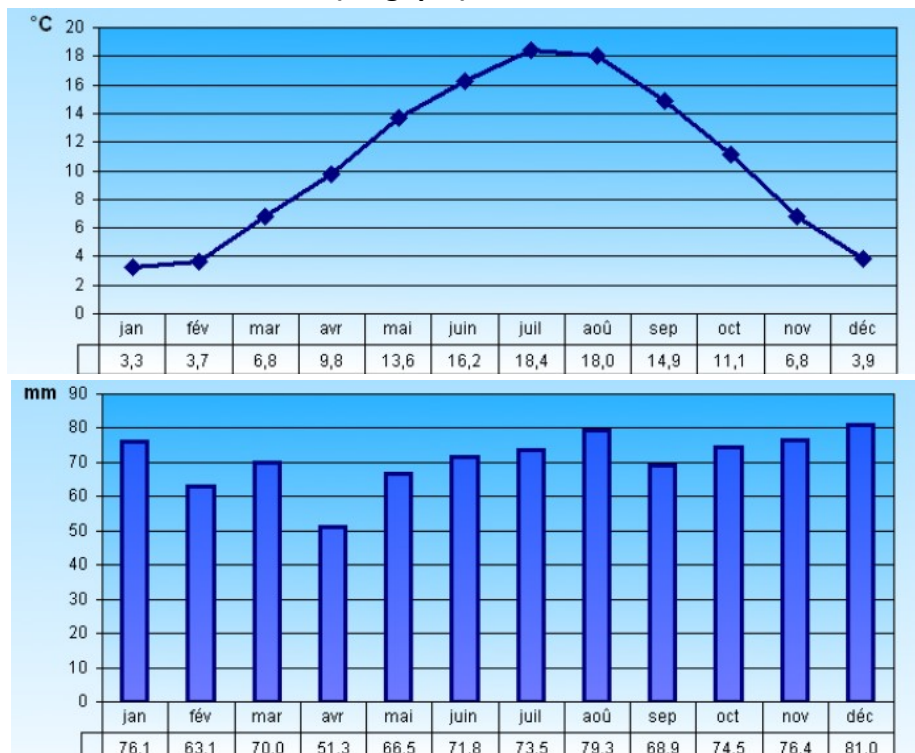


Figure 4 : Température et précipitations mensuelles mesurées à la station météorologique d'Uccle, 1981-2010 (IRM, 2011).

Les valeurs météorologiques mesurées à Uccle durant la période de végétation de 2017 sont présentées au Tableau 2. Par rapport aux normales mensuelles observées de 1981 à 2010, les températures sont anormalement élevées en avril et exceptionnellement élevées en juin. Les précipitations sont très anormalement basses en avril, et considérées comme normales durant les autres mois. Toutefois, il faut noter que la fin de l'été 2016, l'automne 2016, l'hiver 2016-2017 et le début du printemps 2017 ont également été anormalement secs. Dès lors, les sols ont atteint un niveau de dessèchement important au mois de juin.

Tableau 2 : Valeurs climatiques mesurées en saison de végétation 2017 comparées aux normales mensuelles calculées sur la période 1981-2010 (IRM, Uccle)

	P (mm)	P normale (mm)	T moy (°C)	T normale (°C)
Avril 2017	15.2	51,3	8.8	9,8
Mai 2017	45.1	66,5	15.5	13,6
Juin 2017	50.8	71,8	19.2	16,2
Juillet 2017	58.3	73,5	18.6	18,4
Août 2017	70.8	79,3	18.1	18
Sept. 2017	77.5	68.9	14.1	14.9

4. Mise en place de la campagne du suivi sanitaire de 2017

Les activités suivantes ont été réalisées en 2017 :

- (i) Le suivi de l'état sanitaire de 19 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 28 juin 2017
 - b. La revisite de 7 placettes du suivi sanitaire par l'UCL
- (iii) Le traitement et l'interprétation des données

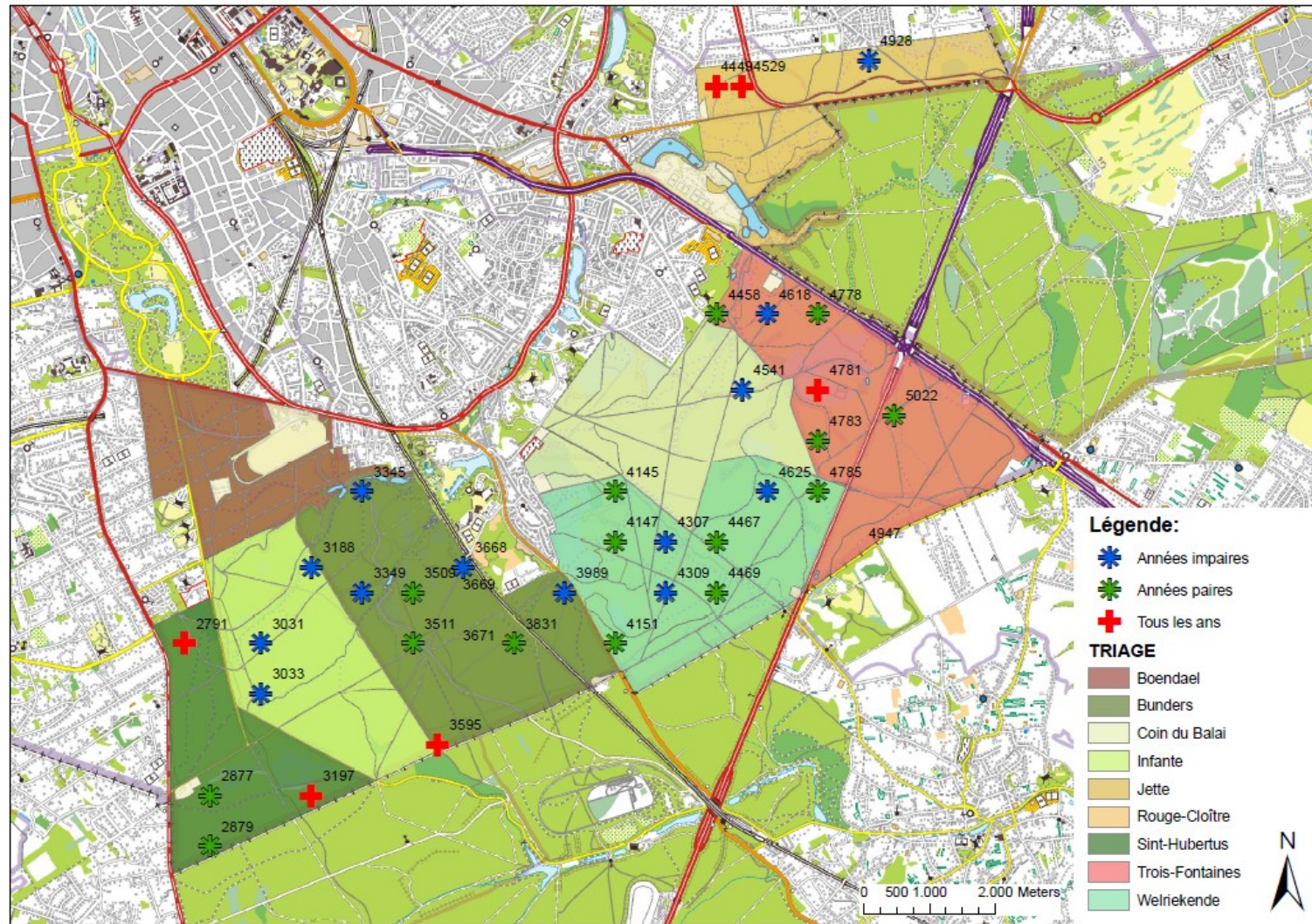
4.1. Plan d'échantillonnage

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 à observer en 2017 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.

Tableau 3 : Placettes des sous-échantillons. Les numéros correspondent aux identifiants des placettes

	Années paires (15 placettes)	Années impaires (13 placettes)
Placettes en hêtraie	2877, 2879, 3509, 3511, 3831, 4145, 4147, 4151, 4458, 4467, 4469, 4778, 4783, 4785, 5022	3031, 3033, 3188, 3345, 3349, 3668, 3989, 4307, 4309, 4541, 4618, 4625, 4928
Placettes en chênaie	2791, 3197, 3595, 4449, 4529, 4781 (6 placettes)	



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.
- 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 2017, 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 du houppier lui-même. Les dommages sont, quant à eux, estimés sur les différentes parties de l'arbre (houppier, tronc, collet).

5.1.1. 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.

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 mises à blanc. 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.

4.3. Caractéristiques des arbres observés

4.3.1. 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 (3 hêtres et un chêne pédonculé) ont été inclus dans l'échantillon cette année car ils ont atteint la circonférence de 80 cm, considérée comme le seuil de sélection.

Tableau 4 : Effectifs (placettes, arbres) lors des campagnes d'observation de 2009 à 2016

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

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 2017 portent sur un échantillon de 87 hêtres, 39 chênes pédonculés et 7 chênes sessiles.

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

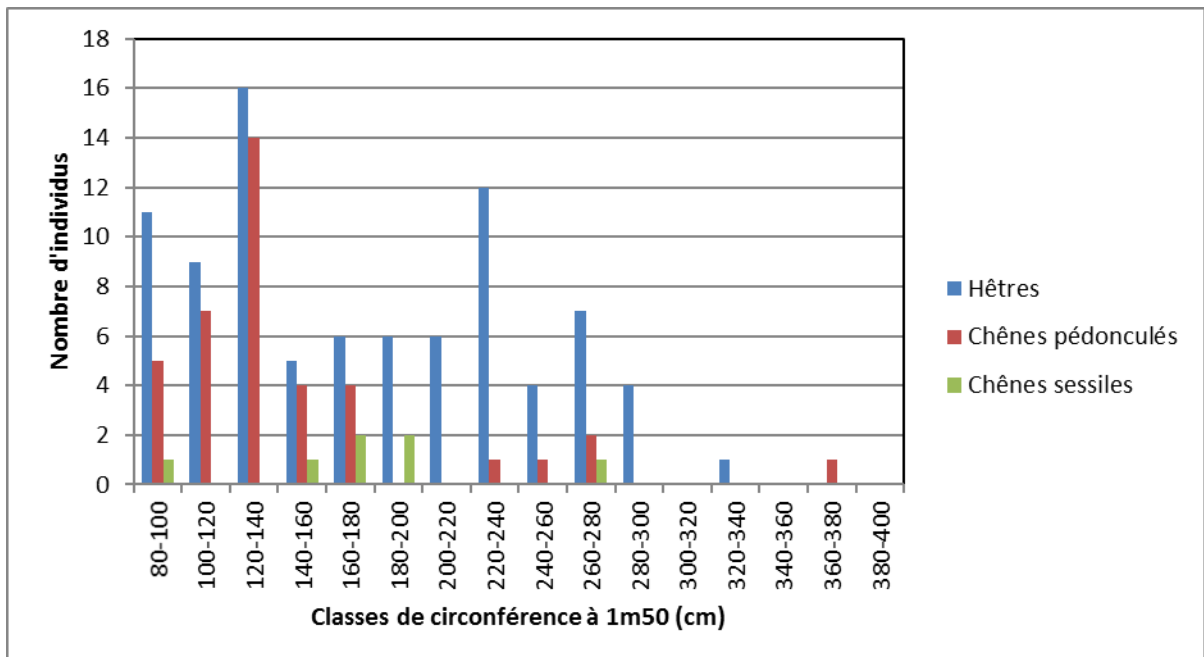


Figure 6 : Distribution des arbres de l'échantillon analysé en 2017 selon les classes de circonférence

4.3.2. 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.

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.

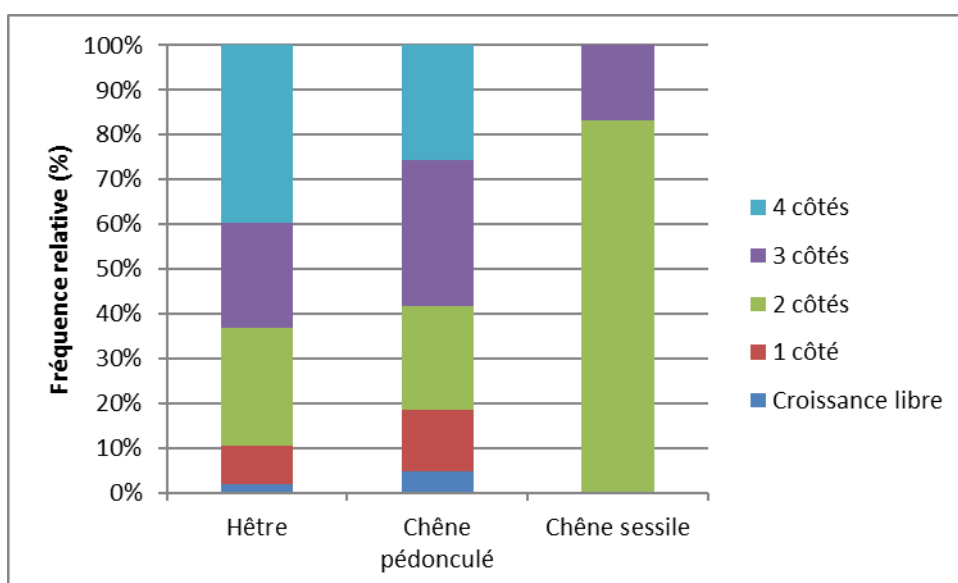


Figure 7 : Distribution des arbres selon le degré de concurrence pour l’échantillon analysé en 2017

4.3.3. 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 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 : 80% des chênes pédonculés, 60% des hêtres et 55% des chênes sessiles sont co-dominants.

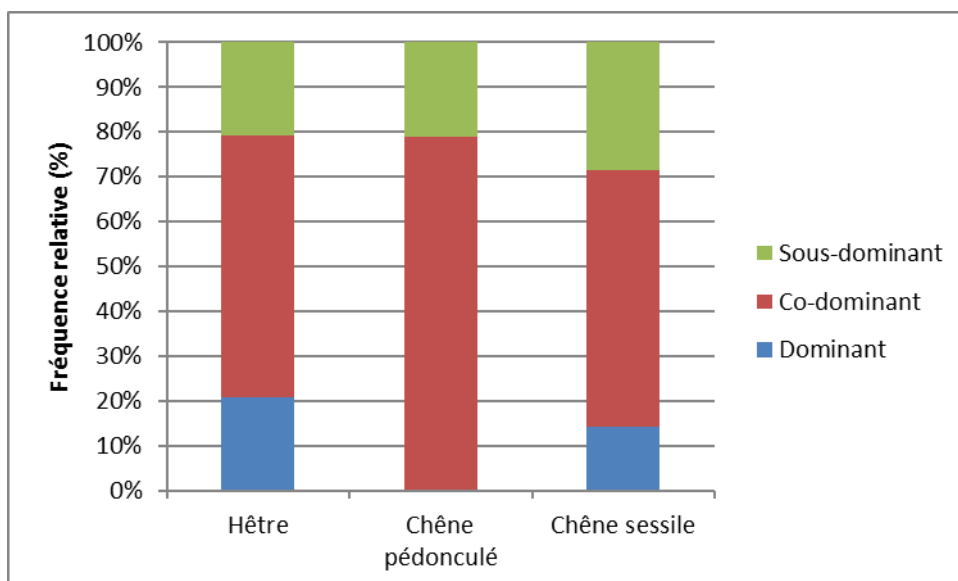


Figure 8: Proportion des statuts sociaux en fonction des essences pour l'échantillon analysé en 2017

4.3.4. Visibilité

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

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

La visibilité est un facteur limitant et une source d'erreur pour la caractérisation de la couronne. De fait, lorsque la visibilité de la couronne est réduite à cause des houppiers voisins, 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 20% des chênes et 30% des hêtres présentent une couronne bien visible. Pour 13% des hêtres et 12% des chênes pédonculés, la couronne est non visible latéralement, ce qui signifie que ces arbres ont été observés par le bas.

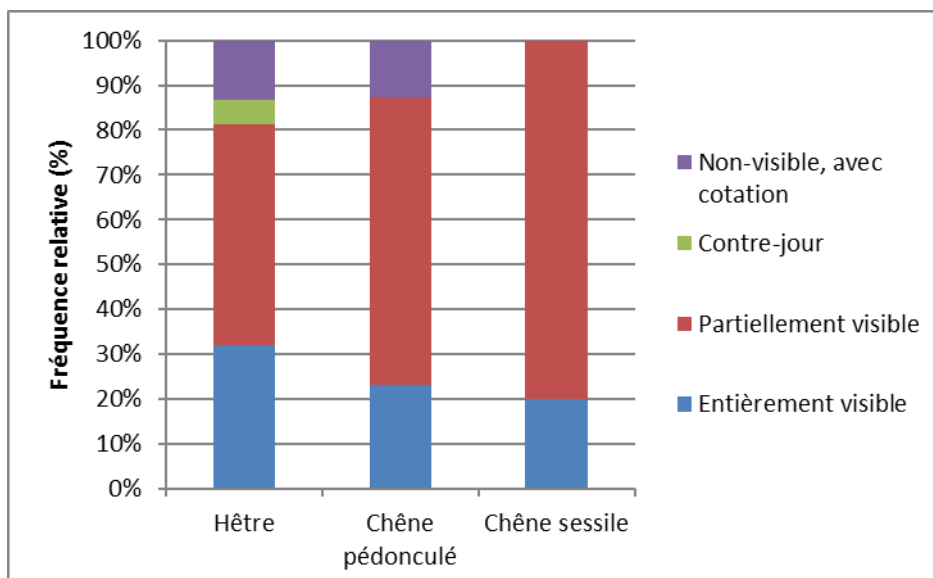


Figure 9: Distribution des arbres en fonction de la visibilité et de l'essence pour l'échantillon analysé en 2017

Si l'on se réfère à l'ensemble des arbres observés non dominés, nous constatons qu'il existe une proportion significative d'arbres (17% des hêtres, 18% des chênes sessiles et 10% des chênes pédonculés) qui 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.

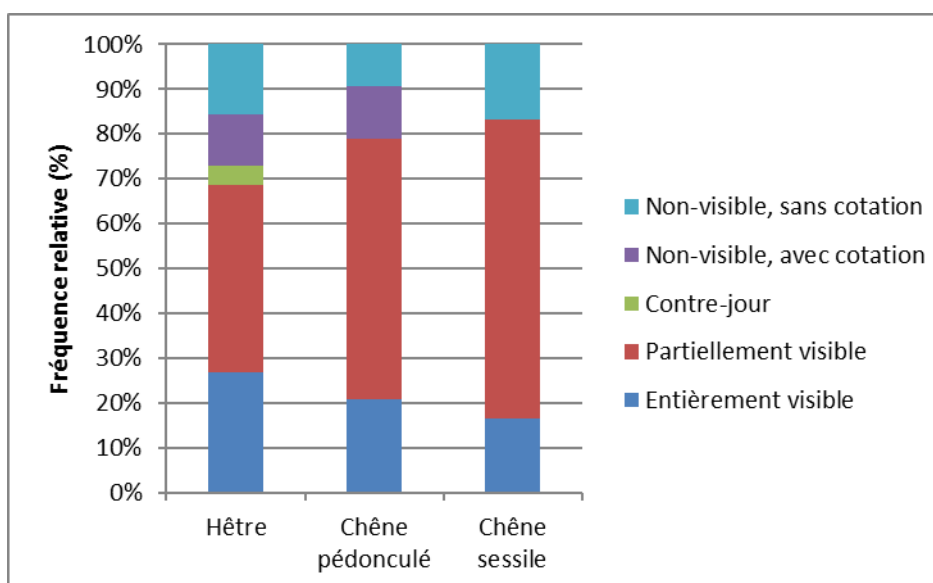


Figure 10 : Distribution des arbres selon la visibilité pour l'ensemble des arbres non dominés observés en 2017.

4.4. Encodage et traitement des données

L'ensemble des données recueillies durant la campagne 2016 ont été encodées dans la base de données MS Access, puis exportées en *MS Excel* pour préparer les traitements statistiques (logiciel *JMP pro 12.2*).

4.5. Contrôle-qualité

La méthode de diagnostic de l'état sanitaire étant basée sur des observations visuelles, le résultat est fortement 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 7 placettes réparties sur les deux brigades durant le mois de juillet : 4 placettes en hêtraie (n° 3031, 3349, 4307, 4541) et 3 placettes en chênaie (n° 3595, 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 62 arbres a été contrôlé, cet échantillon comprend 20 hêtres, 26 chênes pédonculés et 1 chêne sessile, soit respectivement 23%, 67% et 14% 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 70% pour les hêtres, 81% pour les chênes pédonculés et 100% pour le chêne sessile. Le critère de qualité est donc rencontré pour les 3 essences, mais il est évident que l'échantillon de chêne sessile (n=1) est bien trop réduit pour permettre une extrapolation

Tableau 5 : Moyenne des écarts de défoliation par essence observée en 2017 et résultats des tests t de Student

	Effectif de contrôle	Proportion contrôlée (%)	Défoliation moyenne UCL (%)	Défoliation moyenne BE-IBGE(%)	Moyenne des écarts BE-IBGE – UCL(%)	Résultat test t de Student
Hêtres	20	23	33.4	38.0	4.6	Prob.> t = 0.059
Chênes pédonculés	26	67	24.4	21.0	-3.4	Prob.> t = 0.036*
Chênes sessiles	1	14	15	10	-5	/

D'autre part ; nous observons que la moyenne des écarts de défoliation entre IBGE et l'UCL est de -4.6 % pour les hêtres, de -3.4 % pour les chênes pédonculés et de -5% pour les chênes sessiles (Tableau 5). Les tests appariés (Student) indiquent que la différence, bien que très faible, est significative pour le chêne pédonculé. Les graphes comparatifs (Figure 11) montrent que l'écart observé pour les hêtres et les chênes pédonculés est généralement très faible, mais quelques individus présentent un écart important (positif pour les hêtres et négatif pour les chênes).

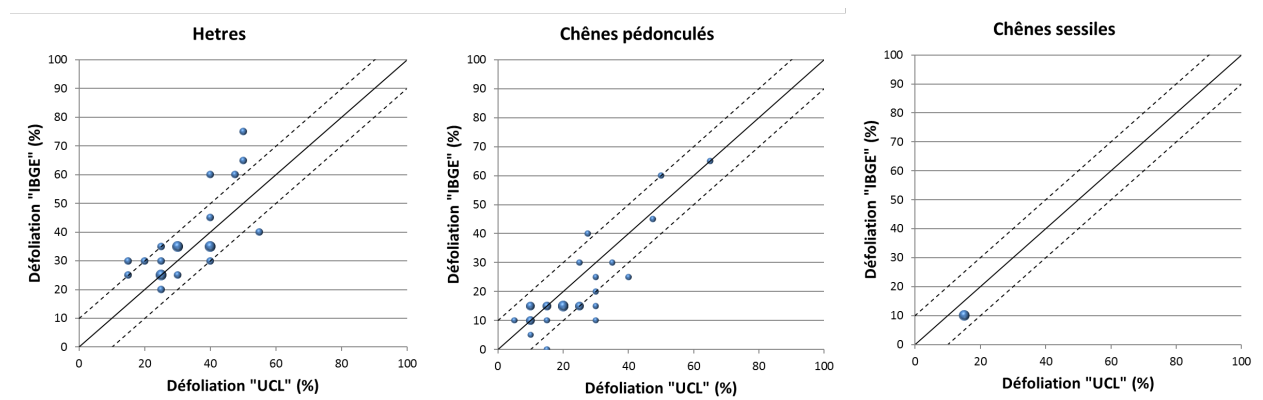


Figure 11 : Comparaison des valeurs de défoliation selon les équipes IBGE et UCL ; la surface des bulles illustre le nombre de points de mêmes coordonnées ; la droite continue correspond au rapport 1:1 ; les droites pointillées correspondent aux seuils de +/- 10 %.

Parmi les hêtres présentant un écart important, 2 d'entre eux se démarquant également lorsque l'on compare les valeurs de défoliation 2015 à 2017 (Figure 21). Il est dès lors probable qu'il y ait eu des soucis dans l'identification des arbres sur le terrain ou une erreur lors de l'évaluation ou la transcription des résultats. Les placettes concernées devraient être visitées lors de la journée de formation 2018 afin de clarifier l'identification des arbres.

Globalement, nous pouvons conclure que les résultats du contrôle sont nettement meilleurs qu'en 2016, qui fut une année particulièrement compliquée du fait de l'abondance de la fructification du hêtre et des « pousses de la Saint-Jean » des chênes.

5. Résultats et discussions

5.1. Défoliation

La plupart des résultats concernant la défoliation sont présentés sous forme de « box-plots ». Les informations disponibles dans ce type de représentation sont expliquées à la Figure 12.

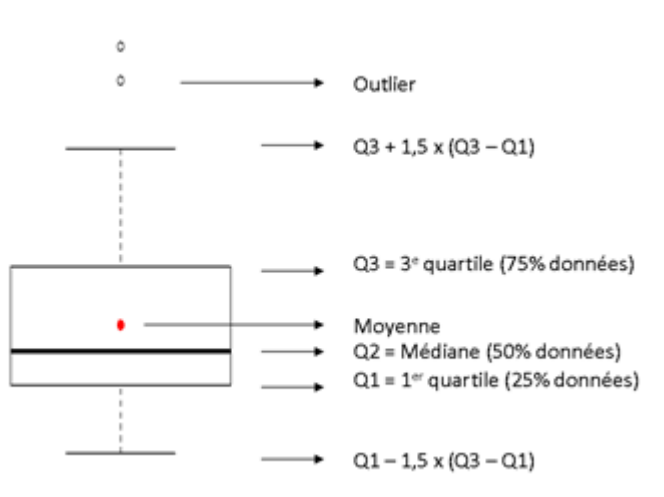


Figure 12 : Informations dérivées des graphiques en boîtes à moustaches (box-plot)

5.1.2. Défoliation moyenne des arbres de la campagne 2017

La Figure 13 présente la distribution des valeurs de défoliation pour les échantillons de 48 chênes et les 87 hêtres répartis au sein des 21 placettes. La défoliation moyenne est de 19% pour les chênes pédonculés, 13% pour les chênes sessiles et de 27% pour les hêtres. La proportion d'arbres dont la défoliation est supérieure à 25% permet également de quantifier l'intensité du dépérissement. Elle est de 45% pour les hêtres, 18% pour les chênes pédonculés et 0% pour les chênes sessiles.

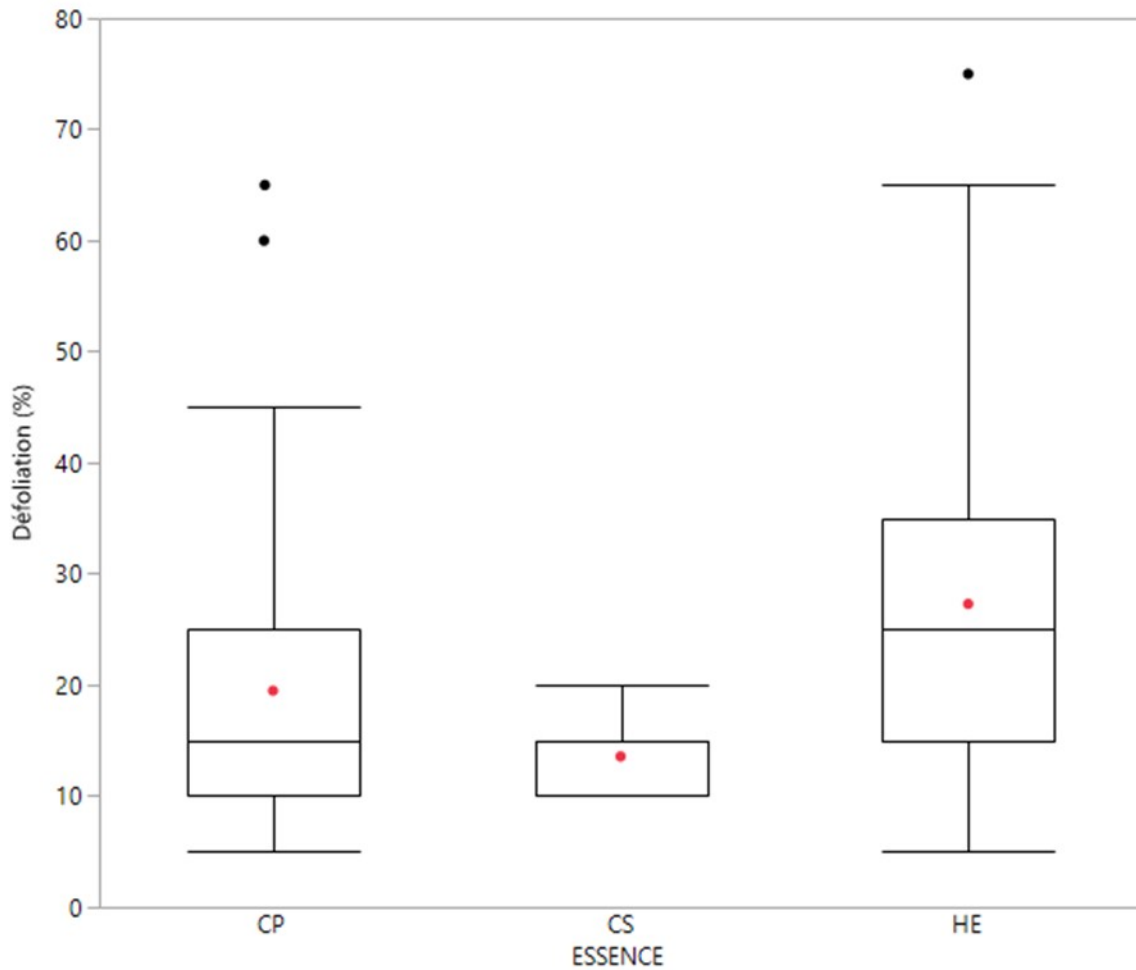


Figure 13 : Défoliation des chênes et des hêtres en 2017 (CP= chênes pédonculés ; CS = chênes sessiles ; HE = hêtres); les moyennes sont représentées par un point rouge et les valeurs extrêmes par des points noirs

Les taux de défoliation par placette sont présentés à la Figure 14. 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. Les différences entre placettes s'expliquent principalement par l'âge du peuplement.

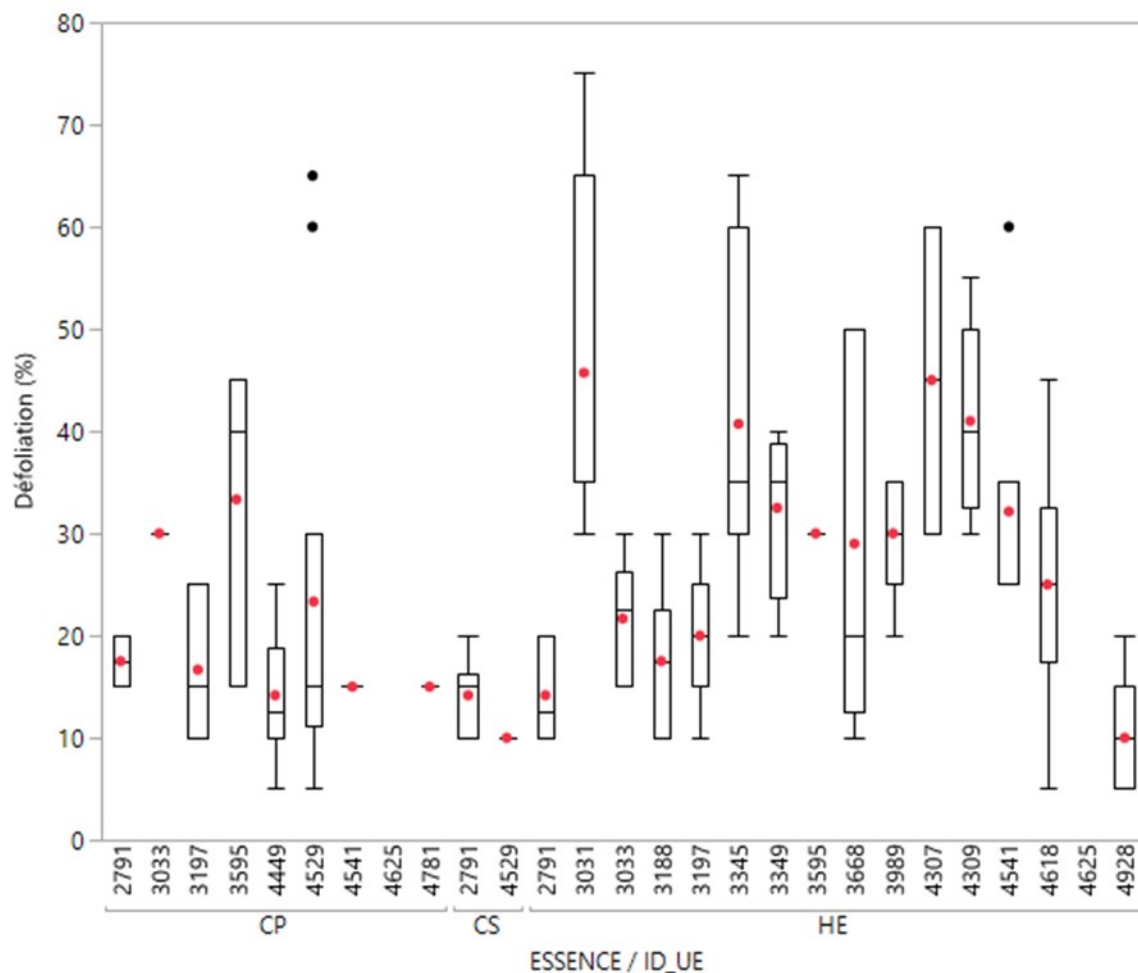


Figure 14 : Défoliation des chênes et des hêtres par placette. Certains box-plots sont incomplets en raison du nombre réduit d'effectifs (c'est le cas lorsque des chênes sont présents en hêtraie, ou inversement)

Les résultats sont également présentés en fonction de la visibilité de la couronne à observer (Figure 15). Nous observons une diminution de la défoliation lorsque la visibilité diminue pour le hêtre, et dans une moindre mesure, pour le chêne pédonculé. Cela s'explique par le fait que les arbres les moins visibles font souvent partie des peuplements plus jeunes et qui présentent donc une défoliation généralement plus faible. De plus, la meilleure visibilité facilite la détection des problèmes.

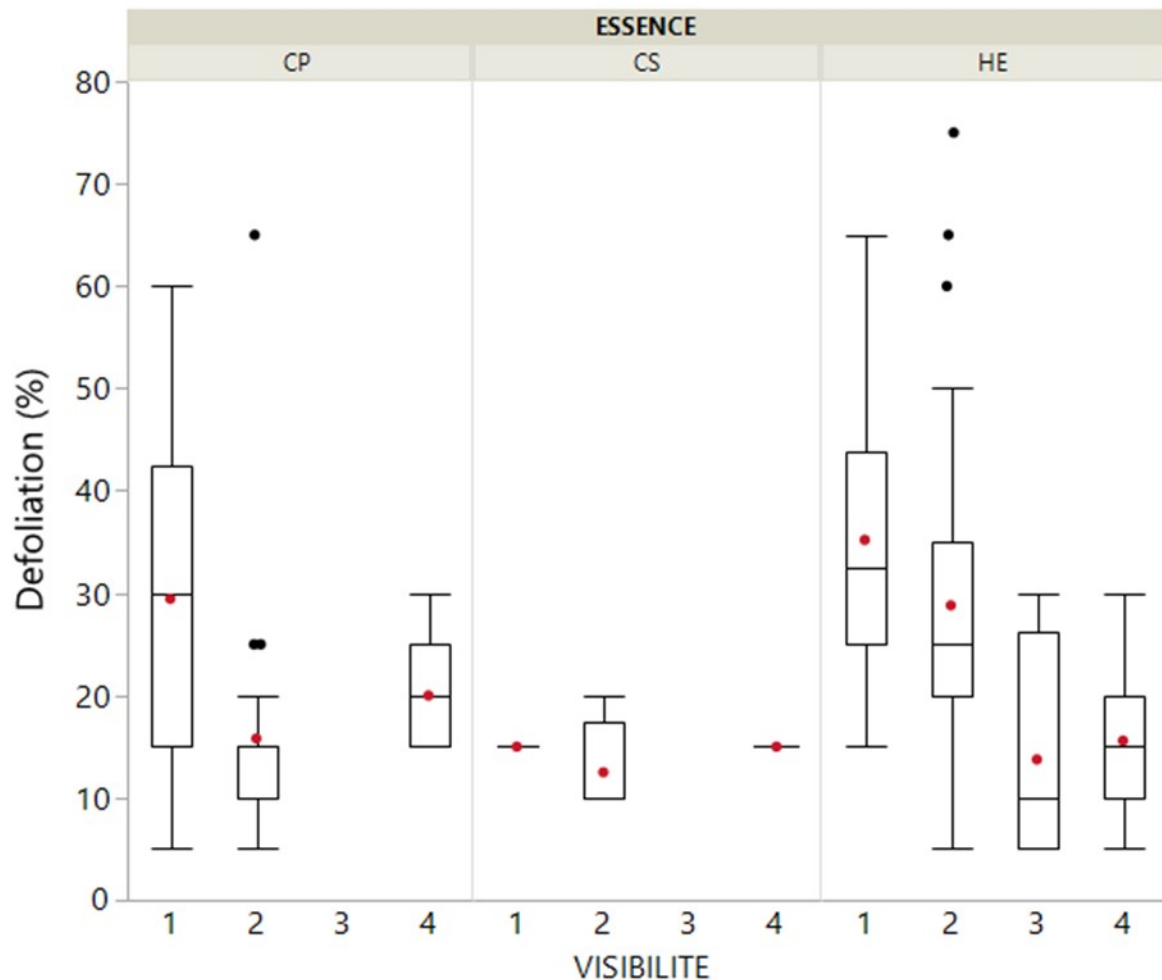


Figure 15 : Distribution des valeurs de défoliation selon la classe de visibilité (1 : bien visible → 4 : visible uniquement par le dessous)

5.1.3. Evolution de la défoliation moyenne de 2009 à 2017

L'évolution moyenne de la défoliation des arbres non dominés est présentée à la Figure 16. Les valeurs moyennes sont reprises dans le Tableau 6. 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).

Les hêtres présentaient des valeurs de défoliation nettement supérieures en 2016 par rapport à 2015, la différence atteignant pratiquement 10%. En 2017, nous retrouvons des valeurs proches de 2013 et 2015, ce qui confirme que la dégradation de 2016 était passagère et liée à la fructification particulièrement abondante cette année-là.

Pour les chênes sessiles, les valeurs sont stables depuis 2013 ; elles sont en légère diminution par rapport à 2015 pour les chênes pédonculés. Nous n'effectuons pas d'analyses statistiques sur ces données car les échantillons observés varient selon les années suite aux coupes à blanc, à la sélection de placettes de remplacement, aux éclaircies et surtout à l'alternance bisannuelle des placettes de hêtre visitées.

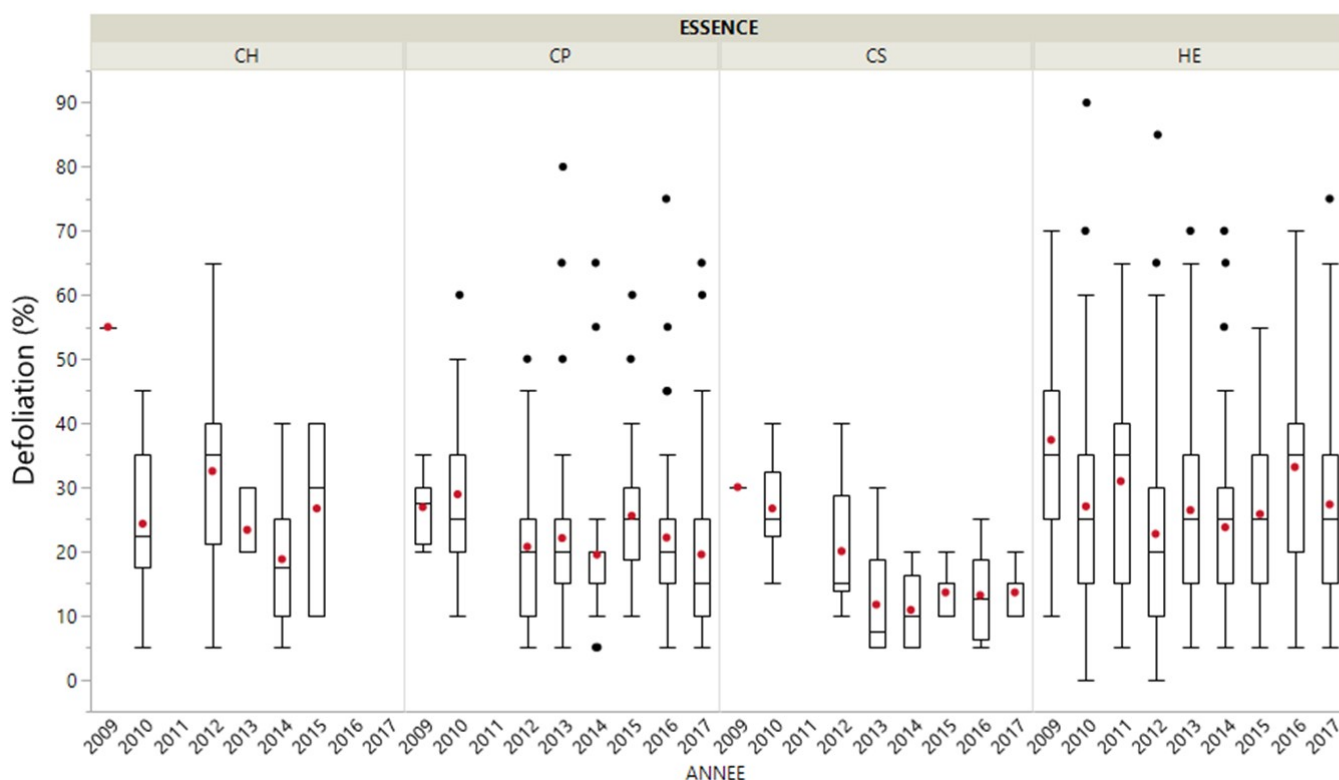


Figure 16 : Evolution de la défoliation des hêtres (HE), des chênes non déterminés (CH), des chênes pédonculés (CP) et des chênes sessiles (CS) de 2009 à 2017

Tableau 6: Valeurs moyenne de défoliation par année et essence

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

5.1.4. Evolution de la défoliation d'un même échantillon d'arbres

Etant donné que les échantillons d'arbres observés ne sont pas identiques chaque année, nous avons sélectionné un sous-échantillon de tous les arbres observés chaque année pour le chêne (35 chênes pédonculés et 7 chênes sessiles) et toutes les années impaires depuis 2009 pour les hêtres (34 arbres). Ce sous-échantillon est certes moins représentatif de la zone étudiée, mais ne présente pas de biais inter-annuel.

Nous avons présenté les résultats sous forme de box-plots au-dessus desquels figurent les résultats des tests de Student (Figure 17 à Figure 19): la présence d'une lettre commune pour deux années signifie que les moyennes associées ne sont pas significativement différentes ($\alpha = 0.05$).

Nous observons pour les chênes pédonculés une augmentation de la défoliation moyenne entre 2014 et 2015, suivie d'une diminution de 2015 à 2017. Pour les chênes sessiles, nous n'observons pas d'évolution significative.

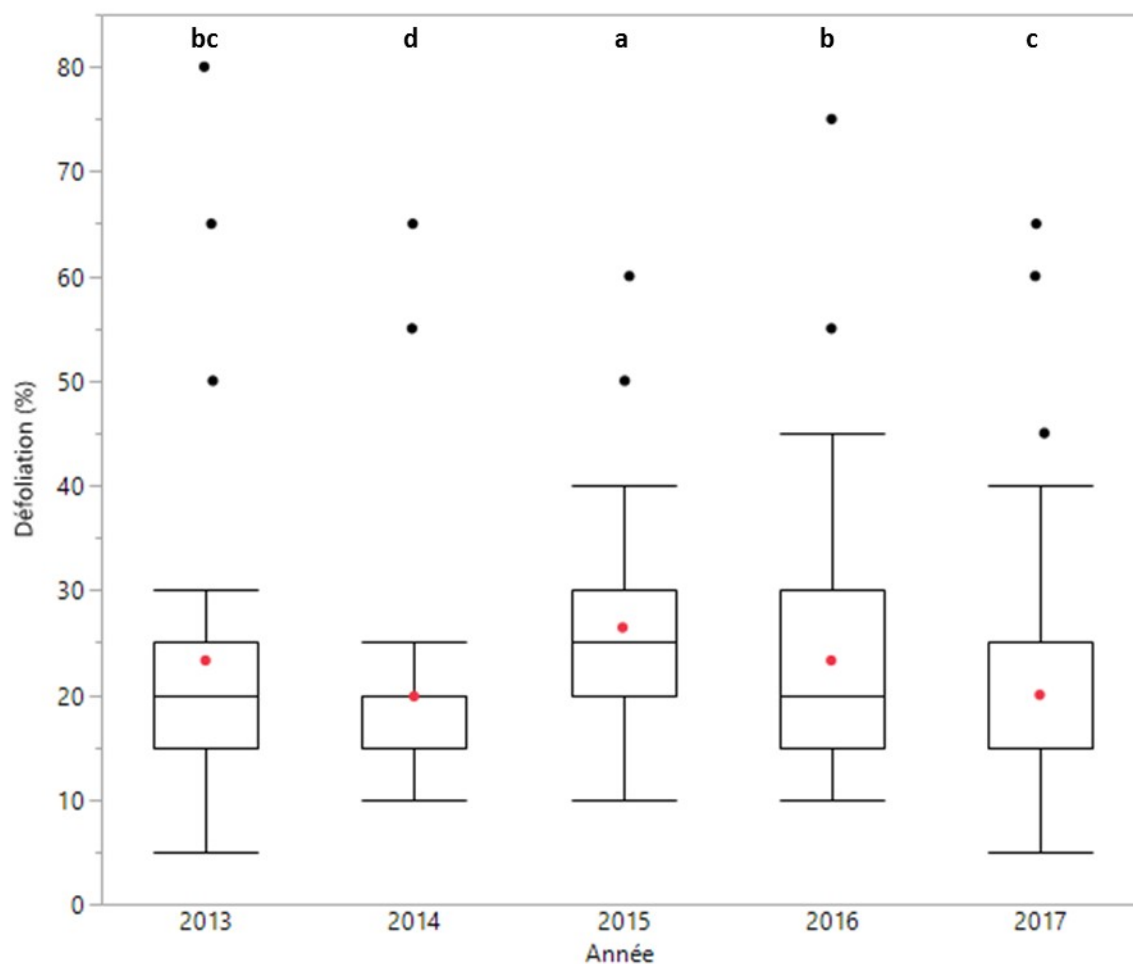


Figure 17: Evolution de la défoliation des 35 chênes pédonculés observés durant les 5 campagnes de 2013 à 2017 (les petites lettres indiquent le résultats de la comparaison des moyennes ; deux années sont caractérisées par des moyennes significativement différentes si elle ne présentent aucune lettre identique)

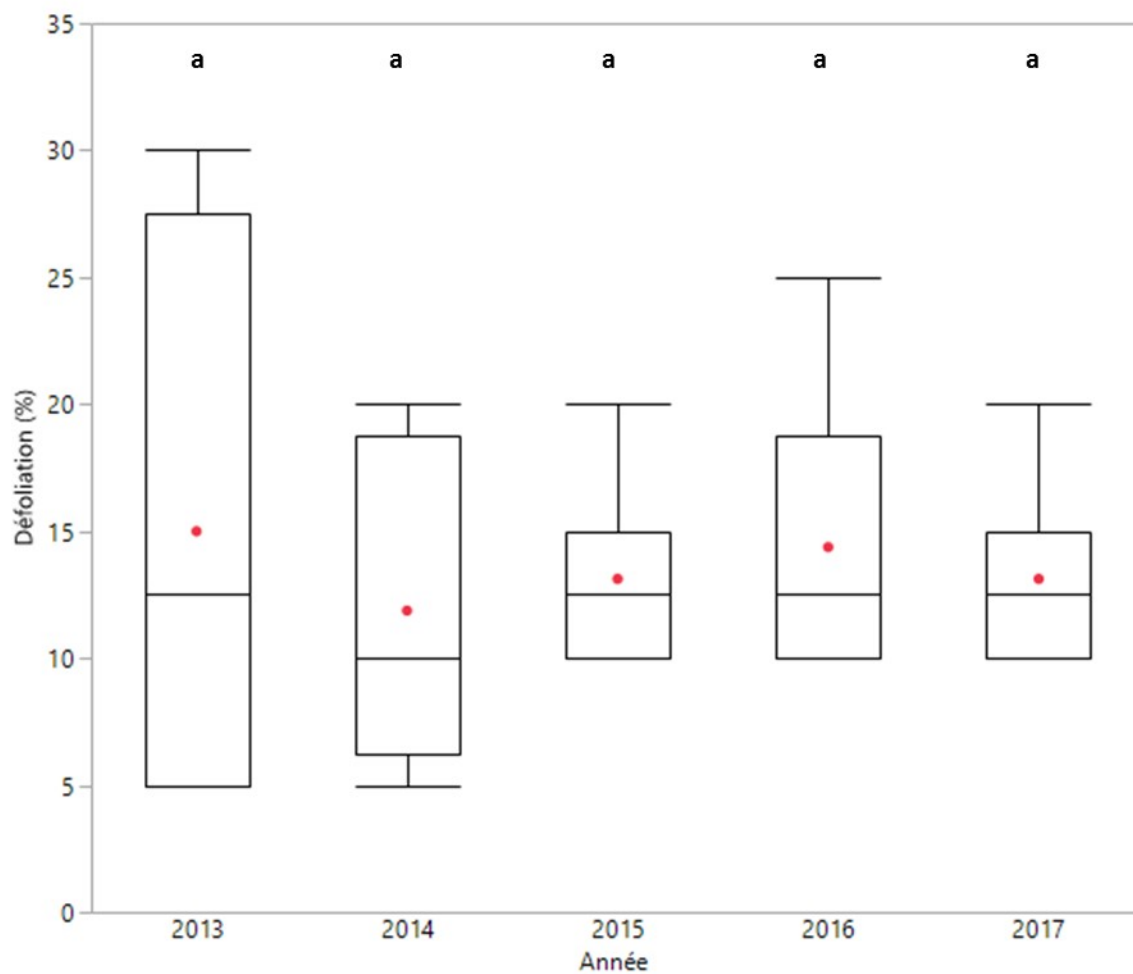


Figure 18: Evolution de la défoliation des 8 chênes sessiles observés durant les 5 campagnes de 2013 à 2017 (les petites lettres indiquent le résultats de la comparaison des moyennes ; deux années sont caractérisées par des moyennes significativement différentes si elle ne présentent aucune lettre identique)

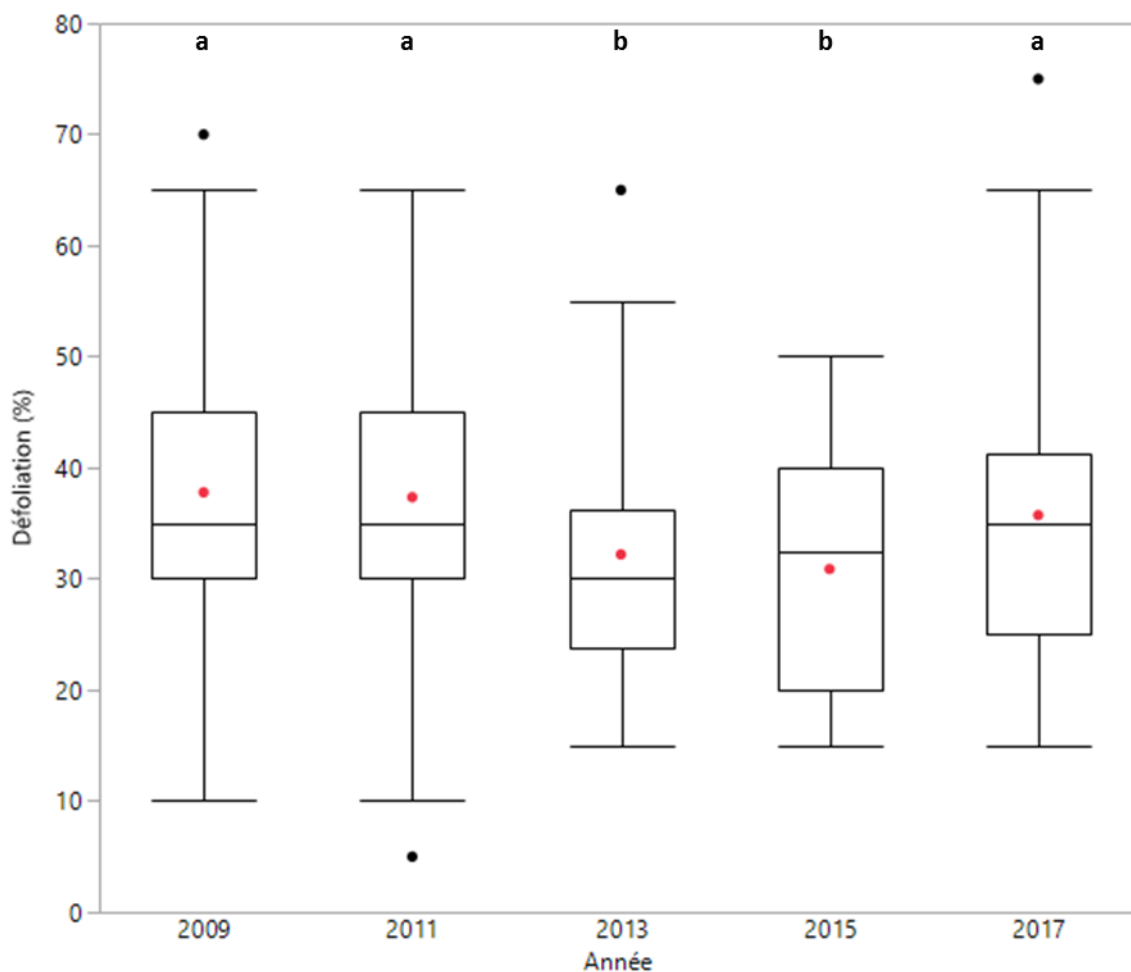


Figure 19: Evolution de la défoliation des 34 hêtres observés tous les deux ans depuis 2009 (les petites lettres indiquent le résultats de la comparaison des moyennes ; deux années sont caractérisées par des moyennes significativement différentes si elle ne présentent aucune lettre identique)

Il semble donc que les hêtres ont globalement bien récupéré leur feuillage après le stress liée à la fructification de 2016, comme le suggère la Figure 16. Toutefois, on ne retrouve pas exactement la situation de l'année 2015, qui a précédé cet épisode. Les hêtres présentent des défoliations moyennes plus élevées en 2017 qu'en 2013 et 2015, la différence étant de 5%.

Afin d'étudier plus en détail cette évolution entre 2015 et 2017, nous avons comparé l'évolution de chacun des arbres. Les résultats sont présentés sous forme de graphes à bulles (Figure 20 et Figure 21), permettant visualiser les points qui se superposent (données catégorielles).

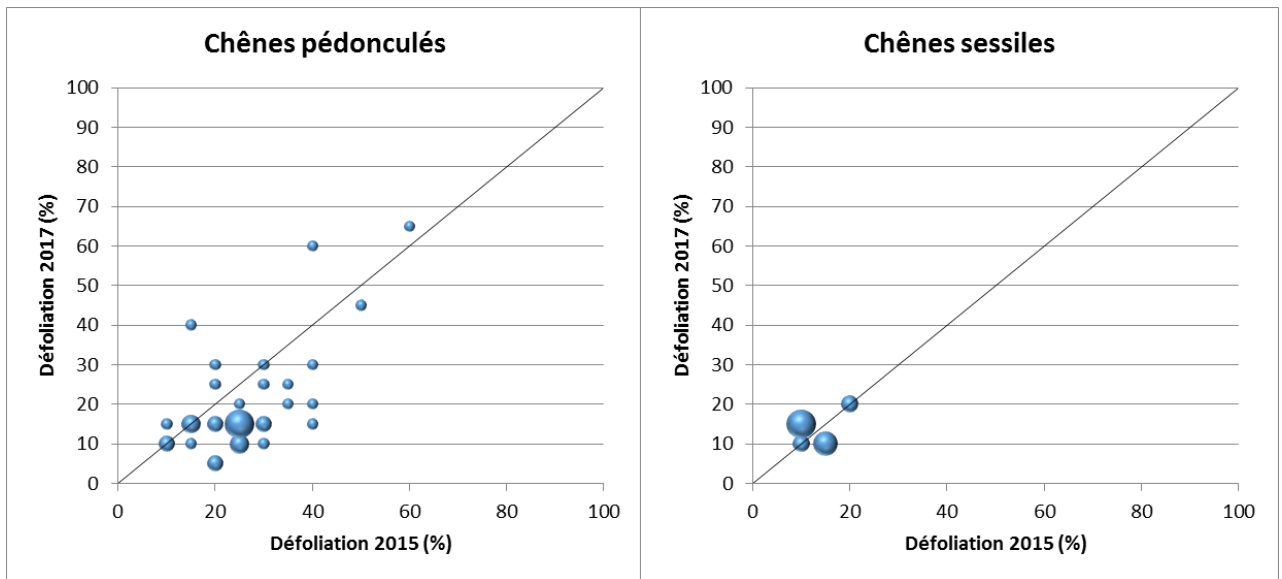


Figure 20 : Comparaison des classes de défoliation de 2015 et 2017 pour les 33 chênes observés durant toute cette période (la taille des bulles correspond au nombre de points ayant les mêmes coordonnées)

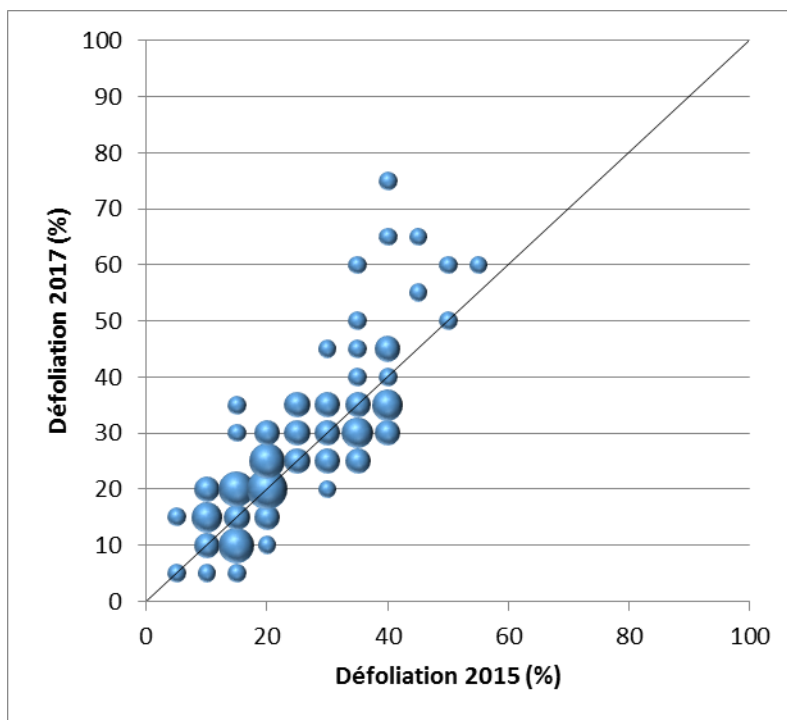


Figure 21 : Comparaison des classes de défoliation de 2015 et 2017 pour les 45 hêtres observés durant toute cette période (la taille des bulles correspond au nombre de points ayant les mêmes coordonnées)

Les chênes présentent une évolution « dispersée » : mais la majorité des arbres ont des valeurs plus faibles en 2017 qu'en 2015, ce qui se reflète dans l'évolution de la moyenne/

La plupart des hêtres présentent des défoliations très semblables pour les deux années, à l'exception de 4 arbres qui se sont fortement dégradés. L'augmentation de la moyenne entre ces deux années serait donc liée à la forte augmentation de la défoliation de 4 arbres. Or, nous observons que 2 de

ces 4 arbres ont été « contrôlés » cette année et présentaient justement des valeurs anormalement élevées par rapports aux observations de l'UCL. Par ailleurs, les 2 arbres « anormaux » restants font partie de l'échantillons du suivi photo. En comparant leurs photos de 2015 et 2017, nous observons une évolution très limitée. Dès lors, nous pouvons conclure que les 4 points sont effectivement aberrants (mauvaise cotation, erreur d'écriture ou mauvaise identification ?). En excluant les valeurs pour ces 4 arbres, nous n'observons plus de différence significatives entre les moyennes 2015-2017 ; l'augmentation pour certains arbres est compensée par la diminution pour d'autres.

5.1.4. Comparaison avec la situation en Wallonie

L'évolution de 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 22). 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 identiques, mais sans alternance bisannuelle.

Pour le hêtre, les moyennes sont environ 10% plus basses en forêt de Soignes par rapport à la Wallonie, mais l'évolution des courbes est remarquablement « parallèle ». Nous observons toutefois que les courbes se rapprochent légèrement en 2013 et en 2016. Il s'agit de deux années où la fructification a été nettement plus marquée en moyenne Belgique qu'en Ardenne. Les pics de défoliation liés à ces épisodes ont donc été plus importants en forêt de Soignes qu'en Wallonie, sachant que la majorité des placettes est située en Ardenne.

En ce qui concerne les chênes, nous ne disposons pas de valeur pour 2011 en forêt de Soignes, mais bien en 2010 (représentées par deux points sur le graphe). Nous observons que les valeurs de défoliations 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. 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.

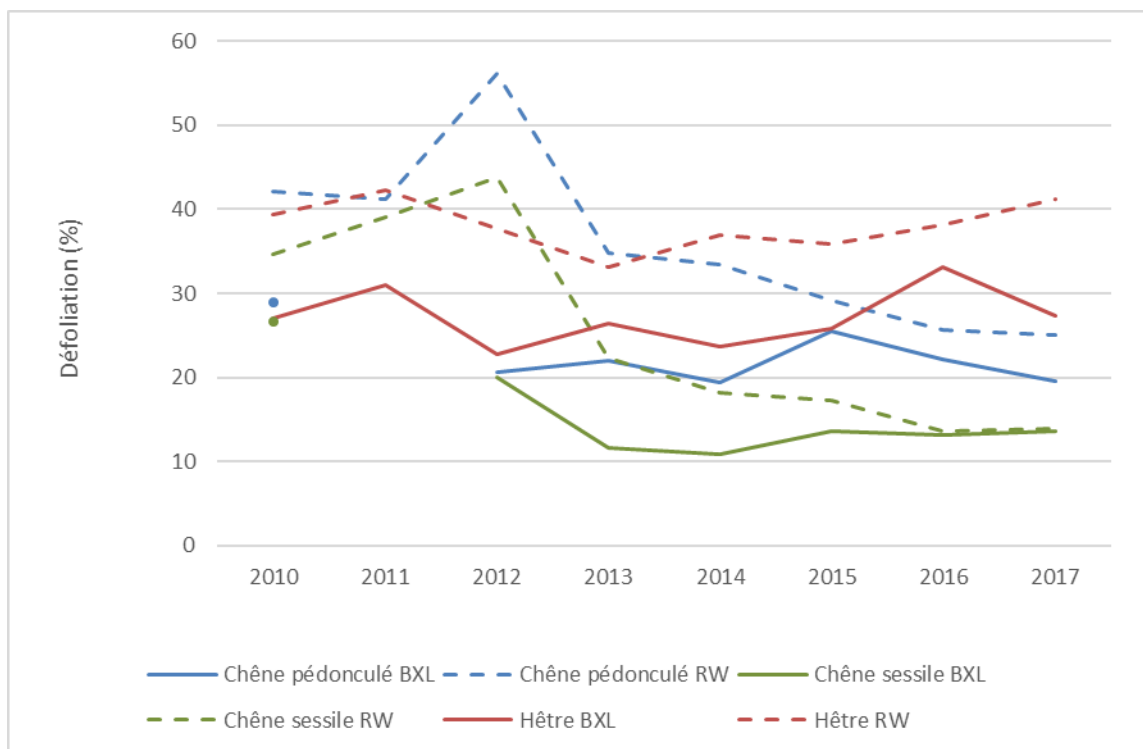


Figure 22 : Evolution comparée des défoliations moyennes en forêt de Soignes (BXL) et en Wallonie (RW) depuis 2010.

5.2. Fructification

L'abondance de la fructification des arbres considérée dans ce point se réfère à la fructification évaluée au sein du houppier observable et non à celle estimée pour l'ensemble du houppier. La fructification est contrôlée par de nombreux facteurs (photopériode, humidité, température, pollinisation, etc.). Par ailleurs une fructification abondante est fréquemment constatée l'année qui suit une sécheresse (Nageleisen *et al.*, 2010).

Après une fructification exceptionnelles des hêtres en 2016, le phénomène a été très limité en 2017 (Figure 23), ce qui est en accord avec le cycle bisannuelle caractéristique de cette essence.

Pour le chêne sessile, nous n'observons pas de fruits en 2017, après une année 2016 exceptionnelle. Chez les chênes pédonculés par contre, nous observons une fructification relativement abondante pour le chêne pédonculé en 2017, comparable à celle de l'année précédente. La proportion d'arbres présentant des fruits a légèrement diminué, mais la proportion d'arbres présentant une fructification abondante a nettement augmenté.

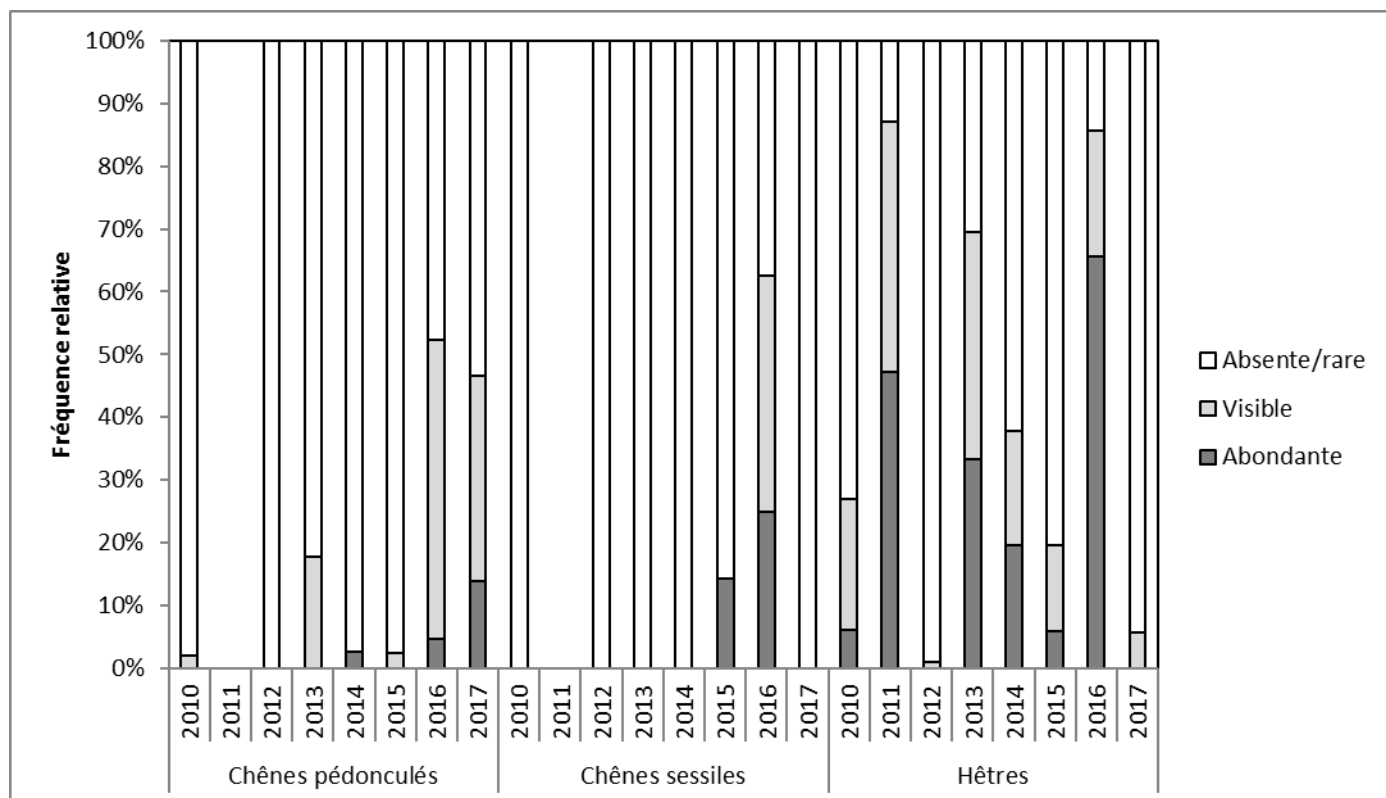


Figure 23 : Evolution du degré de fructification de 2010 à 2017 pour les chênes et les hêtres

5.3. 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 24) en fonction de la forme de la partie supérieure de la couronne et du développement de ces rameaux.

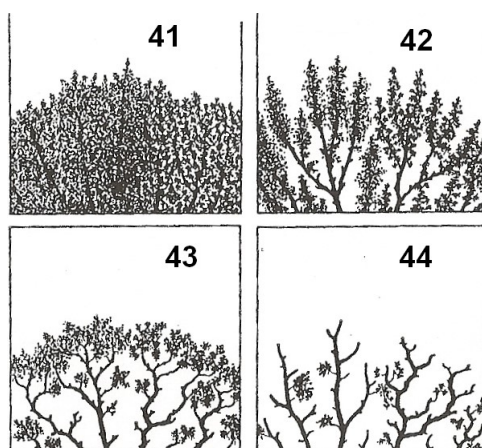


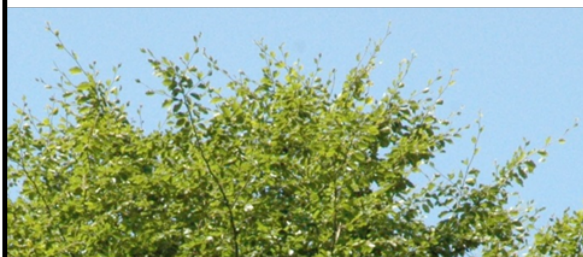
Figure 24 : Les quatre formes de houppier des chênes, avec leurs codes (Eichhorn et al., 2010)
41 : ramification dense ; 42 : simplification légère ; 43 : simplification importante ; 44 : déclin

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 25 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)

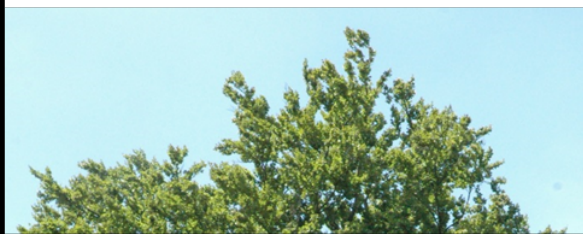
Forme 1 : les pousses apicales et les bourgeons latéraux forment de longs rameaux en éventails



Forme 2 : les rameaux latéraux se raccourcissent.



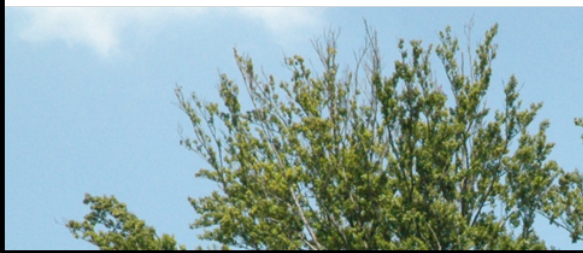
Forme 3 : seules les pousses apicales forment de longs rameaux, les rameaux latéraux sont chétifs. Formation de baguettes, dagues



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 »)

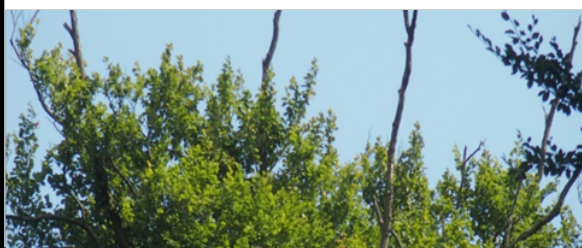


Figure 25: Fiche de terrain différenciant les 8 formes du houppier du hêtre

La structure de la couronne des chênes pédonculés s'est dégradée entre 2014 et 2015, mais on observe une amélioration de 2015 à 2017 (Figure 26). Les chênes sessiles présentent tous une bonne structure de la couronne depuis 2013.

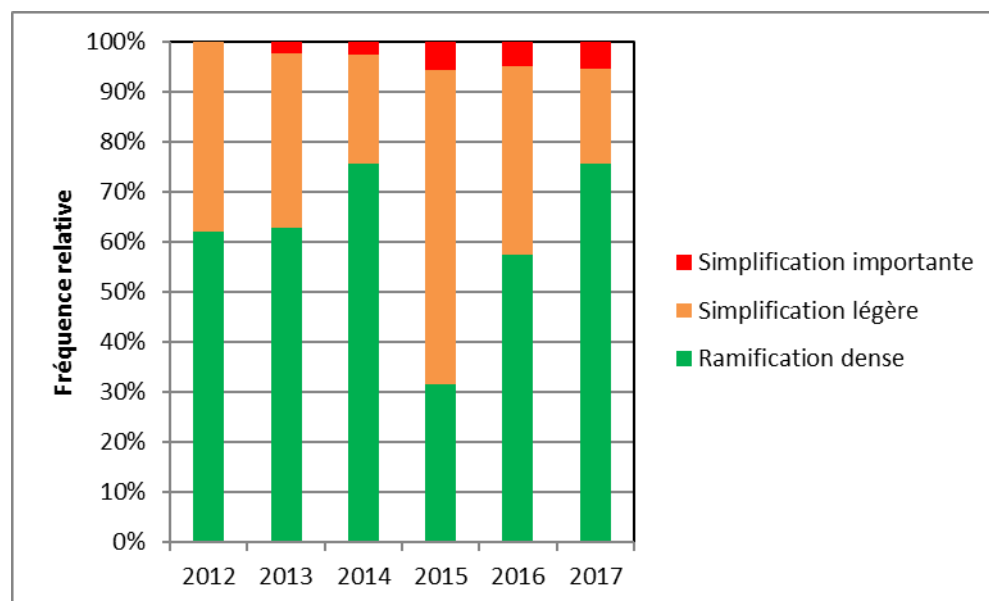


Figure 26 : Distribution des chênes pédonculés selon la structure de la couronne

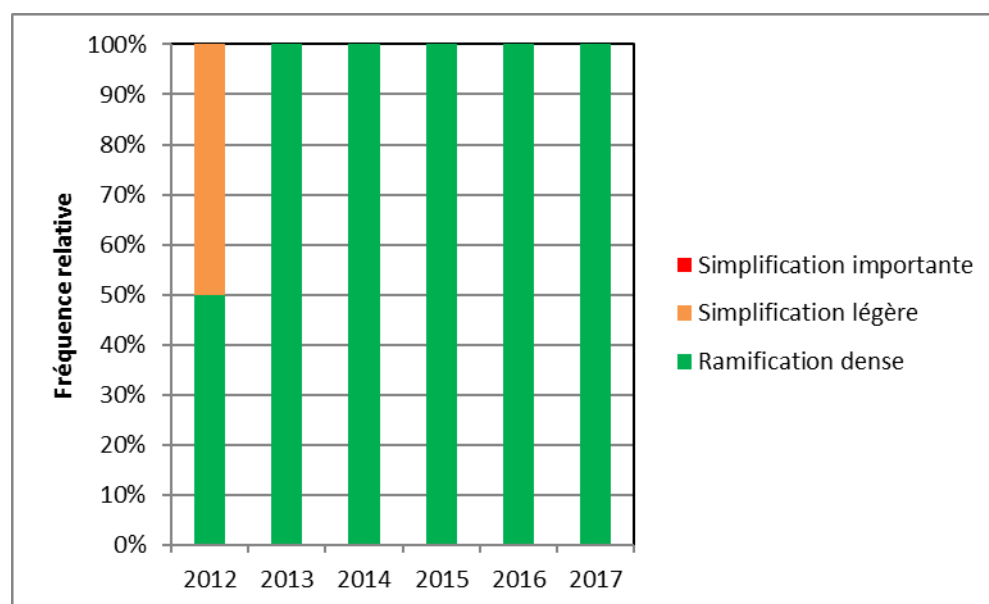


Figure 27 : Distribution des chênes sessiles selon la structure de la couronne

Suite à l'instauration de nouvelles classes pour le hêtre en 2013, les résultats antérieurs ne sont pas présentés. Il est également important de tenir compte du fait que les placettes visitées en 2017 ne sont pas les mêmes que celles visitées en 2014 et 2016. Si l'on compare 2017 à 2015 (Figure 28), nous observons une légère amélioration révélée par une augmentation de la fréquence de la classe 1 et une diminution globale des classes les plus dégradée (>4). Notons toutefois que la classe 7 est représentée en 2017 alors qu'elle ne l'était pas en 2015, mais ceci ne concerne que 2 arbres

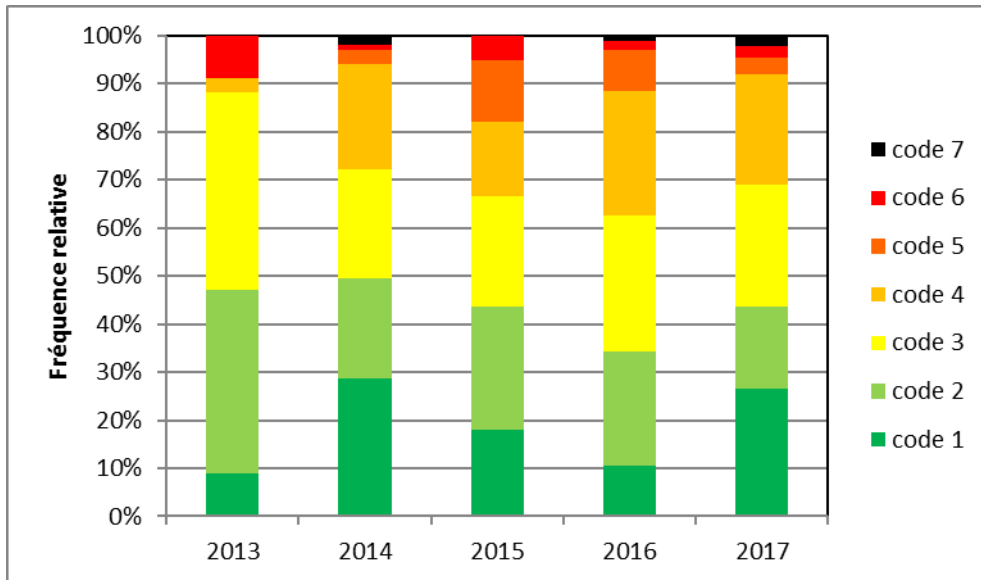


Figure 28 : Distribution des hêtres selon la structure de la couronne

5.4. 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 ceci de manière constante, puisque la proportion de chênes avec gourmands avoisine les 50% (Figure 29). Pour les chênes sessiles, l'abondance de pousses épïcormiques diminue globalement avec le temps, bien que l'on observe une augmentation entre 2016 et 2017. Pour les hêtres, les gourmands sont peu fréquents et en lente diminution.

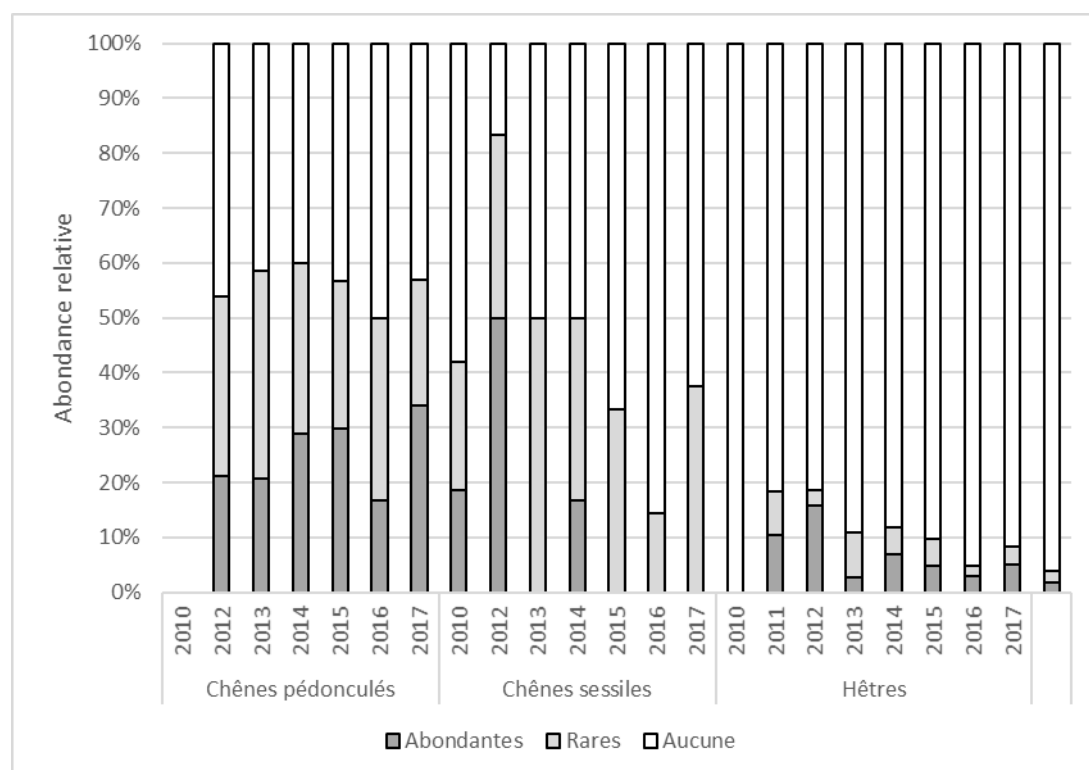


Figure 29 : Distribution des arbres selon l'abondance des pousses épïcormiques

5.5. 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 2017, près de 40 % des hêtres présentaient une décoloration faible et 1% une décoloration modérée. Ces chiffres sont très hauts, par rapport à l'ensemble des autres années. Une telle décoloration pourrait être liée aux conditions climatiques chaudes et sèches qui caractérisent la fin de l'été 2016 et le printemps 2017. Il pourrait s'agir des premiers signes d'une dégradation plus prononcée. Il convient donc de vérifier si les arbres fortement décolorés cette année ne présentent pas d'augmentation de la défoliation au cours des prochaines années.

Aucun chêne sessile ne présentait de décoloration et 10% des chênes pédonculés étaient affectés en 2017, ce qui est faible par rapport aux années 2012 et 2015 (Figure 30). De plus l'intensité du phénomène était limitée puisqu'aucun arbre ne présentait une décoloration sur plus de 25% des feuilles.

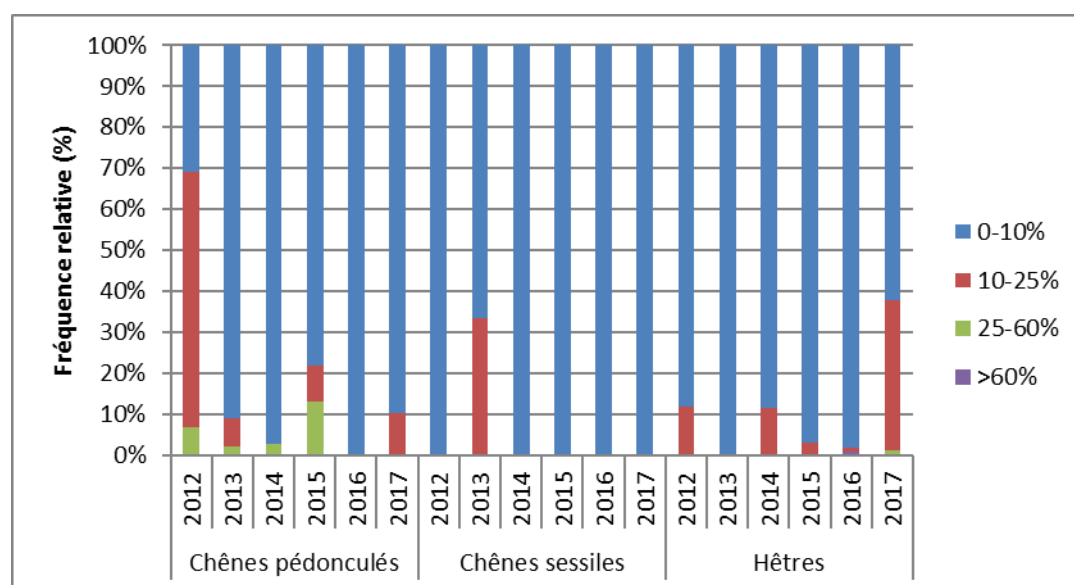


Figure 30: Distribution des arbres selon le pourcentage de décoloration du feuillage

5.6. Lien entre la défoliation et d'autres variables

5.6.1. Analyses statistiques

Dans le but de mettre en évidence certains facteurs explicatifs de la défoliation, les relations entre la défoliation et divers critères ont été analysées statistiquement. Afin d'améliorer la confiance dans l'interprétation des résultats, les relations entre variables sont testées depuis 2009. Différents tests statistiques ont été réalisés en fonction du caractère continu ou catégoriel de la distribution des variables.

Le **coefficient de corrélation** est bien adapté aux données quantitatives continues. Sa valeur est comprise entre -1 et 1, et il mesure le niveau de relation linéaire entre deux variables. Les p-valeurs calculées pour les coefficients de corrélation permettent de tester l'hypothèse nulle de corrélation non significativement différente de zéro entre les variables.

L'**ANOVA** a pour objectif de tester l'hypothèse nulle d'égalité des moyennes entre les distributions. Si les moyennes sont significativement différentes et les effectifs suffisants, un test de comparaison multiple est appliqué : le **test de Tukey** (HSD : Honestly Significant Difference). Le but est de vérifier si les paramètres correspondant aux différentes modalités d'un facteur sont significativement différents ou non.

Le principe de la **régression linéaire** est de modéliser une variable dépendante quantitative Y, au travers d'une combinaison linéaire de p variables explicatives quantitatives, X1, X2, ..., Xp. Le coefficient R², exprimé en %, indique dans quelle mesure les variables X permettent d'expliquer la variabilité des valeurs de Y. Les hypothèses de la régression linéaire sont les suivantes : l'espérance des résidus est nulle, la variance est constante, les erreurs suivent une même loi normale et sont indépendantes.

5.6.2. Défoliation et circonférence

Le Tableau 7 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. Par contre, cette relation n'est pas vérifiée pour les chênes quelle que soit la campagne.

Tableau 7 : 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)

Les régressions linéaires illustrant la relation entre la défoliation et la circonférence ont dès lors été réalisées pour les hêtres uniquement (Tableau 8).

Tableau 8: Résultats des régressions linéaires entre la circonférence (y ; cm) et la défoliation (x) par année

Année	Essence	n	équation	R ²	P valeur> t
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		$Y =0.099x+9.72$	0.173	<0.0001*

La Figure 31 illustre la distribution des valeurs de défoliation des hêtres en 2017 en fonction de la circonférence à 1m50. Le coefficient de pente est de 0,1. En d'autres termes, sur base des données de 2017, la défoliation augmenterait de 10% lorsque la circonférence d'un hêtre augmente de 100 cm.

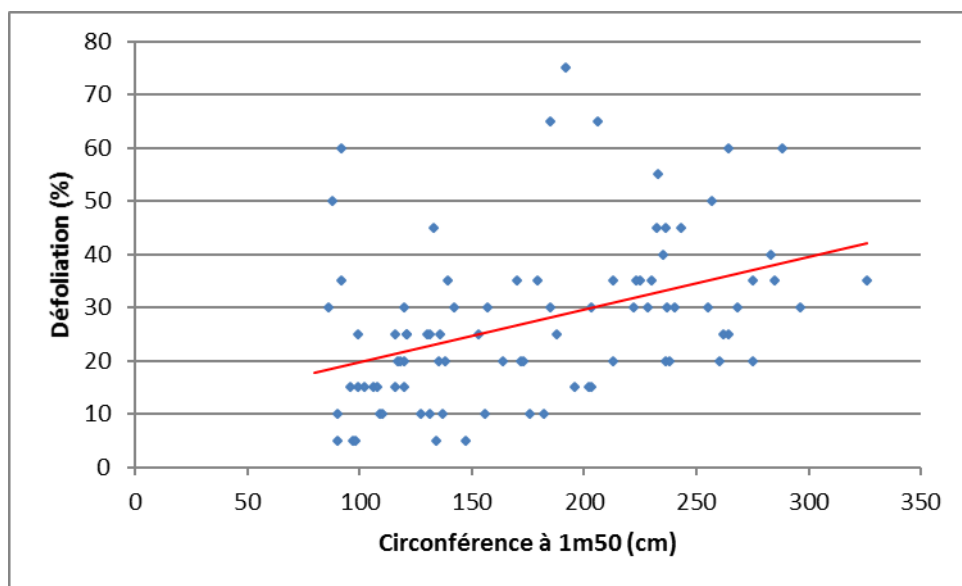


Figure 31 : Régression linéaire de la défoliation des hêtres en fonction de la circonférence en cm (C150) en 2017

5.6.3. 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 32 indique que pour les hêtres et les chênes pédonculés, 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). Toutefois, il pourrait aussi s'agir d'un artefact lié à l'observation : il est beaucoup plus aisé de détecter des problèmes de structure ou de déficit foliaire sur des arbres en croissance libre ou peu concurrencés.

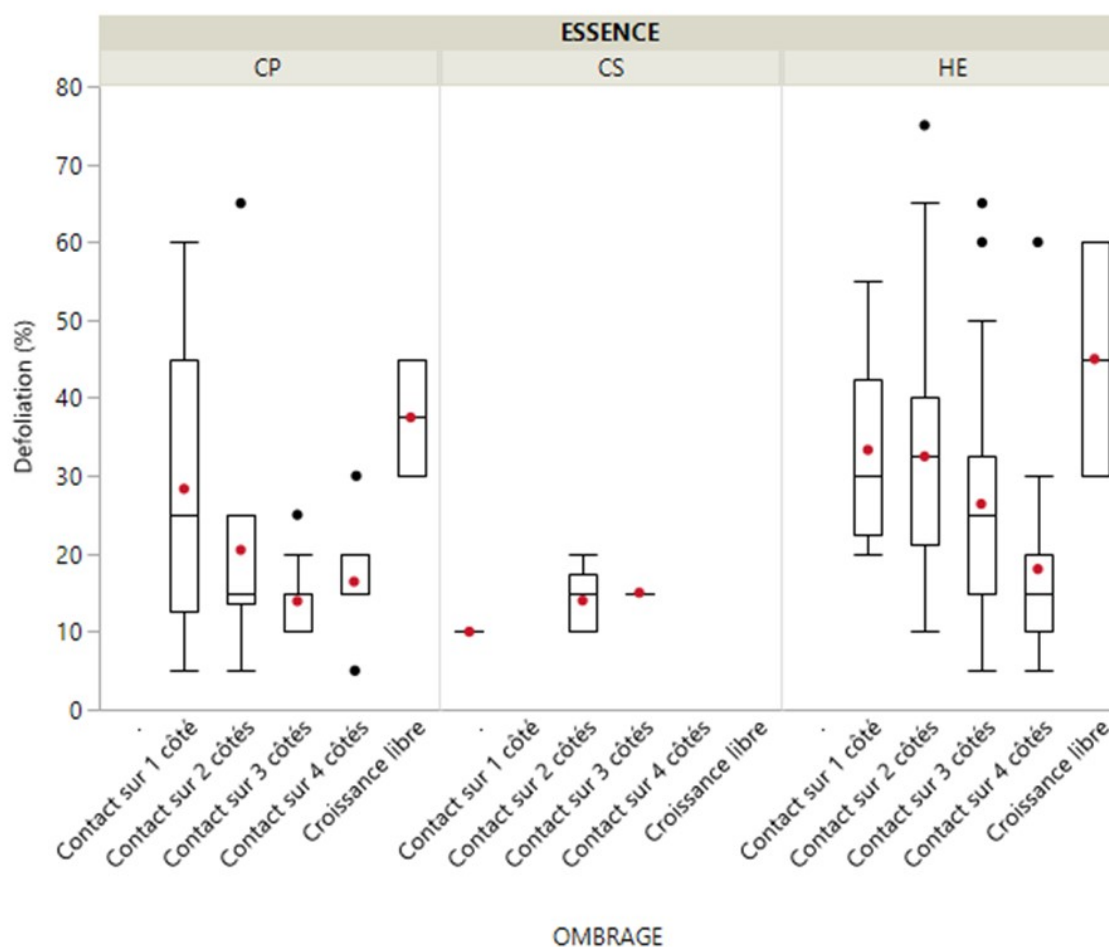


Figure 32: Défoliation des chênes indigènes et des hêtres selon l'indice d'ombrage en 2017

5.6.4. Défoliation et décoloration

Pour les chênes pédonculés, les arbres présentant une légère décoloration sont moins défoliés que les individus aux feuilles saines (Figure 33). Toutefois, seuls 4 arbres sont décolorés, ce qui ne permet pas d'interpréter cette observation.

Pour les hêtres, nous n'observons aucune différence de défoliation entre les individus non décolorés et les individus faiblement décolorés. Il n'y a donc pas de lien direct entre les deux paramètres. Toutefois, il pourrait y avoir un lien à plus long terme : la décoloration pourrait être un signe précoce de dégradation sanitaire. Il serait donc très intéressant de suivre l'évolution de ces arbres au cours des prochaines années.

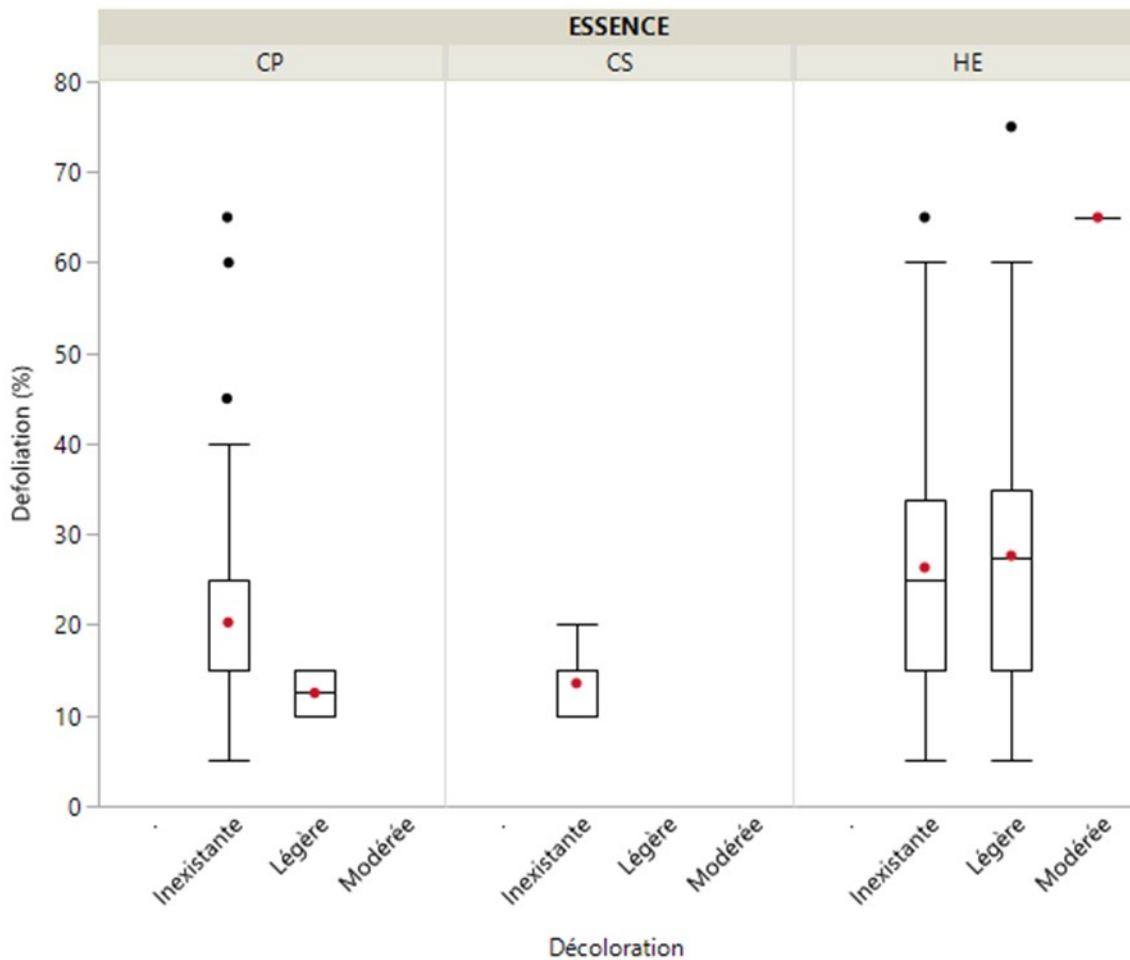


Figure 33: Défoliation des chênes indigènes et des hêtres selon l'intensité de la décoloration en 2017

5.6.5. Défoliation et fructification

Pour le hêtre, nous n'observons pas d'influence de la fructification sur la défoliation, contrairement à 2016. Le nombre d'individus présentant une fructification est toutefois très limité et il n'est pas exclu qu'il s'agisse de fruits résiduels de 2016 (marcescents).

Pour le chêne pédonculé, la défoliation est plus élevée faible pour les arbres présentant la fructification la plus intense alors que l'inverse était observé en 2016. Cette apparente contradiction est rendue possible par le fait qu'aucun arbre n'a fructifié abondamment 2 années de suite et suggère que la fructification n'a pas d'impact univoque sur la défoliation pour cette essence.

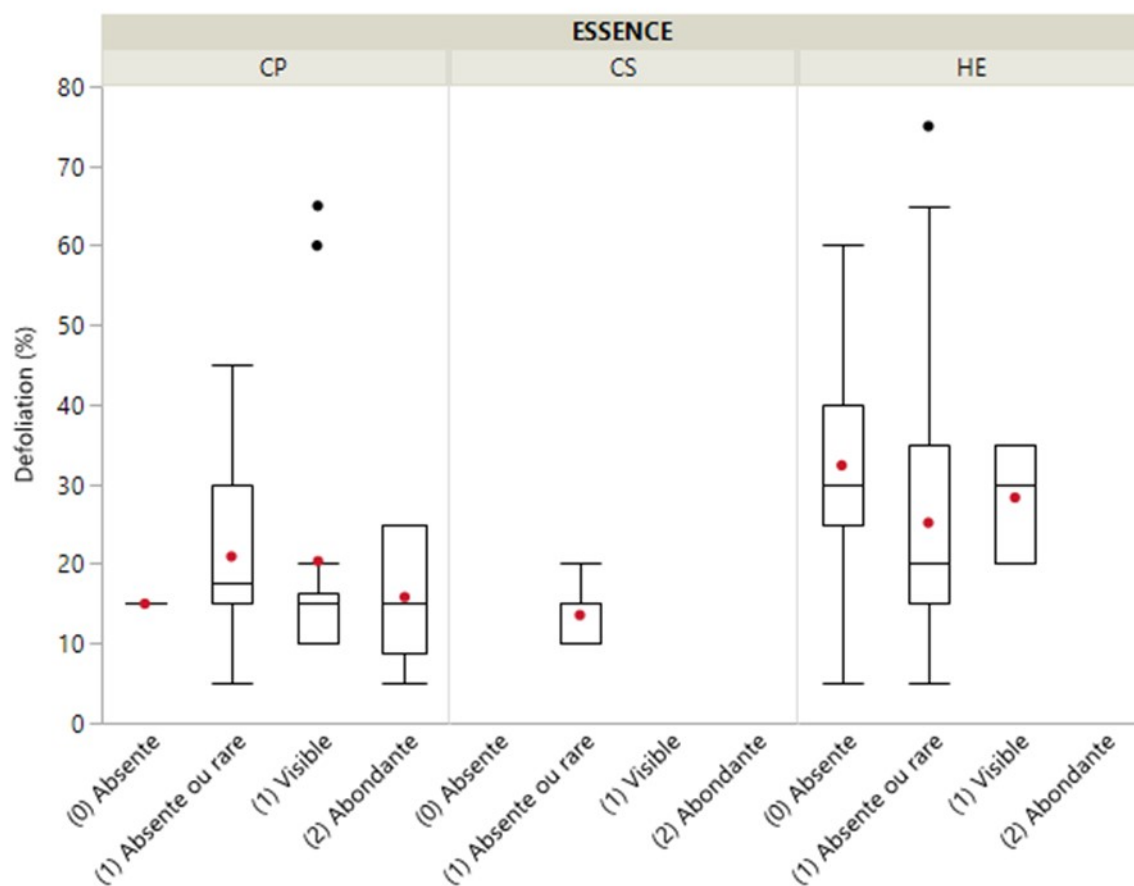


Figure 34: Distribution de la défoliation des chênes et des hêtres selon l'abondance de la fructification en 2017

5.6.6. 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 35). 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 seule classe de structure est représentée, empêchant l'analyse de cette relation. Notons toutefois que cette classe correspond à une bonne structure, ce qui est en accord avec les faibles valeurs de défoliation notées pour cette essence.

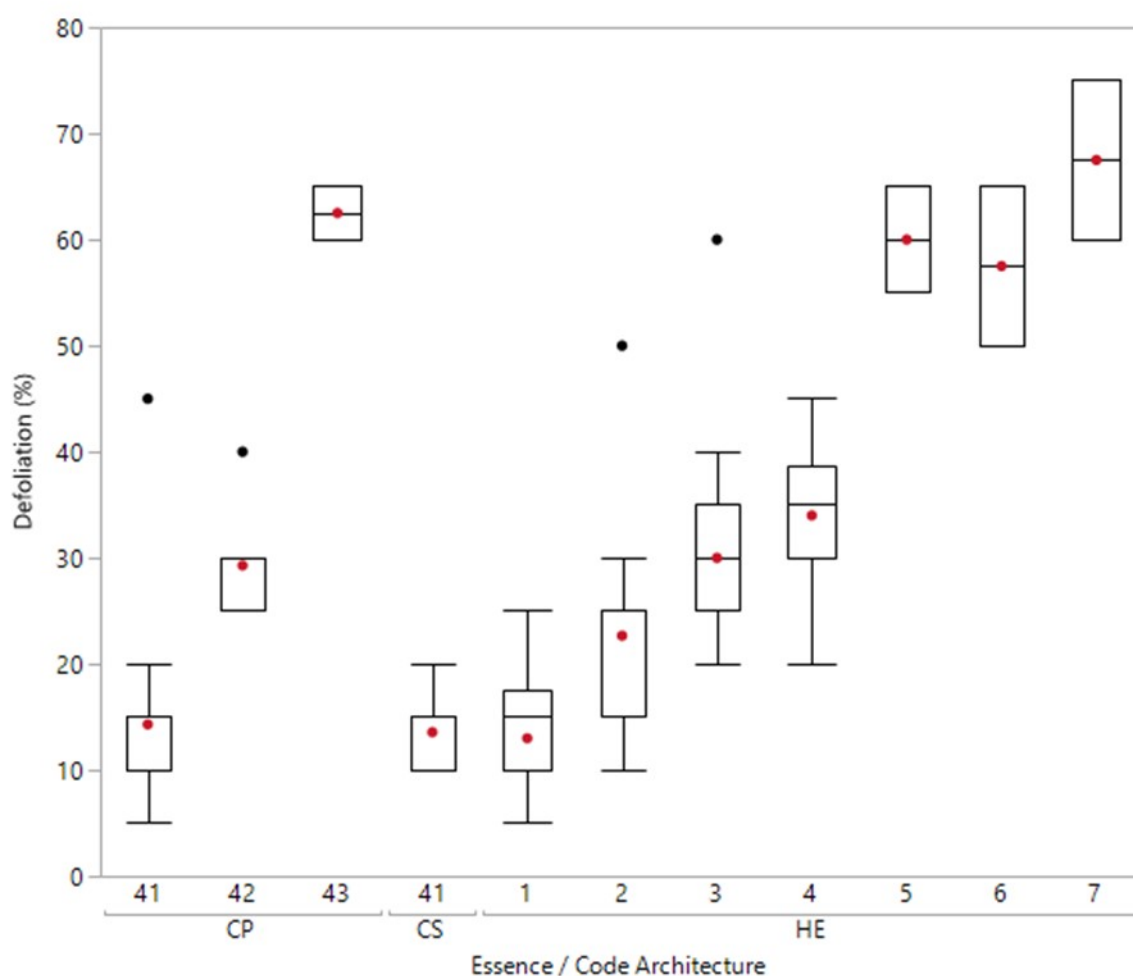


Figure 35: Distribution de la défoliation des hêtres selon la forme du houppier en 2017 (la signification des codes est indiquée aux Figure 24 et Figure 25)

5.7. Dommages

5.7.1. Distribution des dommages

Les dommages sont recherchés pour chacun des arbres observés. Les différentes parties de l'arbre (feuilles, branches et tronc) sont diagnostiquées et une cote d'extension est attribuée pour chacun des symptômes. Cette cote reflète le pourcentage de l'organe considéré qui est endommagé. Le Tableau 9 reprend l'ensemble des dommages observés en 2017, le nombre d'arbres touchés et la proportion d'arbres affectés. Le pourcentage d'arbres atteints est calculé par rapport à l'échantillon d'arbres pris en compte pour les analyses statistiques de l'état sanitaire (87 hêtres).

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

Pour les chênes, le seul type de dommage constaté est la mortalité de branches fines, qui concerne à peine 2% des chênes pédonculés et aucun chêne sessile.

Pour le hêtre, le principal dommage observé est la décoloration des feuilles. La mortalité de branches a été notée sur 3% des arbres pour les ramilles et 3% pour les branches moyennes. Cette proportion est en très forte diminution par rapport à 2016, lorsque les ramilles mortes concernaient 38% des arbres.

Tableau 9: Symptômes et dommages observés sur les hêtres et proportion des arbres affectés

	He		87
Étiquettes de lignes	Nombre de ID_arbre		
Entre collet et houppier			
Déformation	2		2
Feuilles (y compris semper.)			
Vert clair à jaune	19		22
Branches de $2 \geq \varnothing < 10$ cm			
Vert clair à jaune	1		1
Morte ou mourante	3		3
Tronc entier			
Déformation	3		3
Manifestations d'arthropodes	2		2
Branches de diamètre variable			
Morte ou mourante	1	1	
Branches fines ($\varnothing < 2$ cm)			
Morte ou mourante	3	3	

7. Suivi photographique des houppiers à partir du sol

Après trois années de suivi, nous sommes en mesure de comparer les hêtres avant et après l'épisode de fructification de 2016.

L'observation des images confirme la tendance notée à la Figure 21: situation globalement stable, mais certains arbres se sont dégradés (Figure 36), tandis que d'autres ont vu leur état s'améliorer (Figure 37). L'évolution différenciée de chaque arbre est donc clairement visible sur les photos, ce qui devrait rendre possible le développement d'une méthode de traitement automatisé des images.

En outre, le suivi photo a permis de confirmer que les valeurs de défoliation étaient erronées pour 2 arbres dont l'évolution se démarquaient fortement des autres. Toutefois, le fait que ces arbres soient dans l'échantillon « photo » est une coïncidence ; on ne peut espérer pouvoir vérifier par ce moyen tous les points « anormaux » à l'avenir.

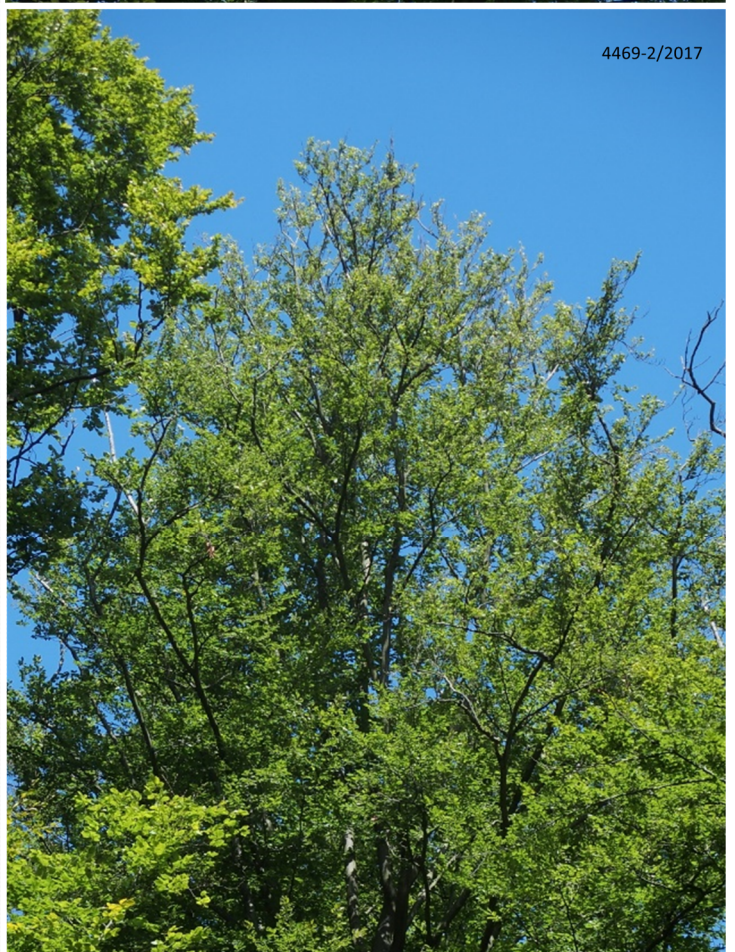
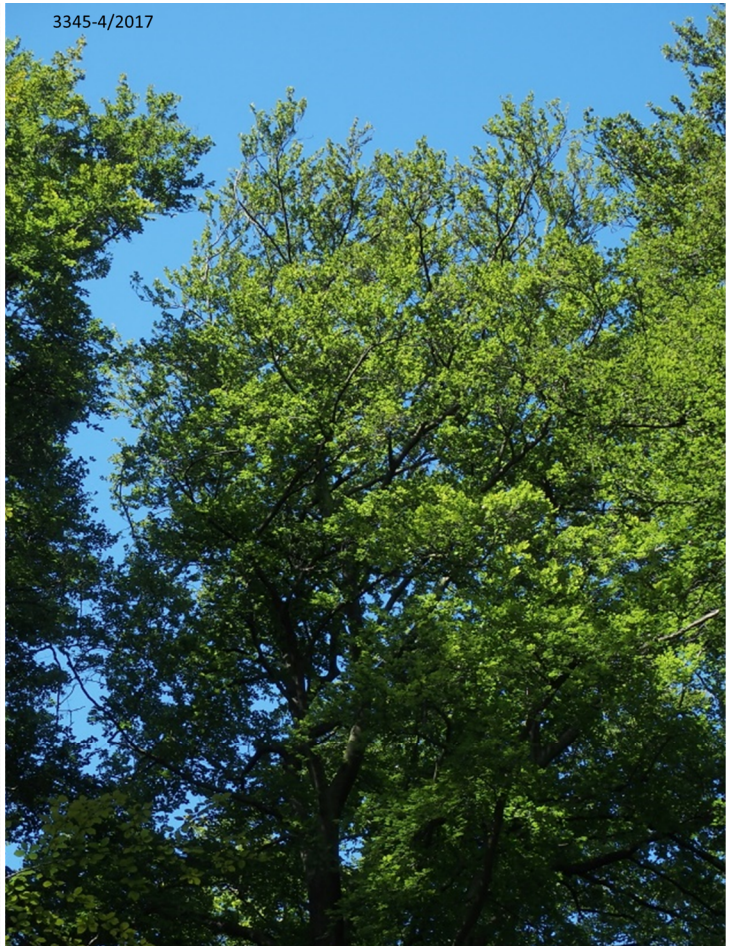


Figure 36 : Dégradation des houppiers des arbres 3345-4 et 4469-2 entre 2015 et 2017



Figure 37 : Amélioration de l'état des houppiers des arbres 2871-1 et 4469-4 entre 2015 et 2017

8. Conclusion générales et perspectives

L'année 2016 avait été marquée par une fructification très abondante des hêtres, probablement responsable d'une augmentation de la défoliation de l'ordre de 10%. En 2017, la fructification a été très limitée et les moyennes de défoliations étaient identiques à celle de 2015 (27%). Ceci démontre que la dégradation des hêtres observée en 2016 était bien liée à la fructification et complètement réversible.

Contrairement à ce que l'on pouvait craindre, les périodes de chaleur et sécheresse en fin d'été 2016 et au printemps 2017 n'ont pas entraîné d'augmentation de la défoliation des arbres. Par contre, ces conditions climatiques pourraient expliquer la décoloration relativement marquée des hêtres cette année. Aucun lien direct n'a été observé entre la décoloration et la défoliation, mais il est important de suivre l'évolution de la situation car il pourrait s'agir d'une première étape dans le processus de dégradation. Il est possible que la défoliation des arbres les plus décolorés augmente au cours des prochaines années.

Pour le chêne pédonculé, les valeurs moyennes de défoliation sont en diminution depuis 2015. Cette évolution s'accompagne d'une amélioration de la structure des branches sommitales. Pour la deuxième année consécutive, nous observons une fructification relativement abondante pour cette essence, bien que les individus présentant les plus fortes fructifications diffèrent d'une année à l'autre. Contrairement au hêtre, cette fructification ne semble pas influencer la densité foliaire.

Pour le chêne sessile, les valeurs de défoliation sont basses (14%) et stables. Aucune fructification n'a été observée cette année.

Le protocole de suivi photographique a été poursuivi cette année, en été ainsi qu'en hiver. Les comparaisons 2015-2017 confirment que certains arbres présentent des dégradations marquées tandis que d'autres voient leur situation s'améliorer. Le fait que ces évolutions soient bien visibles sur les photos signifie qu'une automatisation du traitement des images est envisageable.

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	HE	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