

Université catholique
de Louvain



Bruxelles-Environnement
BE-IBGE



Earth and Life Institute
Environmental
Sciences



Suivi de l'état sanitaire en forêt de Soignes bruxelloise 2016

Réalisation
Technicien
Promoteur

Hugues Titeux
Frédéric Hardy
Quentin Ponette

Janvier 2017

Convention UCL – Bruxelles Environnement 2016

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 2016, 15 placettes en hêtraie visitées les années paires et 6 placettes en chênaie ont été observées par les adjoints forestiers de BE-IBGE. Un échantillon de 129 arbres (48 chênes indigènes et 96 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.

Les observations de l'été 2016 ont mis en évidence une forte augmentation des valeurs de défoliation moyenne des hêtres depuis 2014 (+10%). La valeur atteinte en 2016 est de 33% et plus de 68% des êtres présentent une défoliation supérieure à 25%. Cette augmentation est liée à une diminution de la densité du feuillage, tandis que la structure du houppier s'est légèrement détériorée. En outre, les photographies ont montré que la croissance des rameaux a été pratiquement nulle cette année. Ces observations sont très certainement liées à la très forte fructification des hêtres cette année, qui pourrait avoir été favorisée par la sécheresse printanière de 2015.

Pour les chênes, la fructification a également été abondante, mais moins que pour les hêtres. Aucun dégât lié aux insectes n'a été observé. Les valeurs de défoliations pour le chêne pédonculé (22%) sont inférieures à celle de de 2015, mais semblables à celles de la période 2012-2014. Pour le chêne sessile, ces valeurs sont stables et basses (13%).

Le protocole du suivi photographique a été finalisé cette année. Les comparaisons des photos de 2 années successives permettent de confirmer les observations visuelles et d'apporter des informations supplémentaires concernant la croissance des ramilles et l'évolution de l'architecture.

Date de fin : Janvier 2017.

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 2016	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.....	29
5.1. Défoliation	29
5.1.2. Défoliation moyenne des arbres de la campagne 2016	30
5.1.3. Evolution de la défoliation moyenne de 2009 à 2016	33
5.1.4. Evolution de la défoliation d'un même échantillon d'arbres	35
5.2. Fructification.....	38
5.3. Structure de la couronne.....	39
5.4. Pousses épïcormiques	42
5.5. Décoloration des feuilles	43
5.6. Lien entre la défoliation et d'autres variables.....	44
5.6.1. Analyses statistiques.....	44
5.6.2. Défoliation et circonférence	44
5.6.3. Défoliation et concurrence	47
5.6.4. Défoliation et décoloration	50
5.6.5. Défoliation et fructification.....	50
5.6.6. Défoliation et structure du houppier	53
5.7. Dommages.....	56
5.7.1. Distribution des dommages	56
6. Proposition d'adaptations méthodologiques	57
7. Suivi photographique des houppiers à partir du sol	60
7.1. Sélection des arbres	60
7.2. Résultats.....	62
7.5. Perspectives	65
8. Conclusion générales et perspectives	66
Annexe 1 : Effectifs cotés et défoliations moyennes par essence et par placette	67

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 2016 selon les classes de circonférence	22
Figure 7 : Distribution des arbres selon le degré de concurrence pour l'échantillon analysé en 2016	23
Figure 8: Proportion des statuts sociaux en fonction des essences pour l'échantillon analysé en 2016	24
Figure 9: Distribution des arbres en fonction de la visibilité et de l'essence pour l'échantillon analysé en 2016.....	25
Figure 10 : Distribution des arbres selon la visibilité pour l'ensemble des arbres non dominés observés en 2016.	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).....	29
Figure 13 : Défoliation des chênes et des hêtres en 2016 ; les moyennes sont représentées par un point rouge et les valeurs extrêmes par un point gris	30
Figure 14 : Défoliation des chênes et des hêtres pour chaque 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).....	31
Figure 15 : Distribution des valeurs de défoliation selon la classe de visibilité (1 : bien visible → 4 : visible uniquement par le dessous).....	32
Figure 16 : Evolution de la défoliation des hêtres et des chênes de 2009 à 2015.....	33
Figure 17: Evolution de la défoliation des 33 chênes observés durant les 5 campagnes de 2012 à 2016 (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 18: Evolution de la défoliation des 45 hêtres observés en 2012, 2014 et 2016 (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 19 : Comparaison des classes de défoliation de 2015 et 2016 pour les 33 chênes observés durant toute cette période (la taille des bulles correspond au nombre de points ayant les mêmes coordonnées)	37
Figure 20 : Comparaison des classes de défoliation de 2014 et 2016 pour les 45 hêtres observés durant toute cette période (la taille des bulles correspond au nombre de points ayant les mêmes coordonnées)	37
Figure 21 : Evolution du degré de fructification de 2010 à 2016 pour les chênes et les hêtres.....	38
Figure 22 : 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.....	39
Figure 23: Fiche de terrain différenciant les 8 formes du houppier du hêtre.....	40
Figure 24 : Distribution des chênes pédonculés selon la structure de la couronne	41
Figure 25 : Distribution des chênes sessiles selon la structure de la couronne.....	41
Figure 26 : Distribution des hêtres selon la structure de la couronne.....	42
Figure 27 : Distribution des arbres selon l'abondance des pousses épïcormiques	42

Figure 28: Distribution des arbres selon le pourcentage de décoloration du feuillage.....	43
Figure 29 : Régression linéaire de la défoliation des hêtres en fonction de la circonférence en cm (C150) en 2015	46
Figure 30: Défoliation des chênes indigènes et des hêtres selon l'indice d'ombrage en 2016 (les petites lettres indiquent le résultats de la comparaison des moyennes, réalisée séparément pour chaque essence; deux modalités sont caractérisées par des moyennes significativement différentes si elle ne présentent aucune lettre identique)	49
Figure 31: Distribution de la défoliation des chênes et des hêtres selon l'abondance de la fructification en 2016	52
Figure 32: Distribution de la défoliation des hêtres selon la forme du houppier	55
Figure 33 : Dendrogramme de Ward représentant l'apparement des placettes en considérant la défoliation, la concurrence, la circonférence et l'architecture ; les placette entourées de rouges seraient abandonnées.....	58
Figure 34 : Distribution des valeurs de défoliation moyennes pour les placettes qui seraient abandonnées et les placettes maintenues.....	59
Figure 35 : Photographies de la couronne de l'arbre 5 de la placette 2877 en 2015 et en 2016.....	62
Figure 36 : Photographies de la couronne de l'arbre 2 de la placette 3349 en 2015 et en 2016.....	63
Figure 37 : Photographies de la couronne de l'arbre 4 de la placette 4309 en 2015 et en 2016.....	63
Figure 38 : Comparaison des photographies estivales de la cime de l'arbre 2 de la placette 3349 en 2015 et 2016, indiquant la mort de certaines branches durant cette période.....	64
Figure 39 : Comparaison des photographies hivernales de la cime de l'arbre 4 de la placette 3031 en 2015 et 2016, montrant la perte de certaines branches durant cette période.....	64

Table des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques et exemples de facteurs de dépérissement.	10
Tableau 2 : Valeurs climatiques mesurées en avril, mai, juin, juillet et août 2016 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 : Effectifs des arbres observés et résultats analysés durant la campagne 2016.	21
Tableau 6 : Moyenne des écarts de défoliation par essence observée en 2016 et résultats des tests t de Student	27
Tableau 7: Valeurs moyenne de défoliation par année et essence	34
Tableau 8 : Corrélations entre la circonférence et la défoliation en fonction de l'essence et de l'année	45
Tableau 9: Résultats des régressions linéaires entre la circonférence (y ; cm) et la défoliation (x) par année.....	45
Tableau 10: Résultats des ANOVA testant l'impact de l'indice d'ombrage sur la défoliation	48
Tableau 11: Résultats des ANOVA testant l'impact de la fructification sur la défoliation.....	51
Tableau 12: Résultats des ANOVA testant l'effet de la forme du houppier sur le pourcentage de défoliation	54
Tableau 13: Symptômes et dommages observés et proportion des arbres affectés	56
Tableau 14 : Arbres sélectionnés pour le suivi photographique.....	60

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.

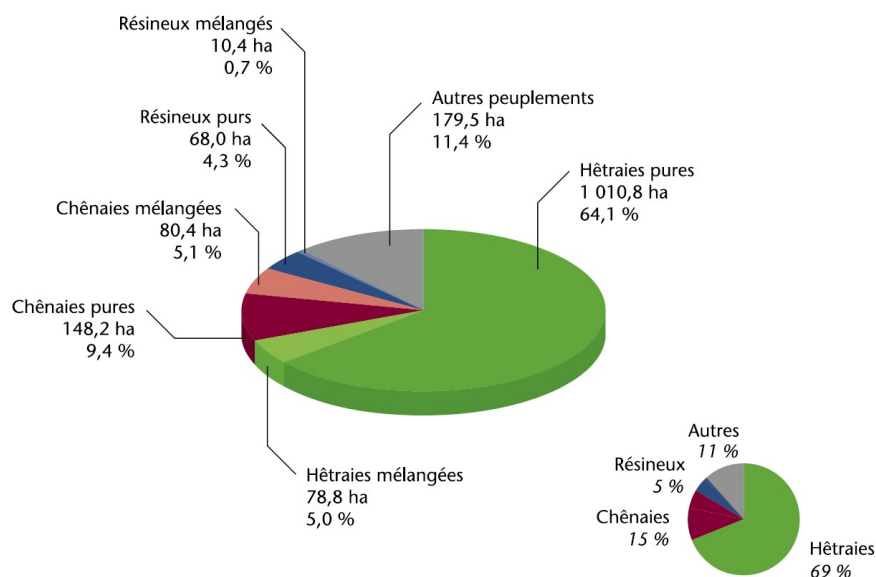


Figure 1: Proportion des types de peuplements en forêt de Soignes bruxelloise (Braem *et al.*, 2010)

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

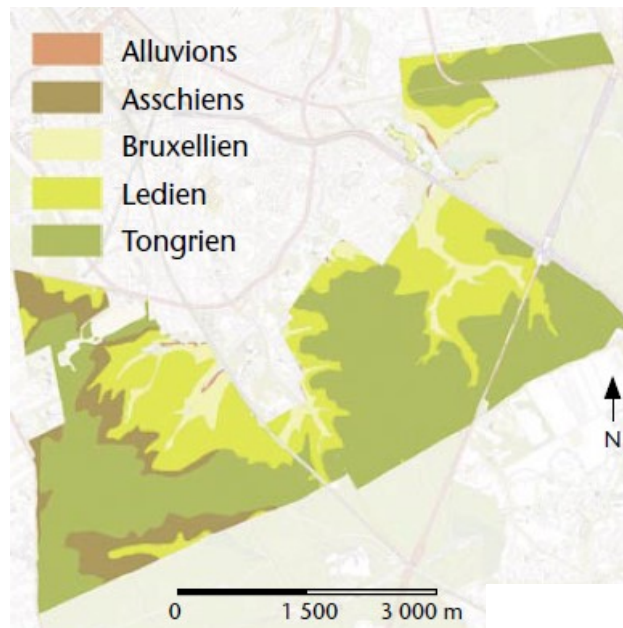


Figure 2: Roche-mère géologique présente sous le limon éolien. Les teintes jaunes présentent les assises à dominance sableuse (source: carte géologique de la Belgique, numérisation: BE-IBGE)

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.

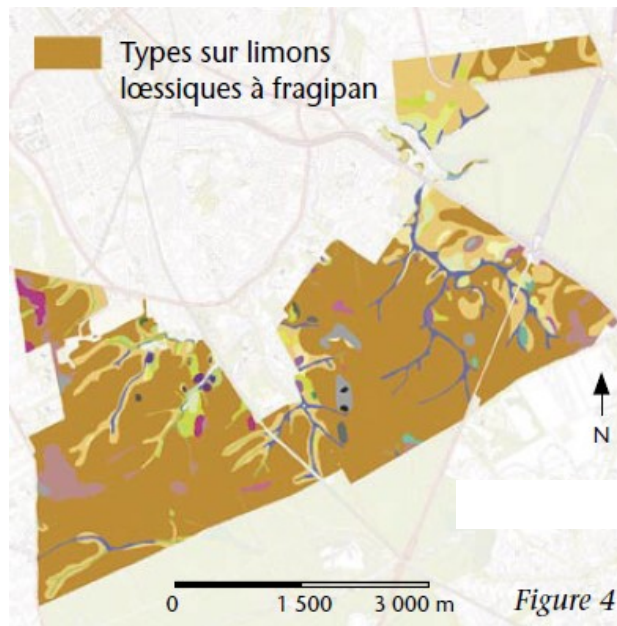


Figure 3 : Les sols de la Forêt de Soignes sont dominés par le type Abc interprété comme étant un sol limoneux à fragipan (source: cartes des sols de Belgique; numérisation BE-IBGE)

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

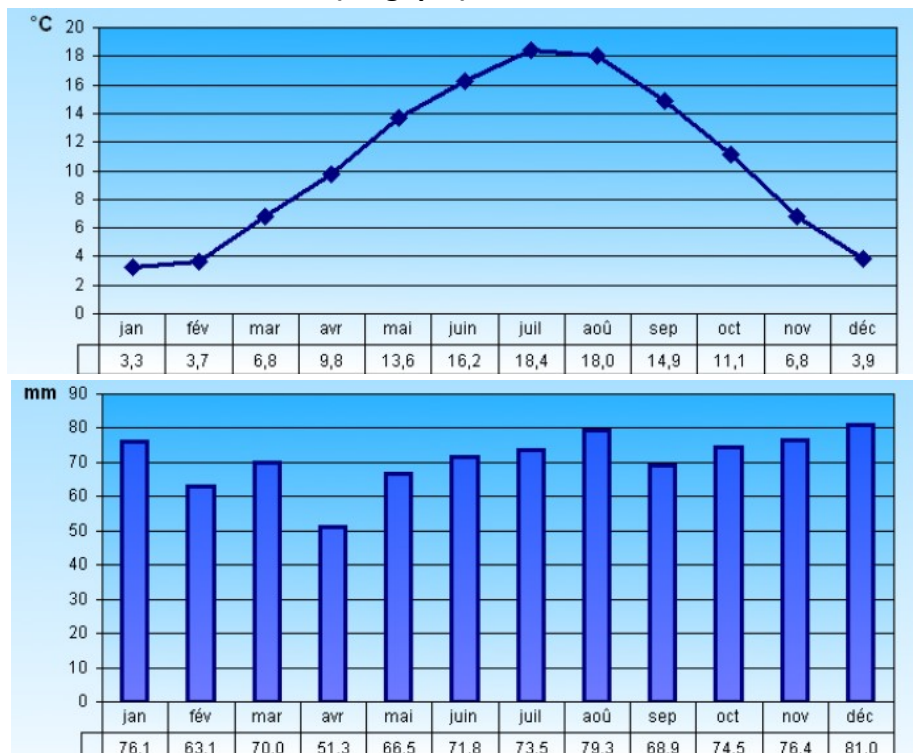


Figure 4 : Température et précipitations mensuelles mesurées à la station météorologique d'Uccle, 1981-2010 (IRM, 2011).

Avril – mai – juil: valeurs normales de la température moyenne, du total des précipitations, de la vitesse moyenne du vent et de la durée d'insolation.

Juin : valeur exceptionnellement élevée du total des précipitations, une valeur très anormalement faible de la vitesse moyenne du vent, une valeur anormalement faible de la durée d'insolation et une valeur normale de la température moyenne.

Sept : valeurs très anormalement élevées de la température moyenne et de la durée d'insolation, une valeur très anormalement faible du total des précipitations et une valeur anormalement faible de la vitesse moyenne du vent.

Les valeurs météorologiques mesurées à Uccle durant la période de végétation de 2016 sont présentées au Tableau 2. Par rapport aux normales mensuelles observées de 1981 à 2010, les températures sont très anormalement élevées en septembre et normales durant les autres mois. Les précipitations sont exceptionnellement élevées en juin, anormalement faibles en septembre et normales au cours des autres mois. Rappelons que l'année 2015 était caractérisée par un printemps très sec, qui pourrait avoir un impact sur la végétation cette année.

Tableau 2 : Valeurs climatiques mesurées en avril, mai, juin, juillet et août 2016 comparées aux normales mensuelles calculées sur la période 1981-2010 (IRM, Uccle)

	P (mm)	P normale (mm)	T moy (°C)	T normale (°C)
Avril 2016	65.6	51,3	8.5	9,8
Mai 2016	78.3	66,5	14.2	13,6
Juin 2016	174.6	71,8	16	16,2
Juillet 2016	55.1	73,5	18.3	18,4
Août 2016	54.1	79,3	18.1	18
Sept. 2016	18.3	68.9	17.5	14.9

4. Mise en place de la campagne du suivi sanitaire de 2016

Les activités suivantes ont été réalisées en 2016 :

- (i) Le suivi de l'état sanitaire de 21 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 2016
 - b. La revisite de 7 placettes du suivi sanitaire par l'UCL
- (iii) Le traitement et l'interprétation des données

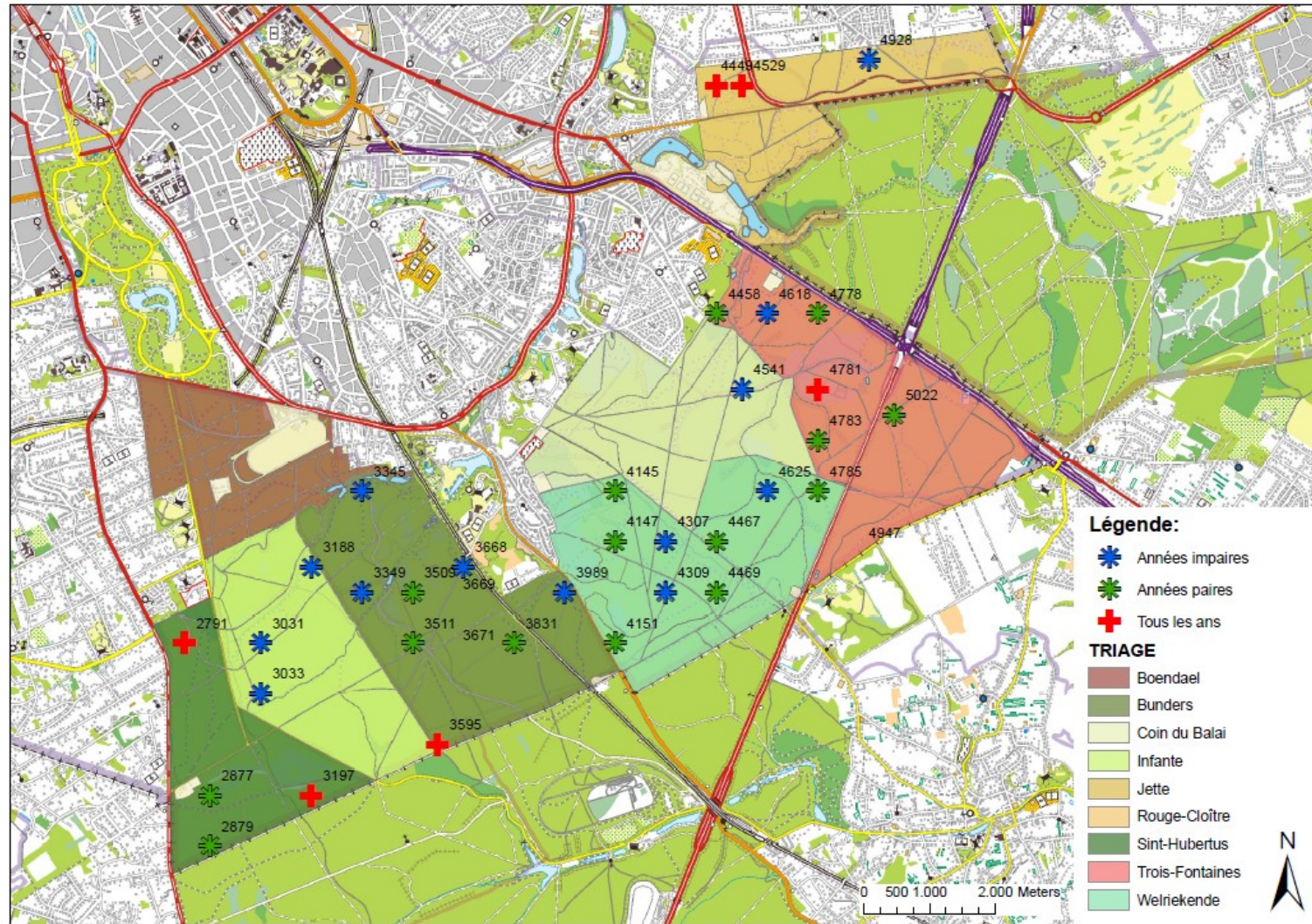
4.1. Plan d'échantillonnage

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 2016 n'ont subi aucune coupe importante depuis les 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 2016, 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 c'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 probable de l'un ou l'autre arbre 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. En outre, les effectifs des hêtres sont plus élevés les années paires, en raison de l'alternance bisannuelle des visites (Tableau 3).

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

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Nombre de placettes	34	21	19	21	19	21	19	21
Nombre de chênes	20	49	42	66	59	58	54	54
Nombre de hêtres	200	141	111	140	114	132	106	131
Nombre total d'arbres	220	190	153	206	173	190	160	185

Les effectifs considérés pour caractériser les arbres observés lors de la campagne 2016 incluent l'ensemble des arbres soumis à au moins une observation. Par contre, les résultats développés du point 5.1 au point 5.6, ont été obtenus en écartant les arbres dominés et les arbres trop peu visibles. Pour cette raison, l'échantillon retenu pour l'analyse de l'état sanitaire inclus 48 chênes indigènes et 97 hêtres sur 21 placettes, soit un total de 145 arbres (voir Tableau 5). La présentation des caractéristiques de l'échantillon dans ce chapitre (classes de circonférences, ombrage, etc.) porte également sur ces 145 arbres.

Pour les dommages, les fréquences sont calculées par rapport à ces mêmes effectifs, mais seuls 89 hêtres et 19 chênes indigènes présentaient au moins un dommage visible.

Tableau 5 : Effectifs des arbres observés et résultats analysés durant la campagne 2016.

Effectifs	Hêtres	Chênes pédonculés	Chênes sessiles
Observés	131	45	9
Echantillon analysé	97	40	8
Dommage(s) observé(s)	89	16	3

En 2015, le faible effectif des chênes sessiles nous avait conduit à traiter les deux espèces de chêne indigène ensemble. Suite à une demande exprimée en comité d'accompagnement, nous avons sommes revenus cette année à un traitement séparé pour ces espèces.

La ventilation des effectifs retenus selon les classes de circonférence est illustrée à la Figure 6 Nous observons une proportion relativement élevée de chêne pédonculés de faible circonférence (100 à 140 cm). Malgré la présence d'arbre de classe de circonférence 80-100 dans les placettes, aucun d'eux n'est représenté dans l'échantillon, car leurs couronnes ne peuvent être observées de façon satisfaisante.

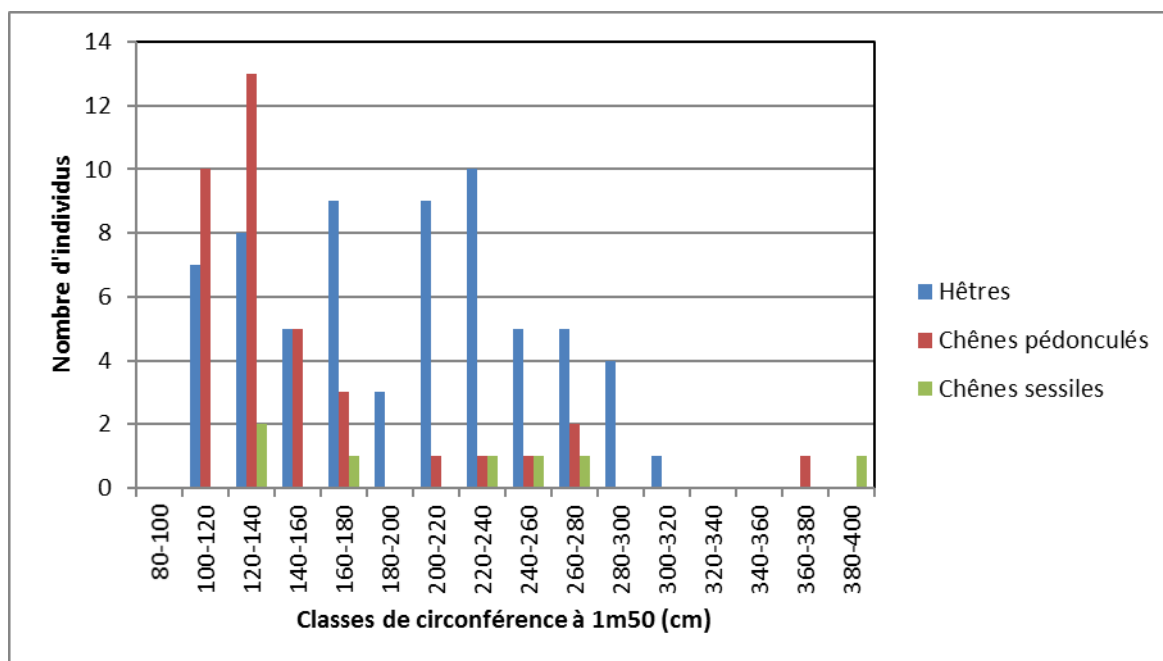


Figure 6 : Distribution des arbres de l'échantillon analysé en 2016 selon les classes de circonférence

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 1 ou 2 côtés.

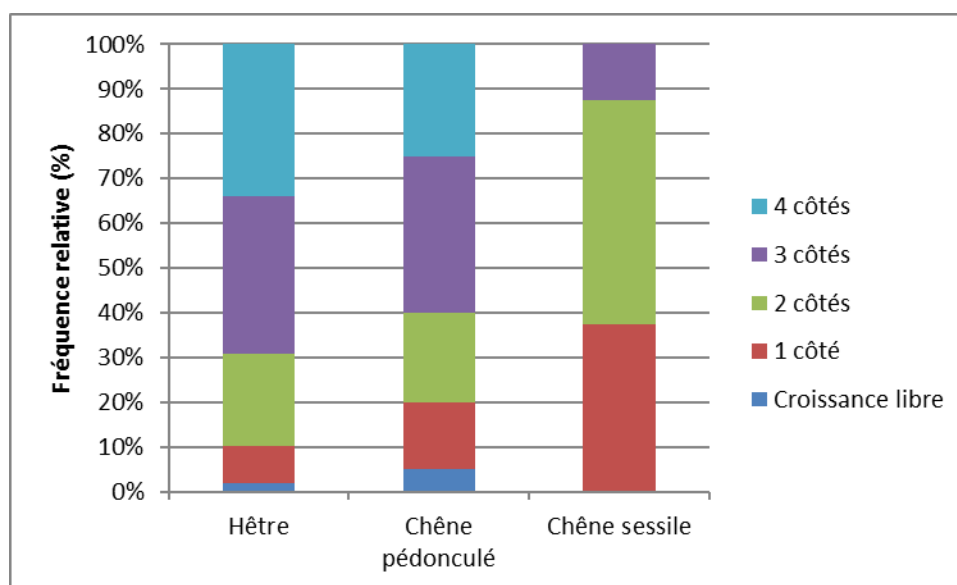


Figure 7 : Distribution des arbres selon le degré de concurrence pour l’échantillon analysé en 2016

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. Cette catégorie est exclue de l’échantillon.

Comme l’indique la Figure 8, le statut « arbre codominant » est le mieux représenté : 80% des chênes pédonculés et 70% des hêtres étudiés sont co-dominants. Par contre, seuls 38% des chênes sessiles sont co-dominants, 50% d’entre eux étant dominants.

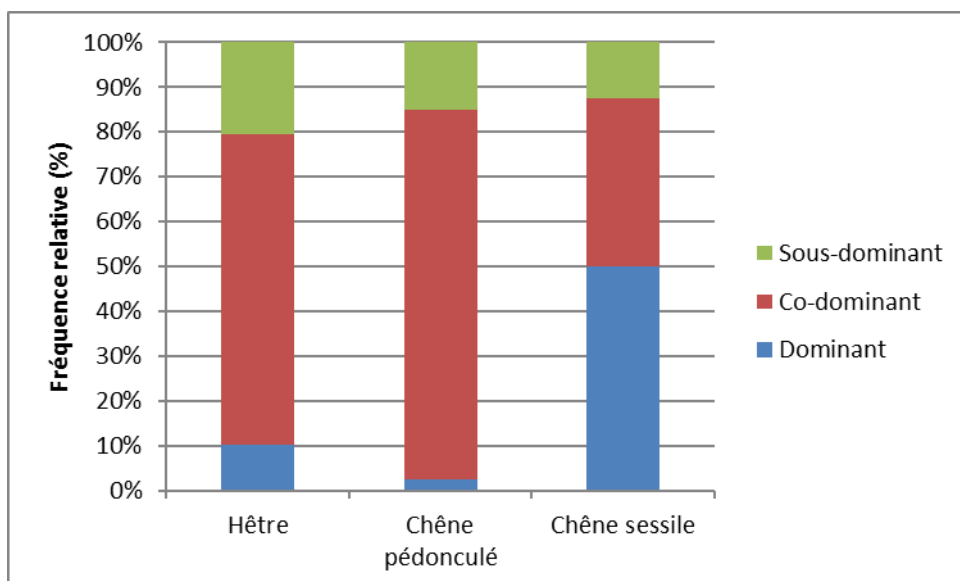


Figure 8: Proportion des statuts sociaux en fonction des essences pour l'échantillon analysé en 2016

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 ayant reçu une cotation pour la défoliation, seuls 26% des chênes et 28% des hêtres présentent une couronne bien visible. Pour 18% des hêtres, 8% des chênes pédonculés et 12% des chênes sessiles, la couronne est non visible latéralement, ce qui signifie que ces arbres ont été observés par le bas.

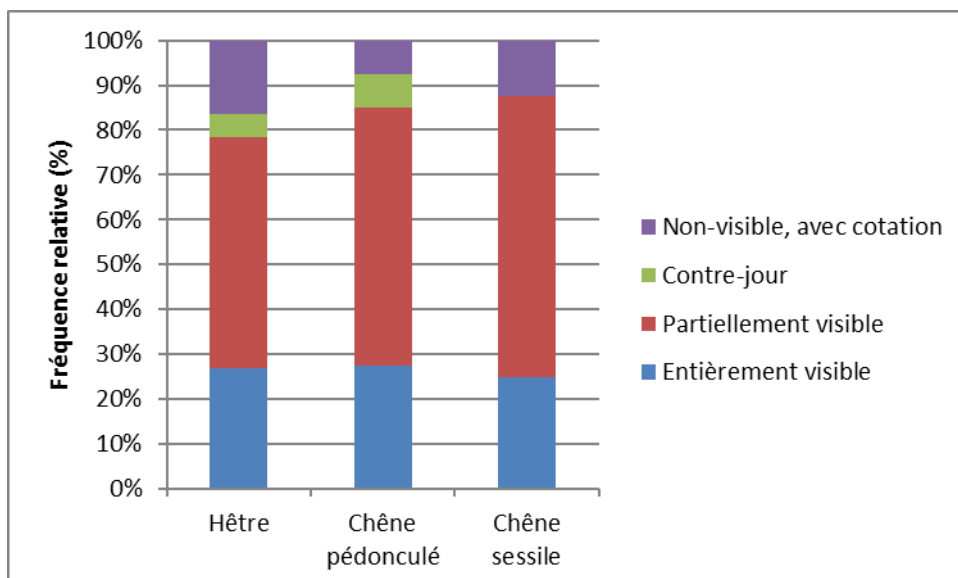


Figure 9: Distribution des arbres en fonction de la visibilité et de l'essence pour l'échantillon analysé en 2016

Si l'on se réfère à l'ensemble des arbres observés, mais non dominés, nous constatons qu'il existe une proportion significative d'arbres (18% des hêtres et 9% des chênes pédonculés) qui n'ont pas reçu de cotation pour la défoliation en raison de leur très mauvaise visibilité (Figure 10). Etant donné 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 plus élevées pour l'échantillon qu'en réalité. Toutefois, l'attribution d'une cote de défoliation dans ces conditions est extrêmement délicate.

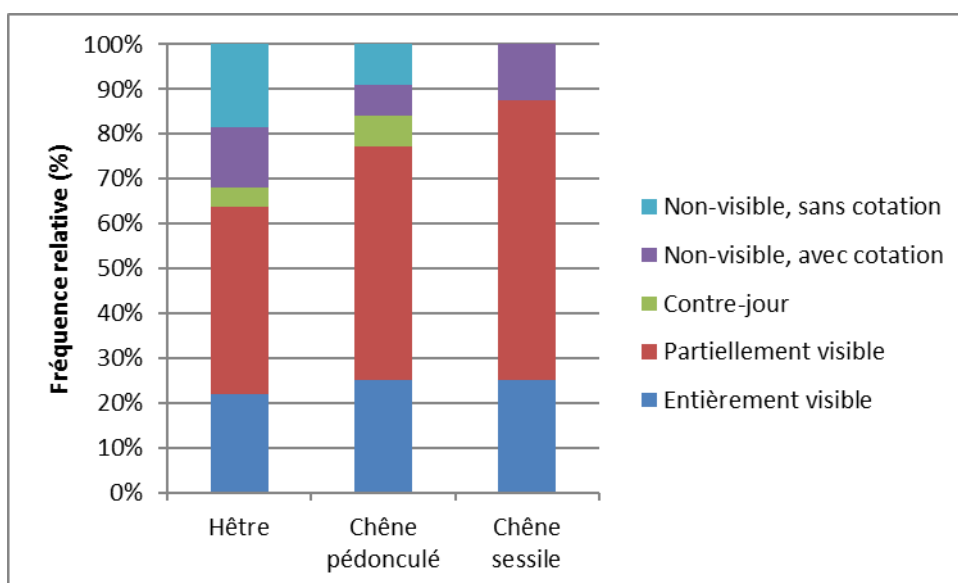


Figure 10 : Distribution des arbres selon la visibilité pour l'ensemble des arbres non dominés observés en 2016.

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 2015, 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° 3509, 3511, 4145, 4467) et 3 placettes en chênaie (n° 2791, 3197 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 39 hêtres, 17 chênes pédonculés et 6 chênes sessiles, soit respectivement 40%, 43% et 75% 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 77% pour les hêtres, 65% pour les chênes pédonculés et 67% pour les chênes sessiles. Ce critère de qualité est donc rencontré pour les hêtres, mais pas pour les chênes, à quelques pourcents près.

Tableau 6 : Moyenne des écarts de défoliation par essence observée en 2016 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	39	40	37	33	-3.5	Prob.> t = 0.04*
Chênes pédonculés	17	43	18	27	9	Prob.> t = 0.009*
Chênes sessiles	6	75	6	17	10.5	Prob.> t = 0.006*

D'autre part ; nous observons que la moyenne des écarts de défoliation entre IBGE et l'UCL est de -3.5% pour les hêtres, de +9% pour les chênes pédonculés et de +10.5% pour les chênes sessiles (Tableau 6). Les tests appariés (Student) indiquent que ces différences sont significatives et permettent de suspecter une légère sous-estimation de la défoliation pour les hêtres et une surestimation pour les chênes (Figure 11).

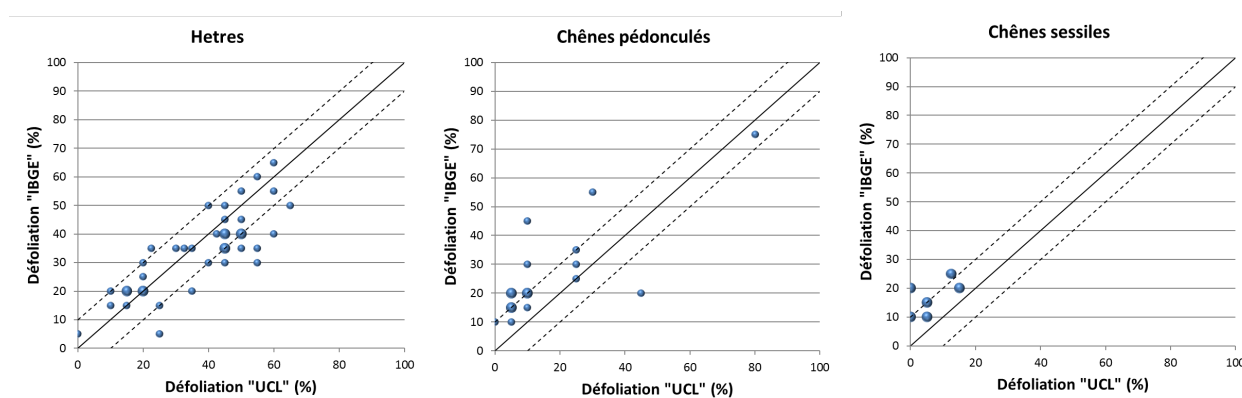


Figure 11 : Comparaison des valeurs de défoliation selon les équipes IBGE et UCL ; la surface des bulles illustre le nombre de points de mêmes coordonnées ; la droite continue correspond au rapport 1:1 ; les droites pointillées correspondent aux seuils de +/- 10 %.

Une sous-estimation pour les hêtres serait probablement liée à l'abondance de la fructification cette année, rendant l'estimation de la défoliation plus délicate. L'estimation de la défoliation est en effet basée en grande partie sur l'estimation de la transparence de la couronne, elle-même affectée par la présence des fruits. Cet effet doit être corrigé par l'observateur, ce qui constitue une source de variabilité supplémentaire.

Pour les chênes, l'été 2016 a également été particulier ; ils ont produit des « pousses de la Saint-Jean » de taille exceptionnelle et en quantité très importante. D'une part, ces pousses ont continué à grandir durant la période de mesure, ce qui peut engendrer des différences de défoliation entre 2 dates de visite. D'autre part, ces pousses longues et non-ramifiées ont engendré des houppiers d'apparence très particulières, compliquant la cotation de la défoliation.

Globalement, nous pouvons conclure que les résultats du contrôle sont moins bons qu'en 2015. Ils sont satisfaisants pour le hêtre, bien qu'une légère sous-estimation soit possible. Ils ne sont pas satisfaisants pour les chênes (bien que proches du seuil requis) et présentent une probable sur-estimation. Nous n'envisageons toutefois pas de rejeter ces résultats, ni d'appliquer une correction, car (i) le pourcentage de résultats acceptables n'est pas très éloigné de l'objectif, (ii) il est délicat d'extrapoler ces résultats aux autres placettes et (iii) nous ne pouvons affirmer que les résultats de l'équipe UCL sont les plus fiables. Nous ne considérons donc pas ce contrôle comme un filtre pour le traitement des résultats. Nous le considérons comme un moyen de mettre à jours les difficultés afin de les améliorer aux cours des prochaines campagnes.

5. Résultats

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.

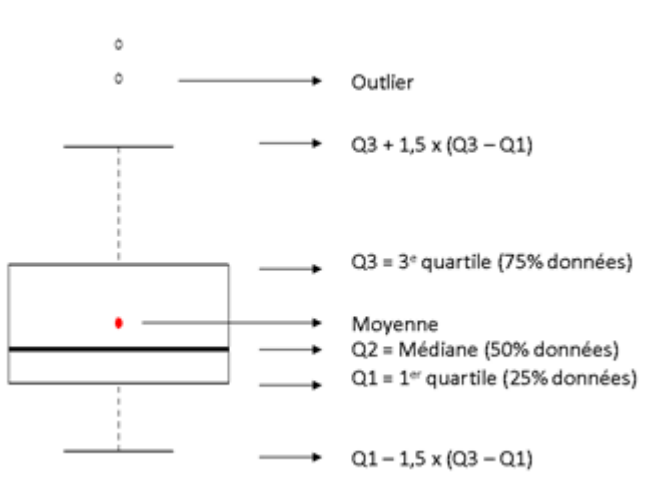


Figure 12 : Informations dérivées des graphiques en boîtes à moustaches (box-plot)

5.1.2. Défoliation moyenne des arbres de la campagne 2016

La Figure 13 présente la distribution des valeurs de défoliation pour les échantillons de 48 chênes et les 97 hêtres répartis au sein des 21 placettes. La défoliation moyenne est de 22% pour les chênes pédonculés, 13% pour les chênes sessiles et de 33% 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 28% pour les chênes pédonculés, 0% pour les chênes sessiles et 68% pour les hêtres.

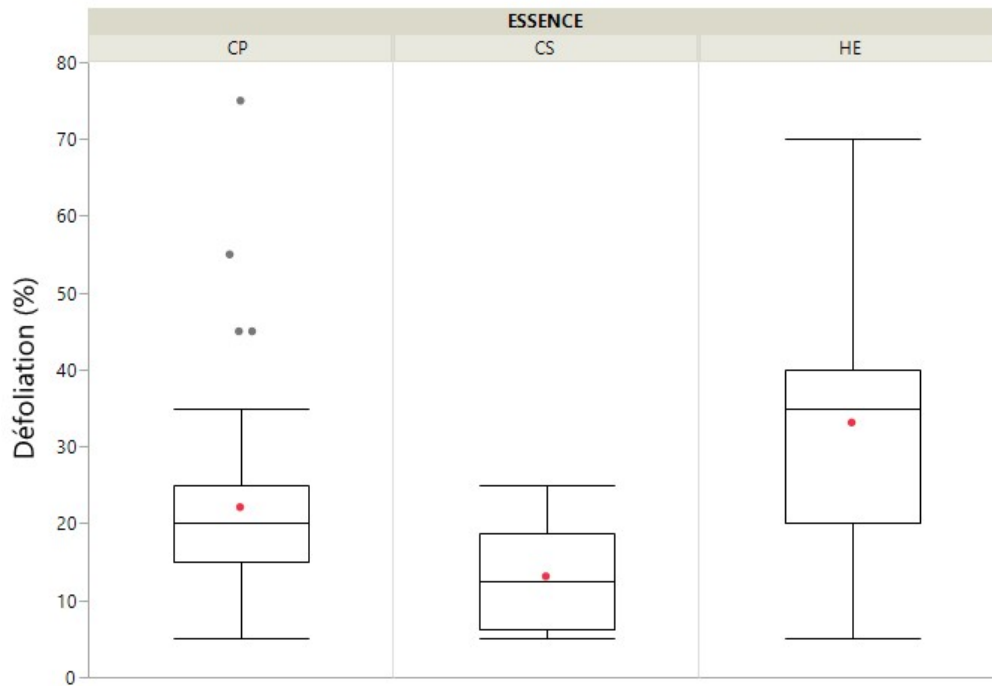


Figure 13 : Défoliation des chênes et des hêtres en 2016 ; les moyennes sont représentées par un point rouge et les valeurs extrêmes par un point gris

Les taux de défoliation par placette sont présentés au à la Figure 14 et en Annexe 1 à titre illustratif. 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 peuvent s'expliquer par l'âge du peuplement, les propriétés du sol, la densité du peuplement, etc.

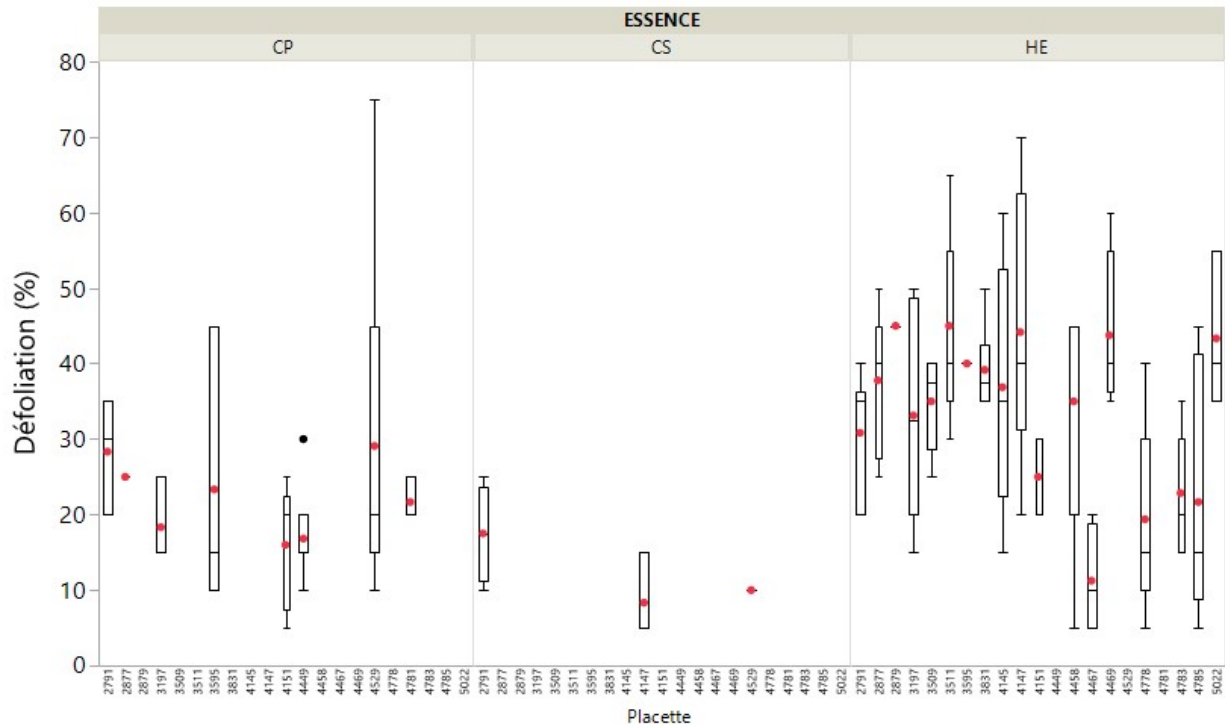


Figure 14 : Défoliation des chênes et des hêtres pour chaque placette. Certains box-plots sont incomplets en raison du nombre réduit d'effectifs (c'est le cas lorsque des chênes sont présents en hêtraie, ou inversement)

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 donc présentent une défoliation généralement plus faible. De plus, la meilleure visibilité facilite la détection des problèmes. Cet effet pourrait être un artefact lié à la difficulté d'extrapoler les observations à partir d'une petite partie du houppier. Toutefois, il peut également refléter un effet de la concurrence, puisque les arbres non visibles sont aussi ceux qui subissent le plus l'ombrage des voisins.

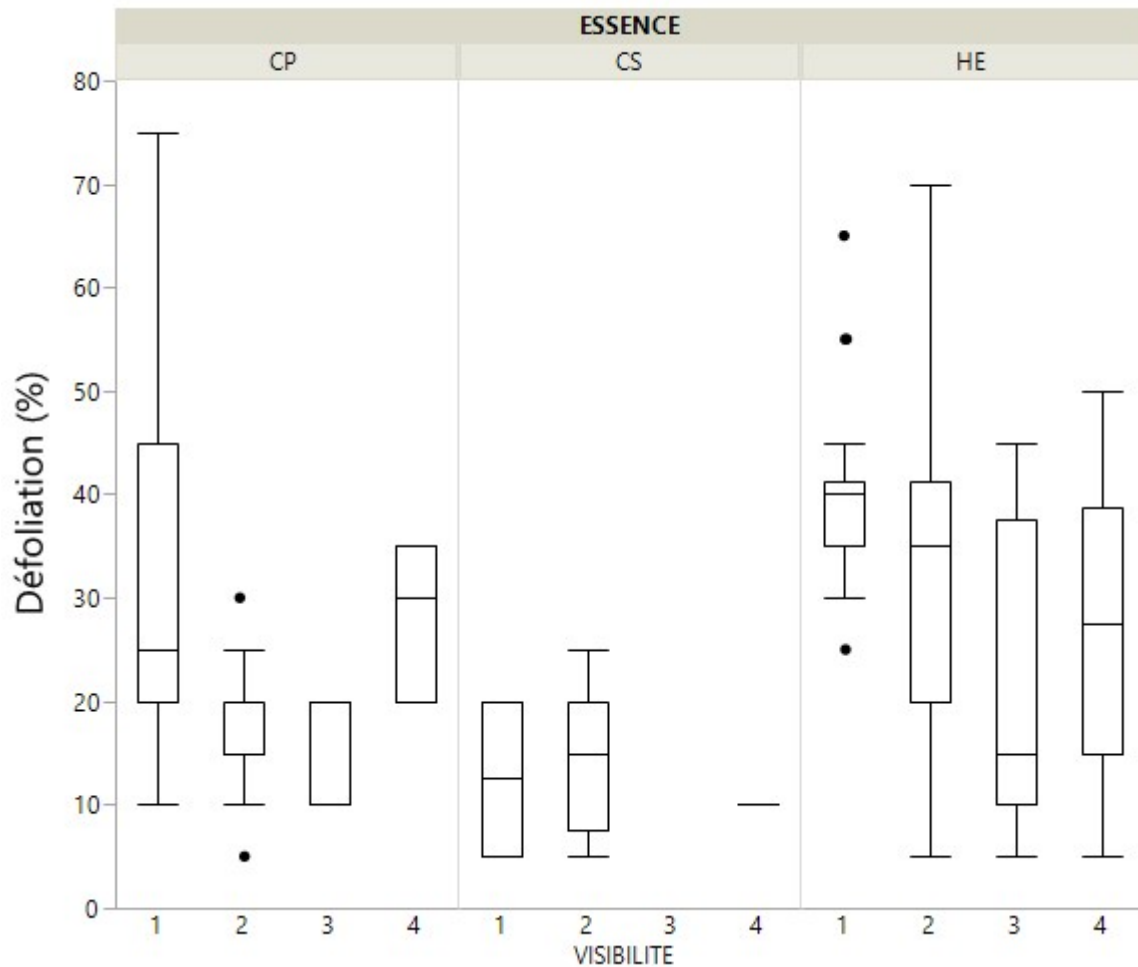


Figure 15 : Distribution des valeurs de défoliation selon la classe de visibilité (1 : bien visible → 4 : visible uniquement par le dessous)

5.1.3. Evolution de la défoliation moyenne de 2009 à 2016

L'évolution moyenne de la défoliation des arbres non dominés est présentée à la Figure 16. Les valeurs moyennes sont reprises dans le Tableau 7. 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 la détermination tardive de l'espèce pour certains individus de chênes.

Les hêtres présentent des valeurs de défoliation nettement supérieures en 2016 par rapport à 2015, la différence atteignant pratiquement 10%. Cette observation peut être expliquée par la fructification particulièrement abondante cette année. Les valeurs sont stables depuis 2013 pour les chênes sessiles. Elles sont en légère diminution par rapport à 2015 pour les chênes pédonculés, malgré une possible surestimation des valeurs cette année, mise à jour par le contrôle qualité. 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 à l'alternance bisannuelle des placettes de hêtre visitées.

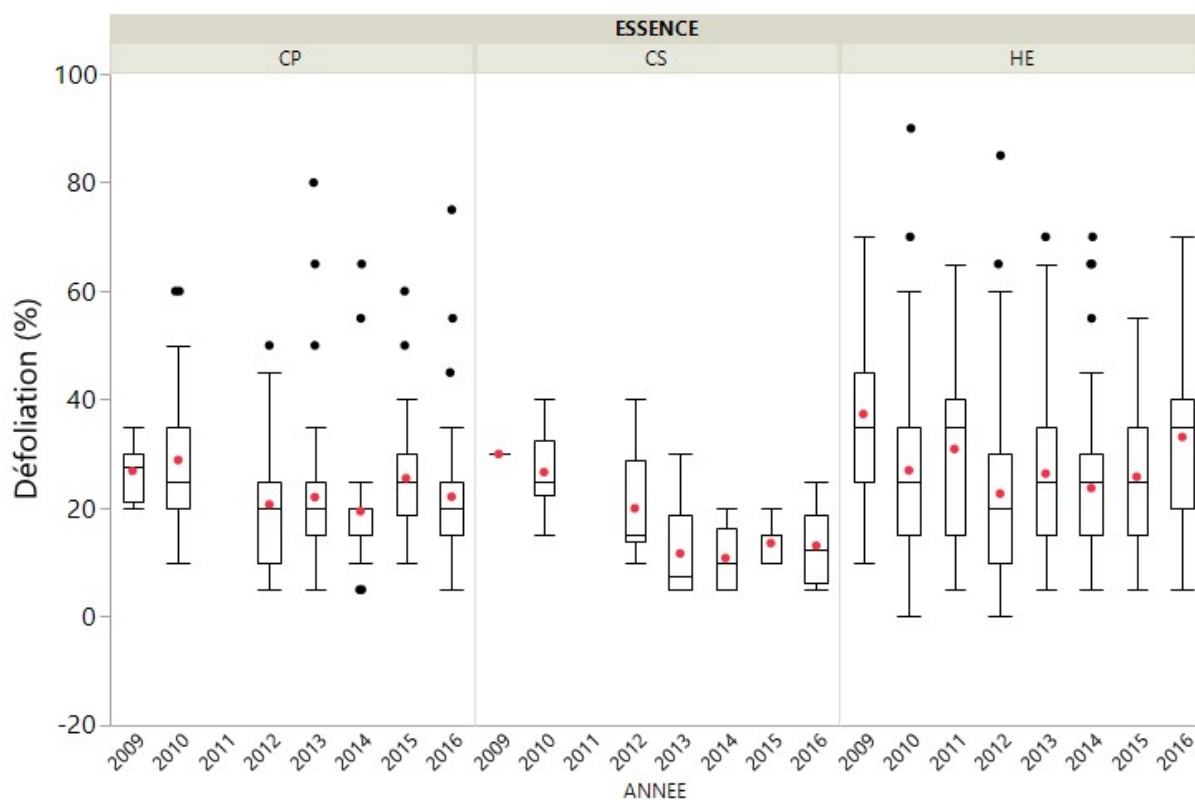


Figure 16 : Evolution de la défoliation des hêtres et des chênes de 2009 à 2015

Tableau 7: Valeurs moyenne de défoliation par année et essence

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Chênes pédonculés	27% (n=8)	29% (n=49)		21% (n=29)	22% (n=44)	19% (n=37)	26% (n=38)	22% (n=40)
Chênes sessiles	30% (n=1)	27% (n=6)		20% (n=6)	12% (n=6)	11% (n=6)	14% (n=7)	13% (n=8)
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)

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 (27 pédonculés et 6 sessiles) et toutes les années paires pour le hêtre (45 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 et Figure 18): 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 à 2015, suivie d'une diminution de 2015 à 2016. Les valeurs de 2016 sont semblables à celles des années 2012 à 2014. Pour les chênes sessiles, nous notons une diminution de 2012 à 2015, suivie d'une augmentation, non significative, en 2016. Notons qu'un biais positif a été détecté pour les chênes en 2016, conduisant à penser que l'état sanitaire pourrait être meilleur en 2016 qu'en 2015.

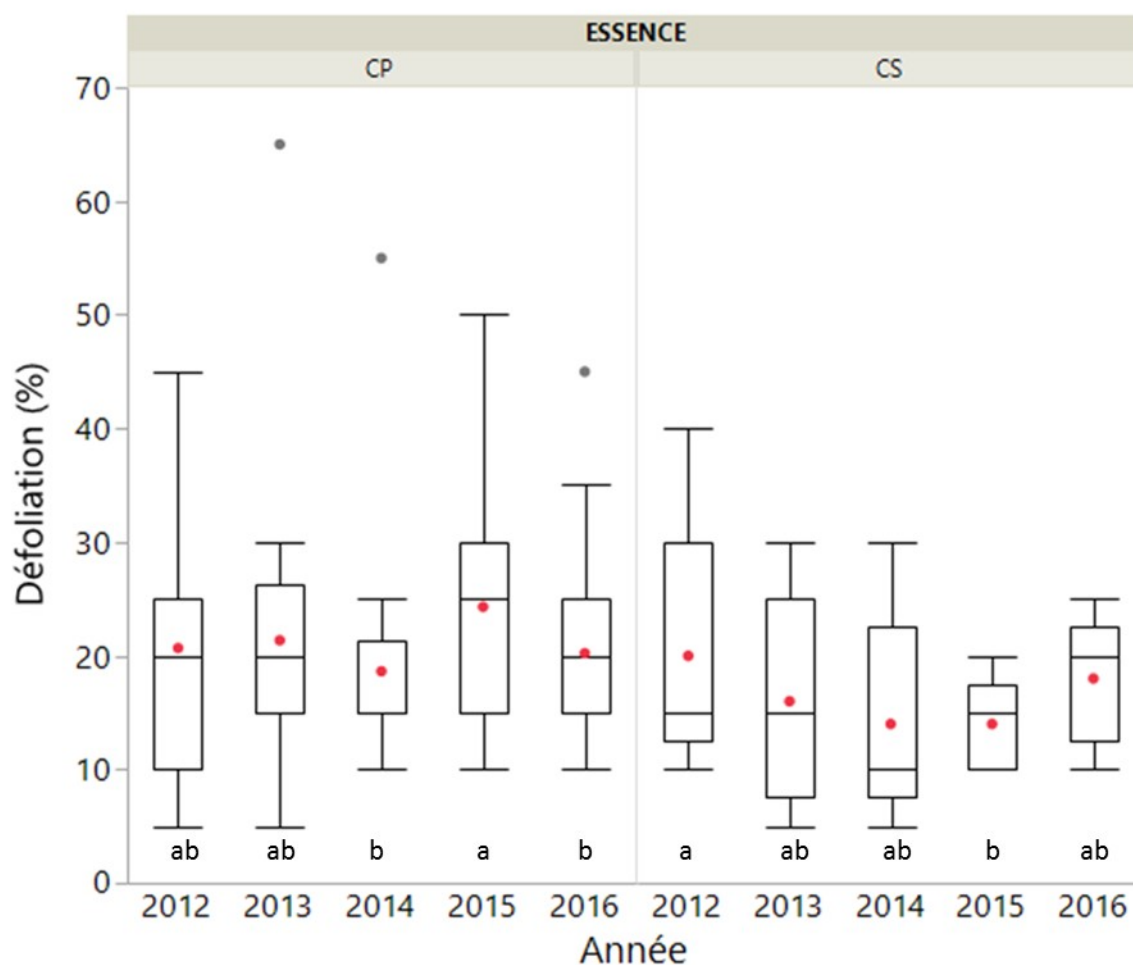


Figure 17: Evolution de la défoliation des 33 chênes observés durant les 5 campagnes de 2012 à 2016 (les petites lettres indiquent le résultats de la comparaison des moyennes ; deux années sont

caractérisées par des moyennes significativement différentes si elle ne présentent aucune lettre identique)

Les hêtres présentent des défoliations moyennes semblables en 2012 et 2014, mais une très nette augmentation entre 2014 et 2015. La moyenne pour l'échantillon considéré est passée de 23% à 33%.

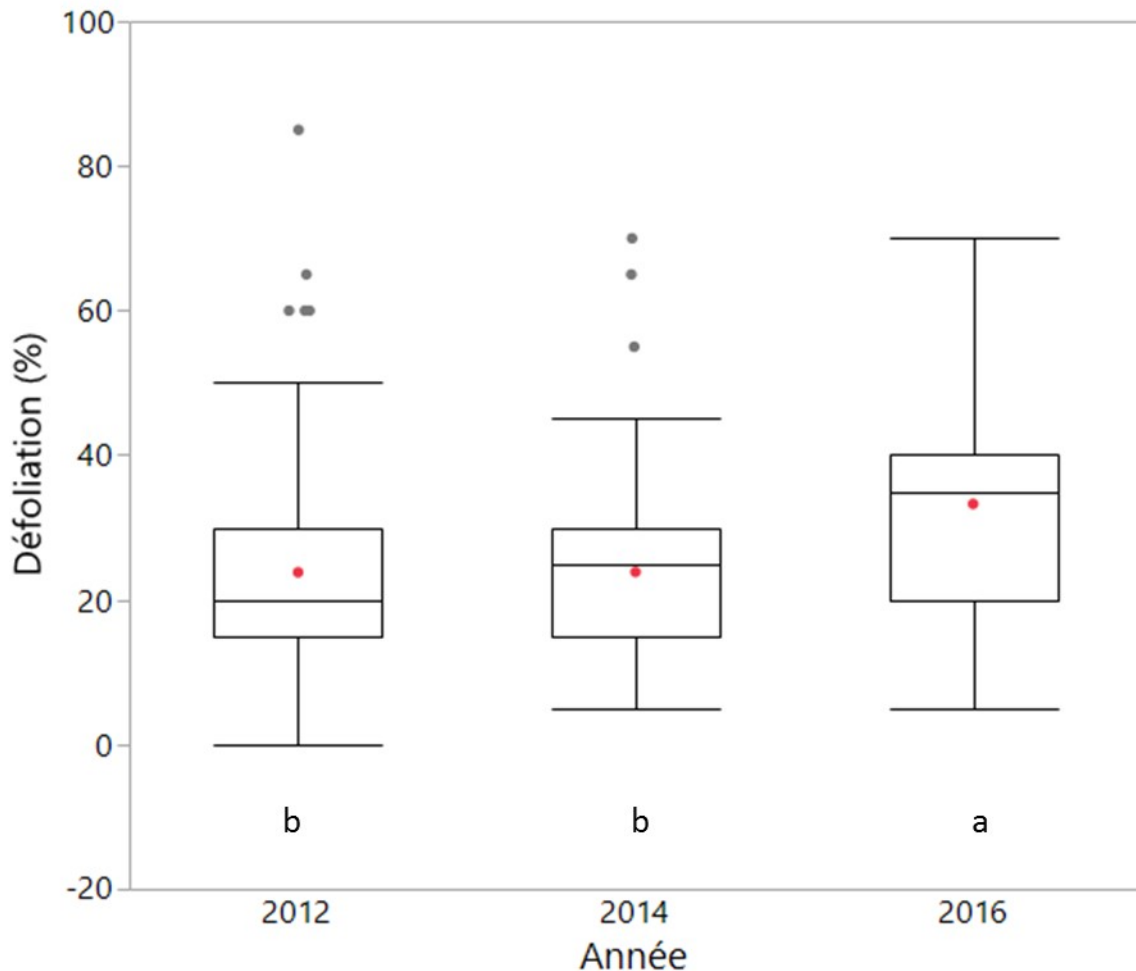


Figure 18: Evolution de la défoliation des 45 hêtres observés en 2012, 2014 et 2016 (les petites lettres indiquent le résultats de la comparaison des moyennes ; deux années sont caractérisées par des moyennes significativement différentes si elle ne présentent aucune lettre identique)

Nous avons également comparé l'évolution de chacun de ces arbres entre les deux dernières observations (2015-2016 pour les chênes et 2014-2016 pour les hêtres). Les résultats sont présentés sous forme de graphes à bulles (Figure 19 et Figure 20), afin de pouvoir visualiser les points superposés (données catégorielles).

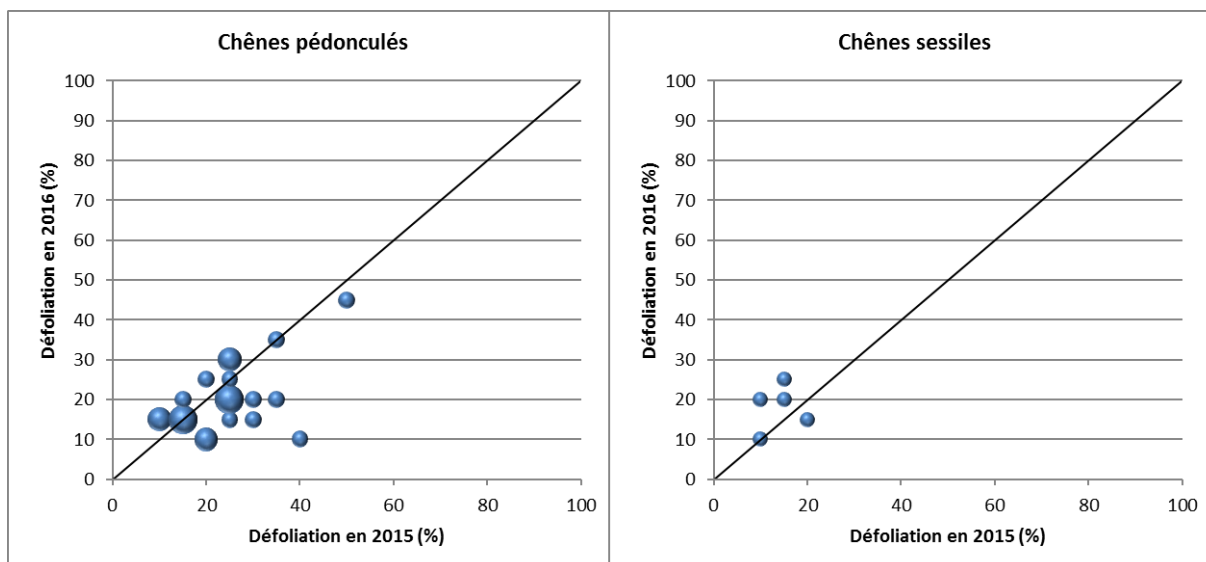


Figure 19 : Comparaison des classes de défoliation de 2015 et 2016 pour les 33 chênes observés durant toute cette période (la taille des bulles correspond au nombre de points ayant les mêmes coordonnées)

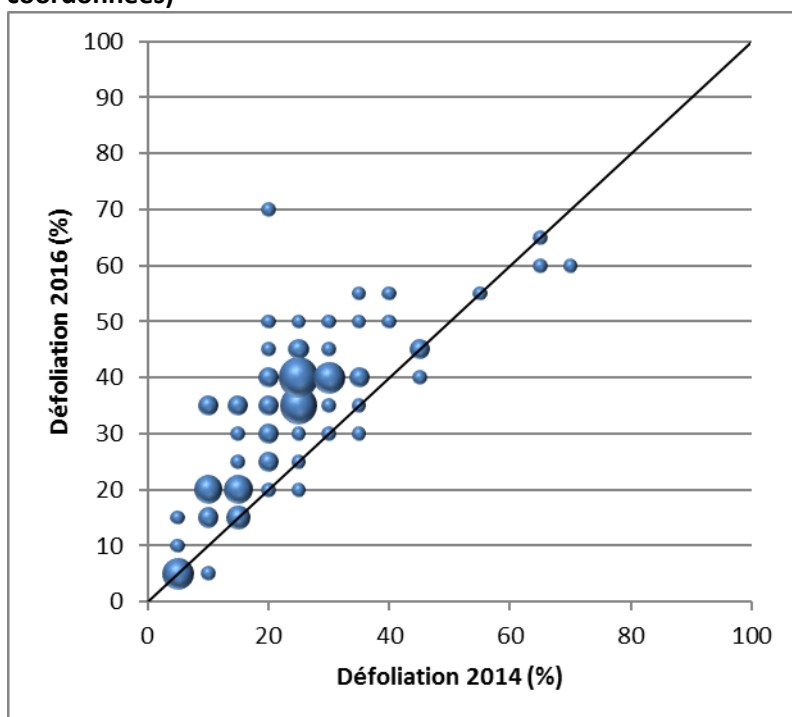


Figure 20 : Comparaison des classes de défoliation de 2014 et 2016 pour les 45 hêtres observés durant toute cette période (la taille des bulles correspond au nombre de points ayant les mêmes coordonnées)

Les chênes présentent une évolution « dispersée » : mais certains arbres présentent une situation sanitaire nettement meilleure.

La plupart des hêtres présentent des défoliations nettement supérieures en 2016 par rapport à 2014 moyennes. Les valeurs élevées en 2016 peuvent s'expliquer par la fructification exceptionnelle. Notons que 2014 était aussi une année de fructification, mais nettement moins marquée (Figure 21). En outre, il est possible que la sécheresse printanière de 2015 ait affaibli les arbres, provoquant une

accentuation de la défoliation l'année suivante. Il sera très intéressant d'observer les valeurs en 2017, car cette année ne présentera vraisemblablement pas une forte fructification.

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).

Pour les hêtres, la fructification a été exceptionnelle en 2016 : plus de 60% des arbres présente une quantité de fruit abondante (Figure 21). Ce phénomène peut être lié à la sécheresse de l'année 2015, bien que cette dernière ne fut pas particulièrement marquée. De plus, la fructification suit approximativement un cycle de 2 ans. Le fait qu'elle était peu marquée à la fois en 2014 et 2015 a probablement contribué à une augmentation en 2016.

Chez les chênes, l'année 2016 est également caractérisée par l'intensité de fructification la plus élevée, depuis le début du suivi. L'intensité du phénomène est moins marquée que pour le hêtre, mais le contraste par rapport aux autres années est plus prononcé.

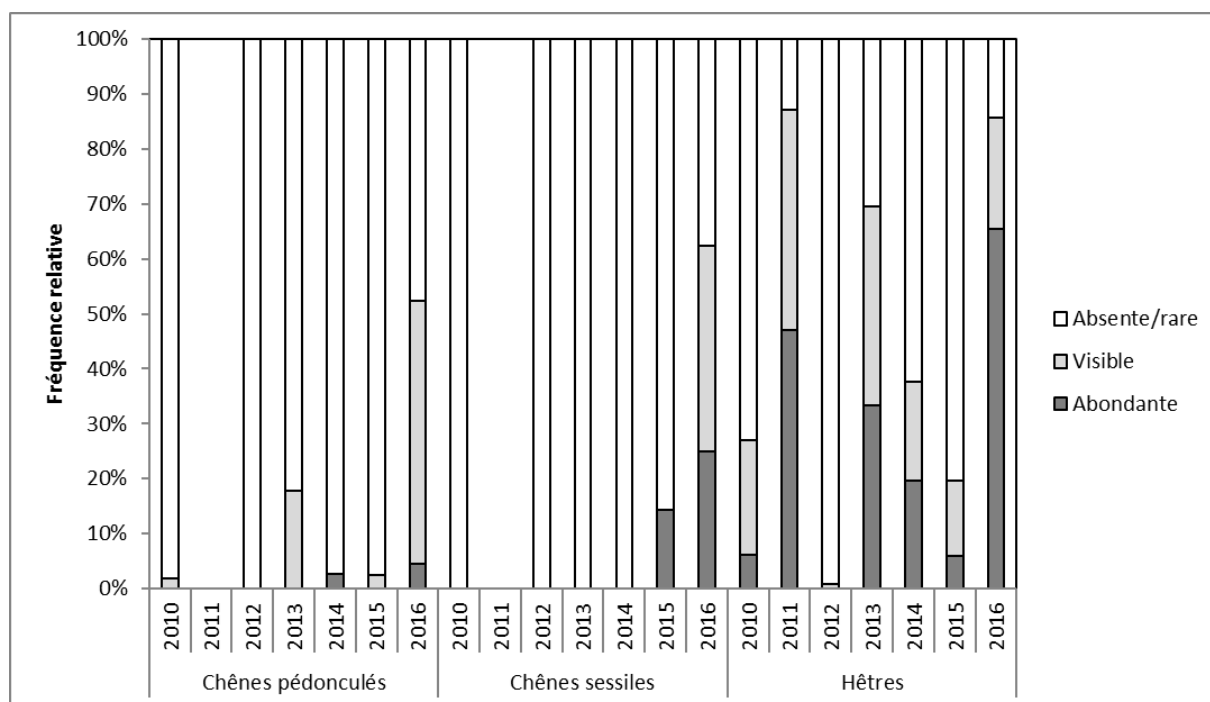


Figure 21 : Evolution du degré de fructification de 2010 à 2016 pour les chênes et les hêtres

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

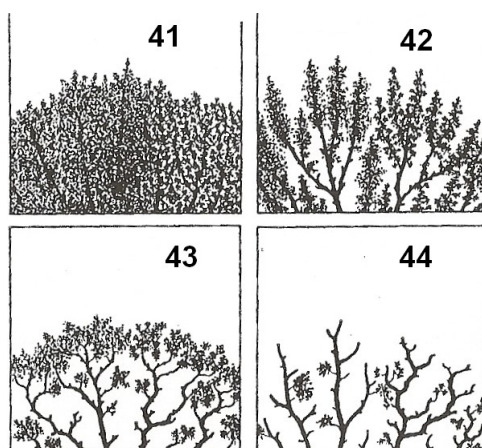


Figure 22 : Les quatre formes de houppier des chênes, avec leurs codes (Eichhorn et al., 2010)
41 : ramification dense ; 42 : simplification légère ; 43 : simplification importante ; 44 : déclin

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 23 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)

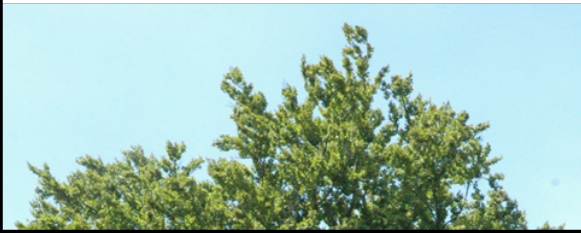
Forme 1 : les pousses apicales et les bourgeons latéraux forment de longs rameaux en éventails



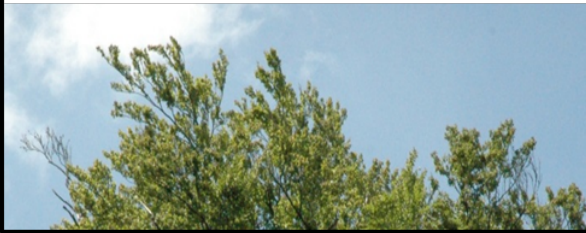
Forme 2 : les rameaux latéraux se raccourcissent.



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 »)

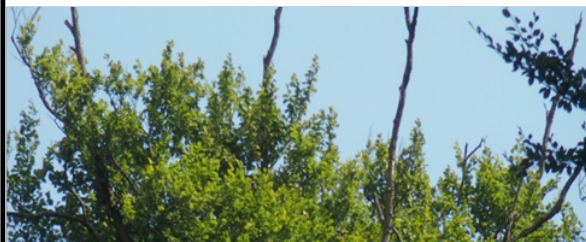


Figure 23: Fiche de terrain différenciant les 8 formes du houppier du hêtre

La structure de la couronne des chênes pédonculés s'est dégradée entre 2014 et 2015, mais on observe une amélioration en 2016 (Figure 24). Les chênes sessiles présentent tous une bonne structure de la couronne, et ce depuis 2013.

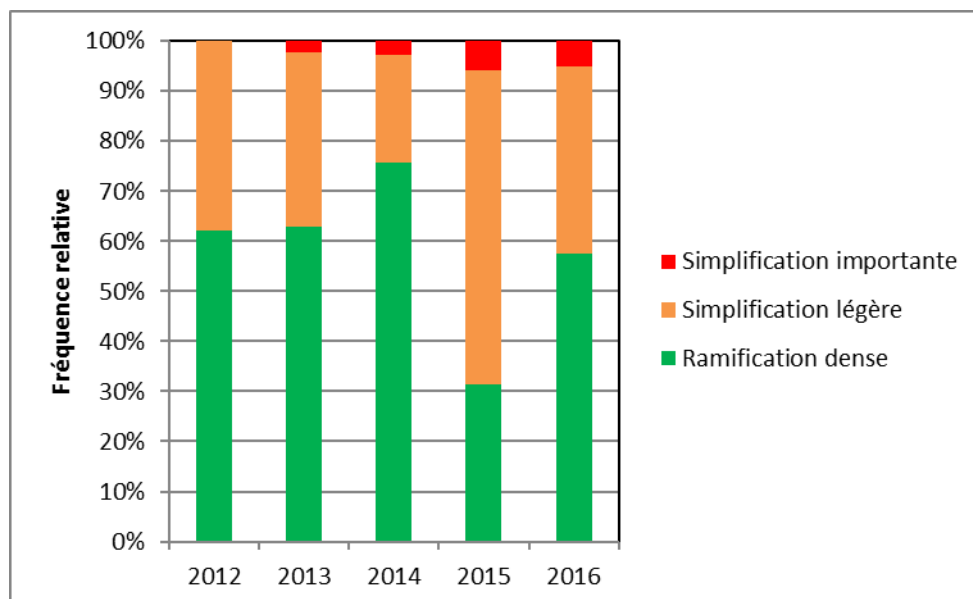


Figure 24 : Distribution des chênes pédonculés selon la structure de la couronne

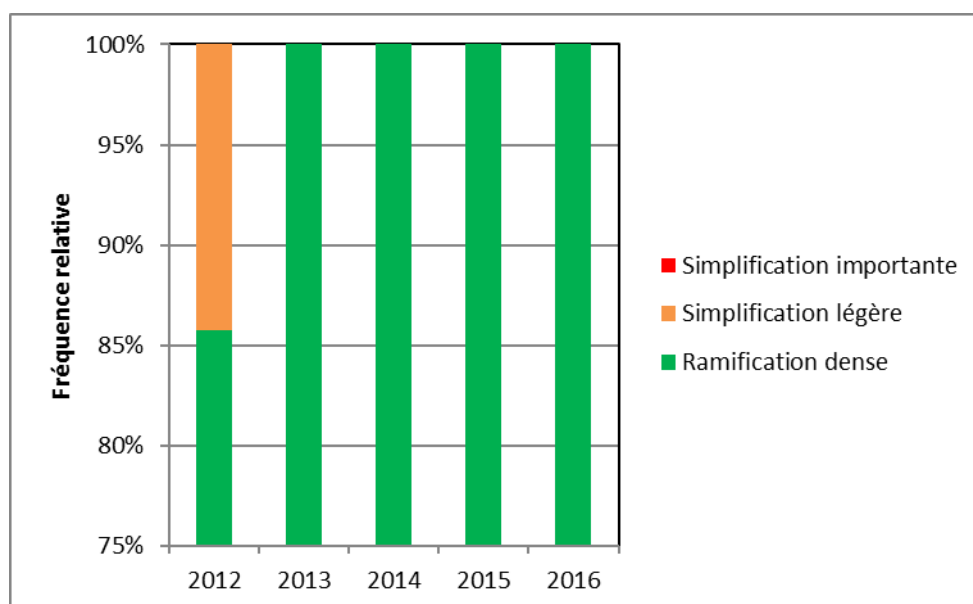


Figure 25 : Distribution des chênes sessiles selon la structure de la couronne

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 2015 ne sont pas les mêmes que celles visitées en 2014 et 2016. Nous observons depuis 2014 une détérioration progressive de la structure, avec une diminution de la proportion pour les classes 1 et 2, compensée par une augmentation de la proportion des classes 3 et 4 (Figure 26). La fréquence des classes 6 et 7 reste cependant très faible (<2%). Ces résultats suggèrent une lente détérioration de la structure des couronnes, mais sans augmentation marquée de la mortalité des branches. Nous pouvons dès lors conclure que l'augmentation de la défoliation en 2016 n'est pas lié à une mortalité massive de branches, mais à une plus faible densité foliaire sur les branches (feuilles plus petites et moins nombreuses). Ce phénomène correspond à l'effet normal d'une fructification abondante.

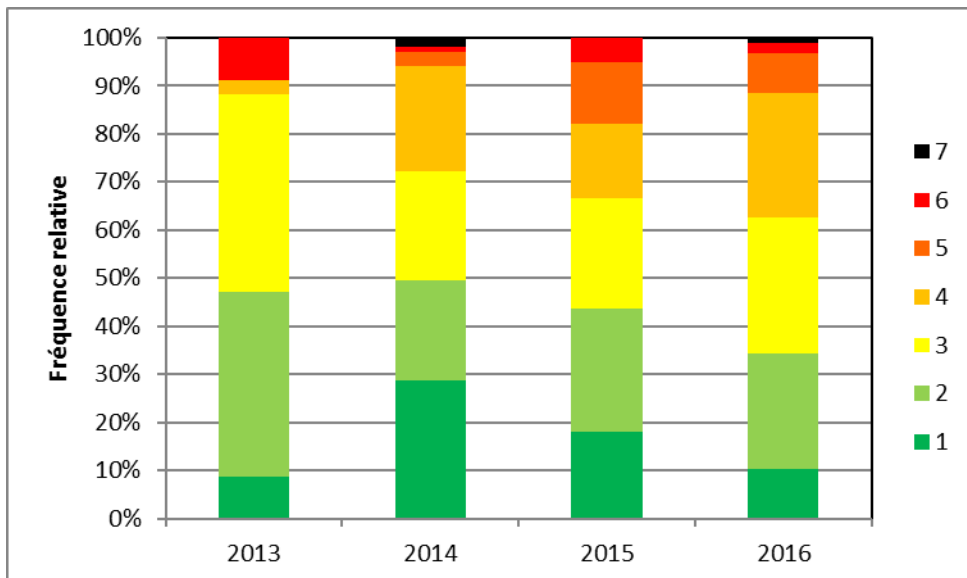


Figure 26 : Distribution des hêtres selon la structure de la couronne

5.4. Pousses épicorniques

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

La présence de pousses épicorniques est plus généralement observée chez les chênes pédonculés, et ceci de manière constante, puisque la proportion de chênes avec gourmands avoisine les 50% (Figure 27). Pour les chênes sessiles, l'abondance de pousses épicorniques diminue globalement avec le temps, bien que l'on observe une augmentation entre 2015 et 2016. Pour les hêtres, les gourmands sont peu fréquents et en lente diminution.

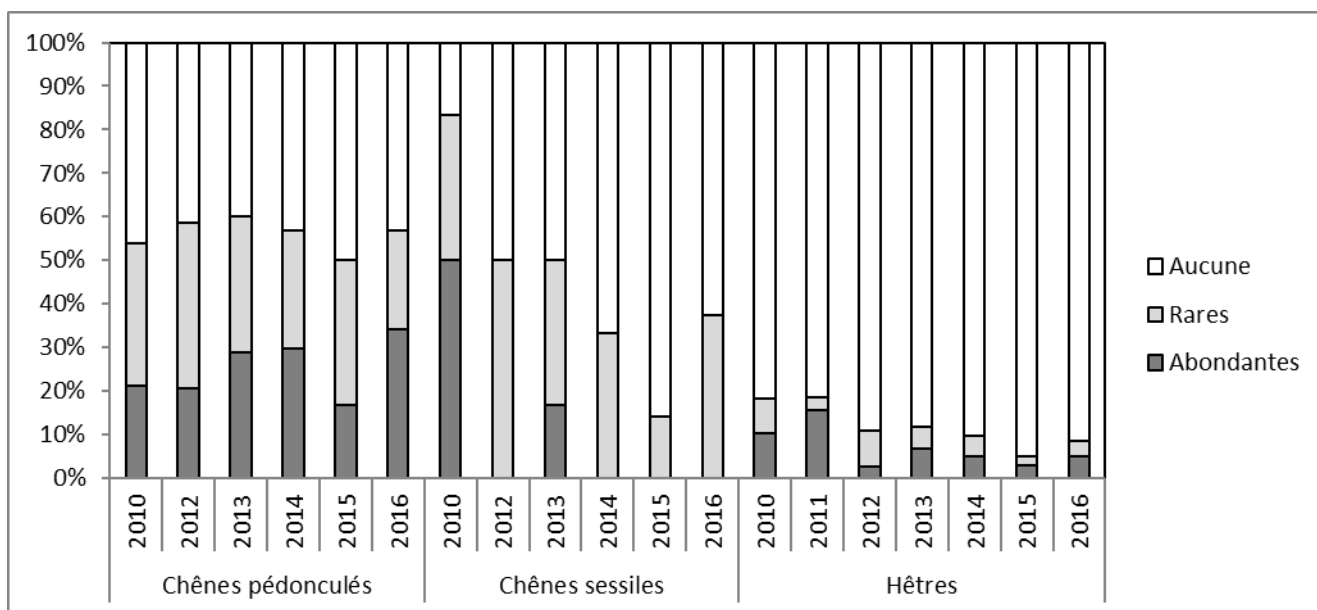


Figure 27 : Distribution des arbres selon l'abondance des pousses épicorniques

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.

Globalement, les chênes sont plus affectés par la décoloration que les hêtres (Figure 28). En 2016, la décoloration ne concernait aucun chêne et seuls 2% des hêtres.

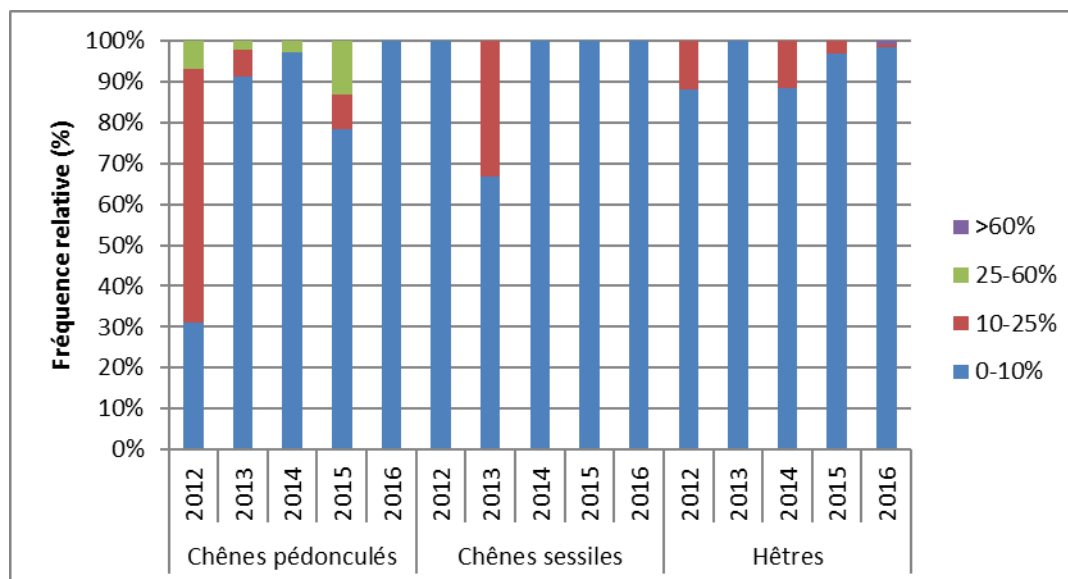


Figure 28: Distribution des arbres selon le pourcentage de décoloration du feuillage

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 8 reprend le niveau de corrélation existant entre la défoliation et la circonférence des chênes et des hêtres, mesurée à 1m50. Les coefficients en gras et marqués d'un astérisque indiquent que la corrélation est significative au seuil $\alpha = 0.05$. Nous pouvons donc conclure que les niveaux de défoliation des hêtres augmentent à mesure que la circonférence s'accroît. Par contre, cette relation n'est pas vérifiée pour les chênes quelle que soit la campagne.

Tableau 8 : Corrélations entre la circonférence et la défoliation en fonction de l'essence et de l'année

Année	Corrélations 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)

Les régressions linéaires illustrant la relation entre la défoliation et la circonférence ont dès lors été réalisées pour les hêtres uniquement (Tableau 9).

Tableau 9: 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

La Figure 29 illustre la distribution des valeurs de défoliation des hêtres en 2016 en fonction de la circonférence à 1m50. Le coefficient de pente est de 0,051. En d'autres termes, sur base des données de 2016, la défoliation augmenterait de 5% lorsque la circonférence d'un hêtre augmente de 100 cm. On observe que 2 arbres présentent une défoliation particulièrement élevée en dépit de leur circonférence réduite.

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.

Des ANOVA ont été réalisées afin de tester l'hypothèse d'égalité des moyennes de défoliation en fonction des degrés de concurrence. L'hypothèse nulle est rejetée lorsque la p-valeur calculée est inférieure au niveau de significativité $\alpha=0,05$. Les résultats présentés dans le Tableau 10 indiquent que les moyennes de défoliation, en 2016, sont significativement affectées par le degré de concurrence pour les hêtres, mais pas pour les chênes.

Pour les séries dont la défoliation varie en fonction de l'indice d'ombrage, on a réalisé un test de Tukey afin de mettre en évidence les différences entre chaque modalité. La Figure 30 confirme que le déficit foliaire des chênes n'est pas en lien avec le degré de concurrence du houppier. Contrairement aux chênes, nous constatons que les couronnes des hêtres les plus soumis à la concurrence présentent une défoliation plus faible, par rapport aux autres situations. Toutefois, seule la différence avec la modalité « contact sur 2 côtés » est significative. 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. Concurrence et visibilité sont en effet liés. De plus, ces arbres isolés n'ont pas grandi librement depuis leur jeune âge ; ils ont été mis en lumière progressivement suite à l'élimination de voisins au cours d'éclaircies. La forme de leur houppier reste marquée par cette concurrence ancienne (trous liés à des branches manquantes), qui peut être estimée via la présence de souche. Bien que le protocole spécifie que ces trous ne doivent pas être comptabilisés comme « défoliation », il est parfois très délicat de déterminer l'historique de la concurrence.

Tableau 10: Résultats des ANOVA testant l'impact de l'indice d'ombrage sur la défoliation

Source	DDL	Somme des carrés	Carrés moyens	F	Pr > F
Chênes 2009	4	222,02	55,51	0,9827	0,4636
Chênes 2010	4	645,60	161,40	1,6024	0,1925
Chênes 2011	4	71,09	17,77	0,1792	0,9476
Chênes 2012	4	1306,82	326,70	2,0097	0,1050
Chênes 2015	4	613	153	1.24	0.305
Ch. pédonculés 2013	4	1418,59	354,65	1,9168	0,1249
Ch. pédonculés 2014	4	1348,558	269,712	2,6128	0,03942*
Ch. pédonculés 2016	4	1170	292	2.11	0.101
Ch. sessiles 2013	2	76,19	38,09	0,3265	0,7390
Ch. sessiles 2014	2	76,6666	38,3333	0,8050	0,4845
Ch. sessiles 2016	2	155	77	2.02	0.23
Hêtres 2009	4	1870,87	467,72	2,5974	0,0390*
Hêtres 2010	4	2796,76	699,19	3,3550	0,0127*
Hêtres 2011	4	3289,19	822,30	4,1811	0,0036*
Hêtres 2012	4	2732,09	683,02	2,9407	0,0238*
Hêtres 2013	4	2126,89	531,72	3,0351	0,0218*
Hêtres 2014	4	2147,13	536,78	3,3228	0,0136*
Hêtres 2015	4	2013	503	4.24	0.0037*
Hêtres 2016	4	2823	706	3.73	0.0073*

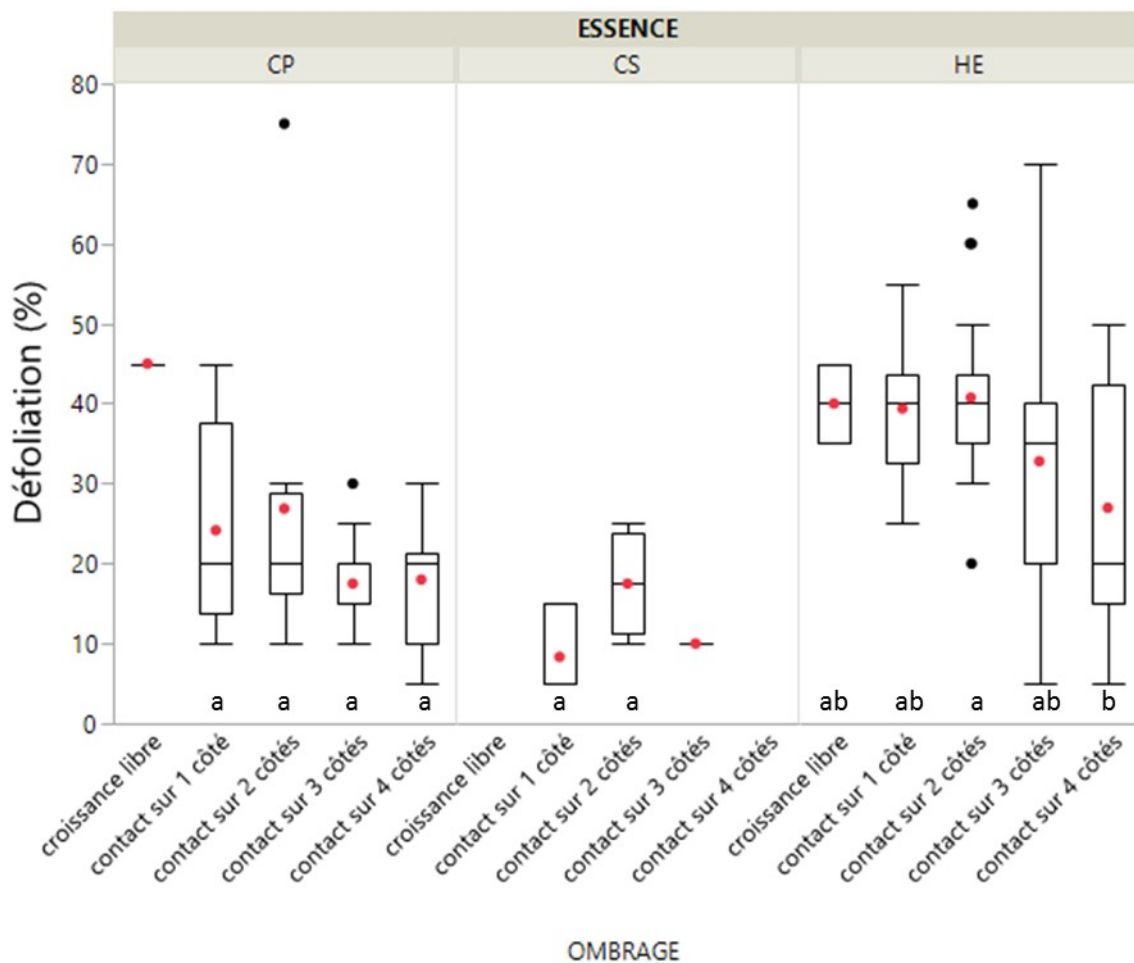


Figure 30: Défoliation des chênes indigènes et des hêtres selon l'indice d'ombrage en 2016 (les petites lettres indiquent le résultats de la comparaison des moyennes, réalisée séparément pour chaque essence; deux modalités sont caractérisées par des moyennes significativement différentes si elle ne présentent aucune lettre identique)

5.6.4. Défoliation et décoloration

Etant donné l'absence pratiquement totale de décoloration en 2016 (0% des chênes et 2% des hêtres), cette relation n'a pas été testée cette année.

5.6.5. Défoliation et fructification

En 2016, nous pouvons réaliser pour la première fois une comparaison des moyennes de défoliation pour le chêne pédonculé selon l'intensité de la fructification en incluant les 3 classes d'intensité (Figure 31).

Pour le chêne pédonculé, la valeur moyenne de défoliation est plus élevée pour les arbres présentant la fructification la plus intense alors que l'inverse est observé dans le cas du chêne sessile (Figure 31). Toutefois, aucune des différences n'est significative pour ces deux essences (Tableau 11).

Pour les hêtres, nous observons par contre une augmentation significative de la défoliation moyenne lorsque l'intensité de la fructification augmente (Tableau 11 et Figure 31). Cette comparaison entre individus la même année confirme les relations entre ces paramètres, mises en évidence lorsque l'on compare les années.

La relation entre la défoliation et la fructification s'explique, entre autres, par le fait que les fortes fainées mobilisent une part importante de nutriments, en particulier l'azote et le phosphore, qui n'est plus disponible pour la feuillaison.

Tableau 11: Résultats des ANOVA testant l'impact de la fructification sur la défoliation

Source	DDL	Somme des carrés	Carrés moyens	F	Pr > F
Chênes 2009	1	1,19	1,19	0,0196	0,8910
Chênes 2010	1	24,44	24,44	0,2260	0,6369
Chênes 2011	2	22,08	11,04	0,1162	0,8906
Chênes 2012	1	1,44	1,44	0,0082	0,9282
Chênes 2015	1	163	81	0.65	0.52
Ch. pédonculés 2013	1	79,18	79,18	0,3918	0,5344
Ch. pédonculés 2014	1	86,0504	86,0504	0,9503	0,3367
Ch. pédonculés 2016	2	256	128	0.705	0.5
Ch. sessiles 2013	0	0	x	x	x
Ch. sessiles 2014	1	178,57143	178,57143	6,2500	0,0465*
Ch. sessiles 2016	2	101	50	1.020	0.42
Hêtres 2009	2	3477,01	1738,50	10,4192	<0,0001*
Hêtres 2010	2	12,91	6,46	0,0285	0,9719
Hêtres 2011	2	7425,49	3712,75	24,3840	<0,0001*
Hêtres 2012	1	540,83	540,83	2,1998	0,1409
Hêtres 2013	2	1616,28	808,14	4,5638	0,0131*
Hêtres 2014	2	3396,39	1698,20	12,3927	<0,0001*
Hêtres 2015	2	279	139	1.01	0.37
Hêtres 2016	2	4695	2347	14.21	<0,0001*

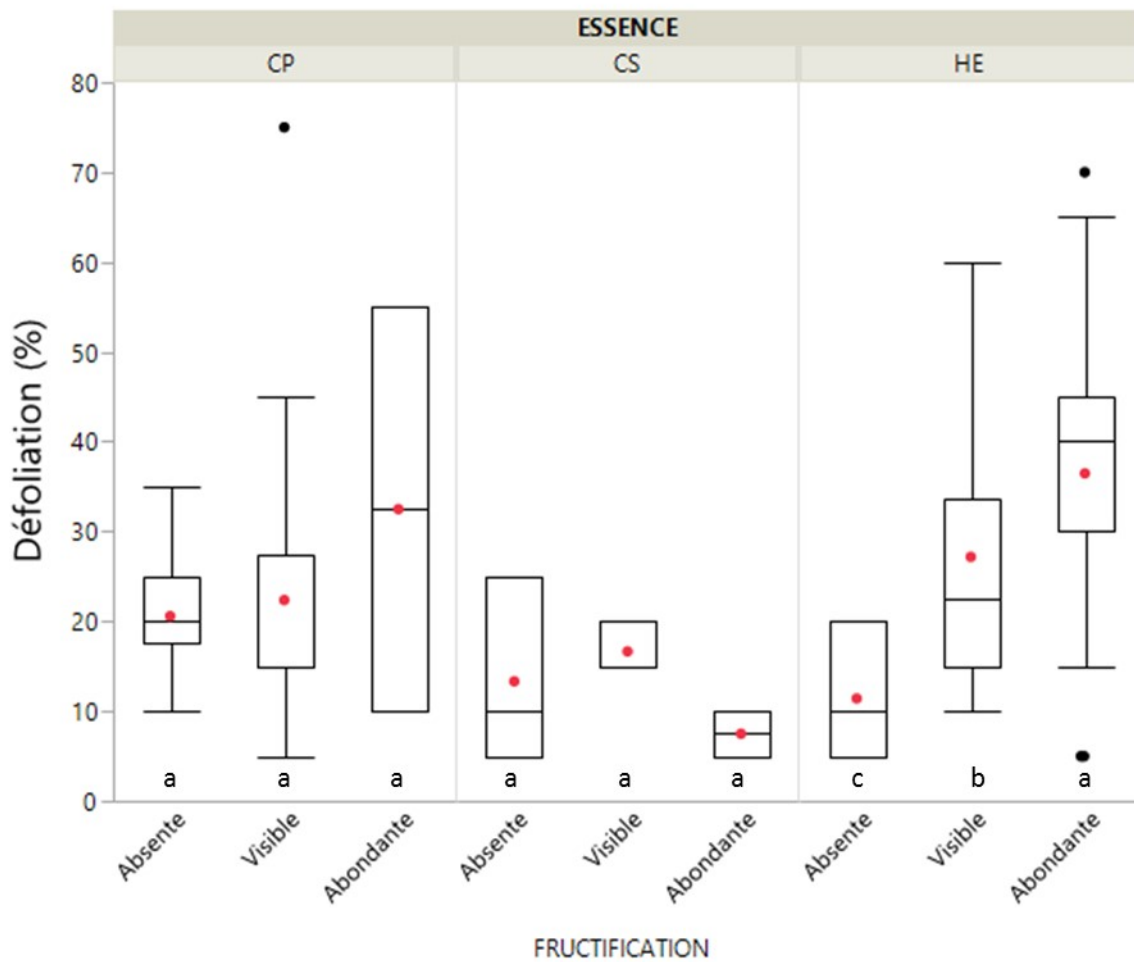


Figure 31: Distribution de la défoliation des chênes et des hêtres selon l'abondance de la fructification en 2016

5.6.6. Défoliation et structure du houppier

Une relation évidente existe entre la défoliation des chênes pédonculés et des hêtres et la forme du houppier (Tableau 12 et Figure 32). 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. 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.

Tableau 12: Résultats des ANOVA testant l'effet de la forme du houppier sur le pourcentage de défoliation

Source	DDL	Somme des carrés	Carrés moyens	F	Pr > F
Chênes 2009	1	303,43	303,43	8,5290	0,0128*
Chênes 2010	2	2307,63	1153,82	20,4749	<0,0001*
Chênes 2011	2	1909,42	954,71	22,40	<0,0001*
Chênes 2012	2	5379,12	2689,56	30,1262	<0,0001*
Chênes 2015	4	3262	815	14,9	<0,0001*
Ch. pédonculés 2013	2	6272,11	3136,05	44,5237	<0,0001*
Ch. pédonculés 2014	2	3392,0635	1696,03	35,9332	<0,0001*
Ch. pédonculés 2016	2	1696	848	5,92	0,006*
Ch. sessiles 2013	1	59,52	59,52	0,6158	0,4682
Ch. sessiles 2014	1	160,0	160,0	5,120	0,0535
Ch. sessiles 2016	0	/	/	/	/
Hêtres 2009	3	13282,31	4427,44	48,1135	<0,0001*
Hêtres 2010	3	14273,48	4757,83	57,82	<0,0001*
Hêtres 2011	3	13569,27	4523,09	48,6669	<0,0001*
Hêtres 2012	3	18713,37	6237,80	75,9415	<0,0001*
Hêtres 2013	7	9228,20	1318,31	14,1760	<0,0001*
Hêtres 2014	6	10774,94	1795,82	24,8564	<0,0001*
Hêtres 2015	6	4476	746	9,52	<0,0001*
Hêtres 2016	7	13503	1929	26,42	<0,0001*

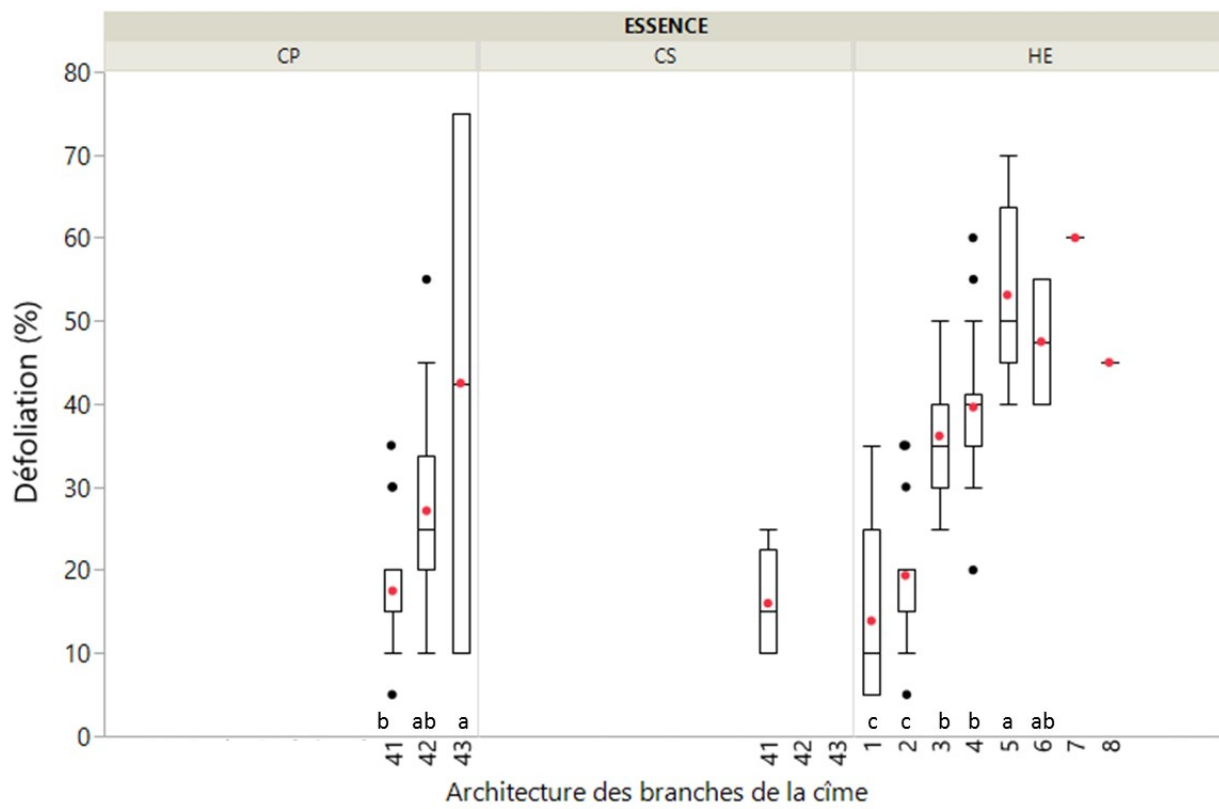


Figure 32: Distribution de la défoliation des hêtres selon la forme du houppier

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 13 reprend l'ensemble des dommages observés en 2016, 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 (48 chênes et 97 hêtres).

Contrairement aux années précédentes, 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 également la mortalité de branches. Elle a été notée sur 38% des arbres, pour les ramilles, 4% pour les branches moyennes et 2% pour les grosses branches. Ces chiffres correspondent bien aux proportions d'arbres dont les structures sont dégradées (classes 4 à 7 ; Figure 26).

Tableau 13: Symptômes et dommages observés et proportion des arbres affectés

Chênes pédonculés				
Partie affectée		Symptômes	Nombre de cas	%arbres observés
Branches	Rameaux latéraux (diamètre<2cm)	Branche morte ou mourante	1	2
Hêtres				
Partie affectée		Symptômes	Nombre de cas	%arbres observés
Feuilles		Manifestation de champignons	1	1
Branches	Rameaux latéraux (diamètre<2cm)	Branche morte ou mourante	45	38
	Branches (diam.>2 et < 10cm)	Branche morte ou mourante	5	4
	Branches (diam.>10cm)	Cassées	2	2
		Branche morte ou mourante	2	2
Tronc	Totalité du tronc	Déformation	4	3
		Ecoulement de sève	1	1
	Entre collet et houppier	Pourriture	3	2
	Collet et racines visibles	Blessures (écorcement, cassures, etc,...)	2	2
		Manifestation de champignons	1	1

6. Proposition d'adaptations méthodologiques

Dans le rapport 2015, nous évoquons les problèmes liés à l'alternance bisannuelle des visites en hêtraie.

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, nous obligeant à restreindre le nombre d'observations pour les analyses de tendance ou l'étude des relations entre facteurs. Dans les faits, les analyses sont donc effectuées sur la moitié des placettes, mais pas chaque année sur les mêmes. On n'y gagne donc pas vraiment en représentativité car il n'est pas possible de comparer statistiquement 2 années consécutives ou d'analyser conjointement les résultats de l'ensemble des placettes. Pour la même raison, la mise en évidence d'effets du climat ou de la fructification est rendue délicate.

Nous avons donc proposé de réduire de 50% le nombre de placettes en hêtraie, mais de visiter annuellement l'ensemble des placettes retenues. Toutefois, lors de la réunion de présentation des résultats, la préoccupation a été exprimée par rapport à la perte d'information que cela représenterait. Les résultats accumulés sur les placettes abandonnées deviendraient inutiles, et le temps qui y a été consacré serait perdu. Nous nous sommes alors engagés à trouver une solution qui permette de limiter la perte d'information, de se donner la possibilité de comparer les années et de conserver la charge de travail actuelle pour les agents.

Nous proposons d'instaurer un suivi annuel, mais uniquement sur tous les hêtres faisant l'objet du suivi photographique, soit 30 arbres. Cet échantillon, déjà sélectionné pour être représentatif de l'échantillon global, permettra d'établir une continuité des observations. De plus, il sera intéressant de disposer de résultats chaque année pour établir plus facilement un lien avec les photographies. Ces arbres sont en effet observés actuellement tous les deux ans (certains les années paires, d'autres les années impaires).

Afin de ne pas engendrer de travail supplémentaire, l'intensification du suivi (transition de bisannuel à annuel) pour ces 30 arbres doit être compensé par l'abandon du suivi (bisannuel) de 30 arbres. Nous avons donc cherché des placettes, totalisant environ 30 arbres, qui sont représentative de l'ensemble de l'échantillon, réparties sur les deux brigades. A cette fin, nous avons calculé pour l'ensemble des placettes les moyennes par placette pour la défoliation (2014 ou 2015), la circonférence, l'indice d'ombrage et l'architecture. Pour ces 2 derniers paramètres, les indices ont été considérés comme des variables numériques étant donné qu'ils se réfèrent à des échelles d'intensité (à l'exception de la classe 8 pour l'architecture, qui a été exclue). Nous avons ensuite réalisé une analyse multifactorielle permettant de tracer un dendrogramme de similarité avec la méthode de Ward (Figure 33) : plus la branche commune à deux individus est éloignée, plus ils sont différents sur base de l'ensemble des variables considérées. A l'aide de ce diagramme, nous avons choisi les placettes les plus différentes possible, en excluant les placettes sélectionnées pour les photos ainsi que les chênaies (quelques hêtres étant situés en chênaie), en cherchant à totaliser environ 30 arbres bien répartis sur les deux brigades, et en essayant de choisir un plus grand nombre d'arbres suivis les années paires (effectifs actuellement supérieurs aux années impaires). Nous avons ensuite vérifié que la distribution des valeurs des placettes exclues était bien similaire à celle des placettes maintenues (Figure 34). Les placettes que nous proposons d'abandonner sont les 3188, 3509, 3511, 4151, 4307 et 4625 (Figure 33).

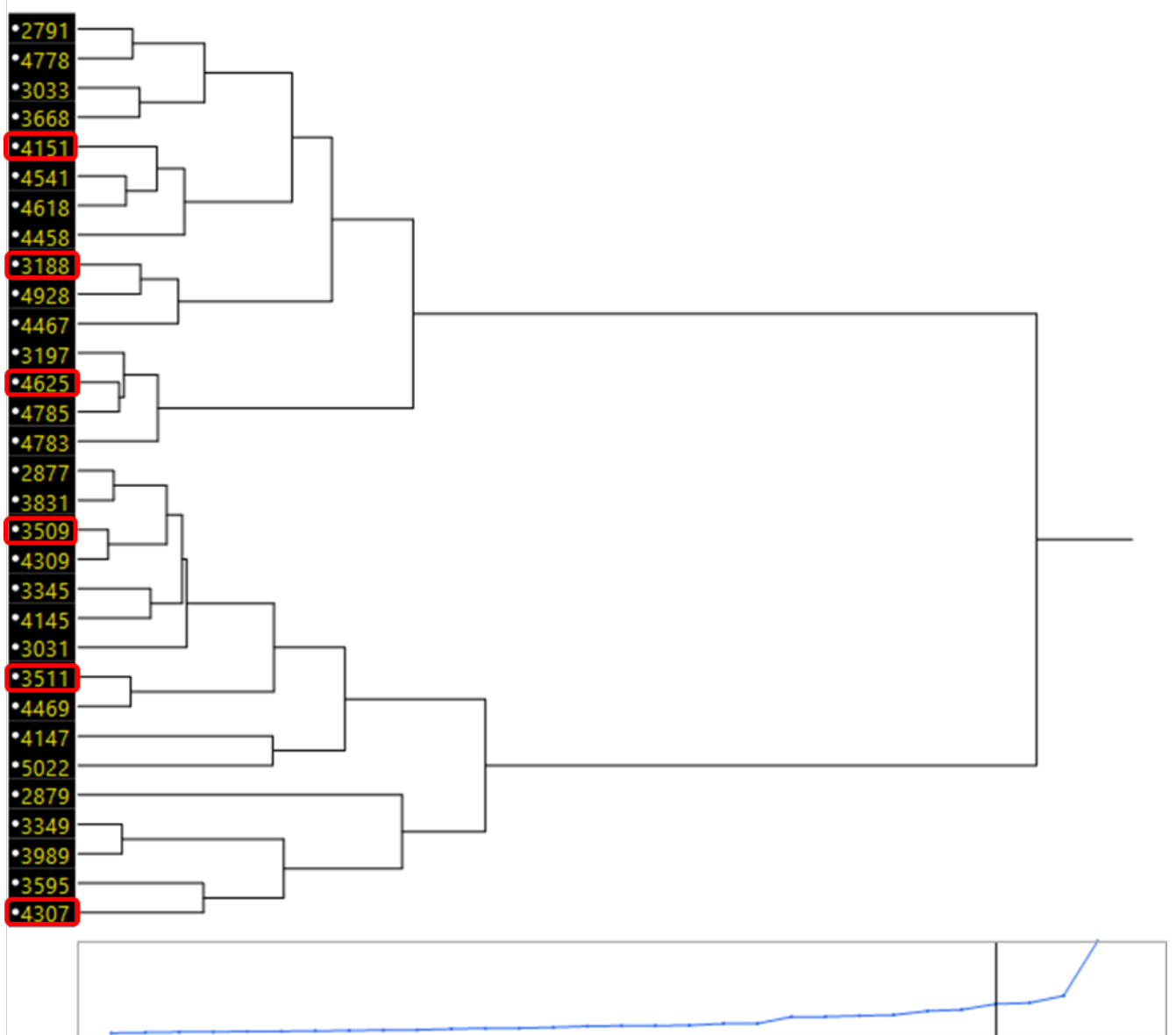


Figure 33 : Dendrogramme de Ward représentant l'apparement des placettes en considérant la défoliation, la concurrence, la circonférence et l'architecture ; les placette entourées de rouges seraient abandonnées.

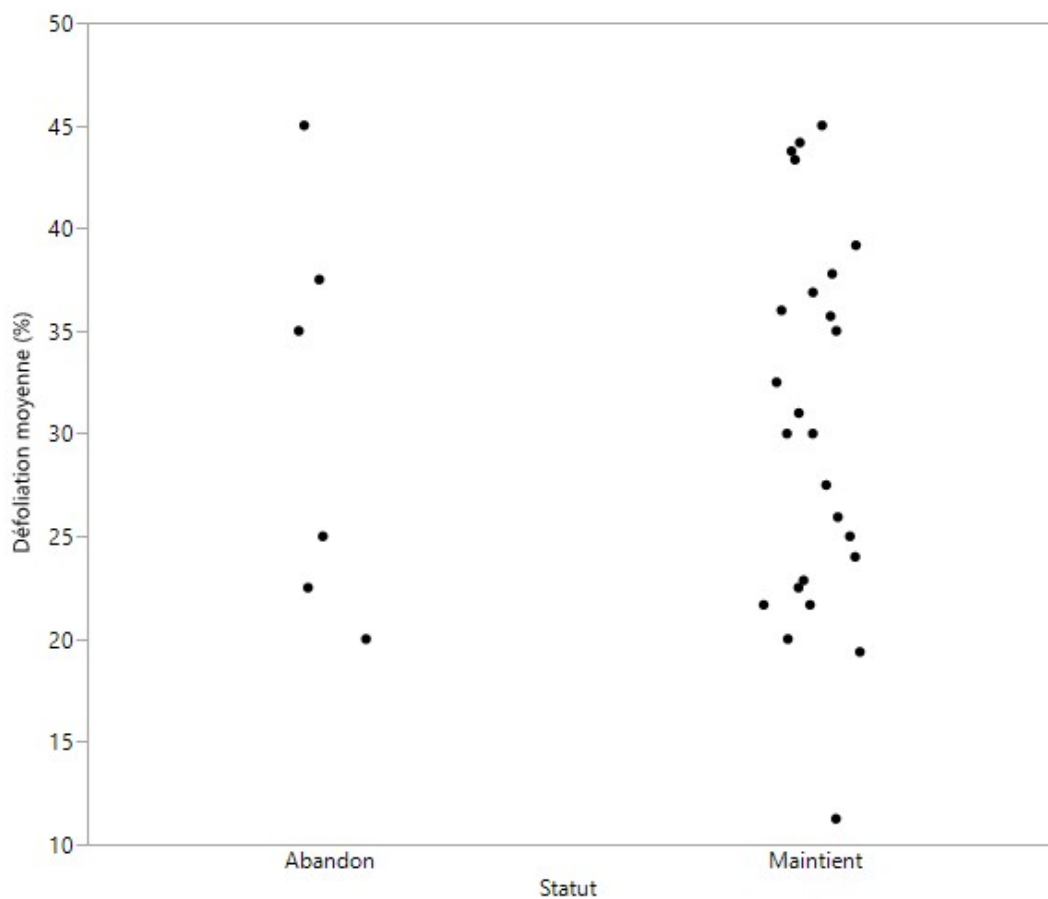


Figure 34 : Distribution des valeurs de défoliation moyennes pour les placettes qui seraient abandonnées et les placettes maintenues

7. Suivi photographique des houppiers à partir du sol

7.1. Sélection des arbres

Les arbres ont été sélectionnés au cours de la campagne 2015, mais nous avons mis en évidence dans le rapport qu'il serait souhaitable d'y ajouter un ou deux hêtres de faible dimension présentant une faible défoliation. Nous avons identifié une liste d'une quinzaine de candidats, mais un seul a été retenu après visite sur le terrain (4778-15), sur base de la possibilité de photographier la couronne correctement. La liste complète est reprise dans le Tableau 14. Il est à noter que l'arbre 5022-104 s'est cassé cet automne sous l'effet du vent et qu'il ne sera donc plus suivi.

Tableau 14 : Arbres sélectionnés pour le 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
	104	HE	25	208

7.2. Résultats

Après 2 années de suivi, nous sommes en mesure d'utiliser les photos pour étudier les évolutions intervenues en un an.

De façon générale, les photographies des couronnes durant l'été confirment la nette augmentation de la défoliation des hêtres et plus particulièrement l'augmentation de la transparence (Figure 35 à Figure 37). Nous ne pouvons comparer aux chiffres de défoliation correspondants, car ces arbres sont actuellement évalués sur base bisannuelle. Malgré les différences d'apparence des photos, liées aux différences de position du soleil et de balance des blancs, il est parfaitement possible de noter les différences très marquées de densité foliaire. Un traitement numérique des images pourrait permettre de quantifier automatiquement ce paramètre, mais l'on est confronté au problème de délimitation de la couronne. Le traçage du contour de la couronne est nécessaire, mais très subjectif. Or, le moindre écart engendrera une importante différence en terme de transparence. Nous envisageons de travailler sur cette question en 2017.



Figure 35 : Photographies de la couronne de l'arbre 5 de la placette 2877 en 2015 et en 2016



Figure 36 : Photographies de la couronne de l'arbre 2 de la placette 3349 en 2015 et en 2016



Figure 37 : Photographies de la couronne de l'arbre 4 de la placette 4309 en 2015 et en 2016

Le suivi photographique permet en outre de suivre l'évolution de l'architecture de l'arbre, en se basant sur les images des cimes. En été, il est possible de détecter les branches nouvellement mortes (Figure 38). Cette année, ce phénomène concerne un nombre très limité d'arbres, ce qui confirme que l'architecture s'est peu dégradée depuis 2015, et que l'augmentation de la défoliation est surtout attribuée à une diminution de la densité foliaire. En hiver, il est possible de détecter les branches tombées et de mesurer la croissance des rameaux (Figure 39). Entre 2015 et 2016, nous n'observons pratiquement aucun développement de nouvelles ramilles et aucun allongement des existantes, ce qui est lié à la forte fructification.



Figure 38 : Comparaison des photographies estivales de la cime de l'arbre 2 de la placette 3349 en 2015 et 2016, indiquant la mort de certaines branches durant cette période



Figure 39 : Comparaison des photographies hivernales de la cime de l'arbre 4 de la placette 3031 en 2015 et 2016, montrant la perte de certaines branches durant cette période

7.5. Perspectives

L'étape de sélection des arbres et des points de prise de vue est à présent terminée. Les premiers résultats montrent que la comparaison visuelle des images d'années successives apporte de nombreuses informations qui confirment et expliquent les tendances dérivées des observations de terrain. Le traitement automatisé de ces images pourrait être envisagé, mais demandera probablement un important travail de mise au point (recadrage, délimitation de la couronne, détection des « morceaux » de ciel, ...).

8. Conclusion générales et perspectives

La campagne d'observation de 2016 a mis en évidence une forte augmentation de la défoliation des hêtres entre 2014 (23%) et 2016 (33%). Notons que ce paramètre s'élevait à 26% en 2015, mais il ne s'agit pas du même échantillon d'arbres. Cette augmentation n'est pas liée à des défoliateurs, car aucun dégât ne leur a été attribué cette année. Elle n'est pas non plus liée à une détérioration de l'architecture, cette dernière a peu évolué. Elle est essentiellement liée à une diminution de la densité de feuilles induite vraisemblablement par la très forte intensité de fructification cette année. La situation n'est donc pas alarmante. Il sera toutefois important de vérifier si les arbres retrouvent en 2017 leur densité foliaire de 2015.

Pour le chêne pédonculé, les valeurs moyennes de défoliation sont semblables à celle de la période 2012-2014 (22%), et inférieure à celles de 2015 (26%). La structure de la cime s'est également améliorée cette année. Pour le chêne sessile, les valeurs de défoliation sont stables et basses (13%). Aucun dégât de chenille n'a été observé cette année pour aucune des deux essences, ce qui a probablement contribué à la diminution de la défoliation pour le chêne pédonculé. Cette année est également caractérisée par la fructification la plus abondante depuis le début du suivi pour les deux essences. L'intensité reste toutefois bien plus faible que pour le hêtre, et sans conséquence apparente sur la densité foliaire.

Au niveau climatique, l'année 2016 est caractérisée par une sécheresse de fin de saison. Elle n'a pas eu de conséquence sur la défoliation car elle s'est installée après l'évaluation. Il est possible toutefois qu'elle affecte l'état sanitaire des arbres en 2017, surtout si les réserves en eau des sols ne peuvent être complètement reconstituées avant le printemps.

Le protocole de suivi photographique a été finalisé cette année, avec la sélection du dernier hêtre. Les comparaisons 2015-2016 confirment une forte diminution de la densité foliaire des hêtres, sans détérioration significative de la structure. Elles ont également mis en évidence une croissance très faible des ramilles cette année, qui est attribuée à la fructification intense.

Sur base des propositions de modifications du protocole suggérées dans le rapport précédent et des remarques reçues lors du comité d'accompagnement, nous proposons une solution permettant à la fois d'étudier les variations interannuelles en hêtraie et de ne « sacrifier » qu'un nombre limité de placettes. Cette proposition consiste à observer chaque année l'ensemble des arbres sélectionnés pour le suivi photographique (30 hêtres et 10 chênes) et d'abandonner 6 placettes en hêtraie qui sont représentatives de l'ensemble de l'échantillon et qui totalisent 32 arbres.

Annexe 1 : Effectifs cotés et défoliations moyennes par essence et par placette

Essence	Placette	Effectif	Défoliation moyenne
Chênes pédonculés			
	2791	3	28
	2877	1	25
	3197	3	18
	3595	3	23
	4151	5	16
	4449	11	17
	4529	11	29
	4781	3	22
Chênes sessiles			
	2791	4	18
	4147	3	8
	4529	1	10
Hêtres			
	2791	6	31
	2877	9	38
	2879	1	45
	3197	8	33
	3509	6	35
	3511	7	45
	3595	1	40
	3831	6	39
	4145	8	37
	4147	6	44
	4151	2	25
	4458	5	35
	4467	4	11
	4469	4	44
	4778	8	19
	4783	7	23
	4785	6	22
	5022	3	43