

Université catholique
de Louvain



Bruxelles-Environnement
BE-IBGE



Earth and Life Institute
Environmental
Sciences



Suivi de l'état sanitaire en forêt de Soignes bruxelloise 2015

Réalisation
Technicien
Promoteur

Hugues Titeux
Frédéric Hardy
Quentin Ponette

Janvier 2016

Convention UCL – Bruxelles Environnement 2015

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 2015, 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 129 arbres (48 chênes indigènes et 81 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 résultats de la campagne 2015 ont été jugés « très fiables » à la suite du contrôle qualité.

Ils ont mis en évidence une stabilisation des valeurs de défoliation moyenne des hêtres depuis 2013 (26%), cette valeur étant significativement plus basse qu'en 2011 (29%). Nous avons mis en évidence que cette diminution est liée à la forte baisse des valeurs de défoliation de quelques arbres, plutôt qu'à une baisse modérée et généralisée.

Pour le chêne, les valeurs moyennes de défoliation de 2015 sont identiques à celles de 2012 (24%), avec une forte disparité entre les individus : augmentation pour certains compensée par une baisse

pour d'autres. La comparaison par rapport à 2014 est délicate car ces dernières valeurs sont probablement biaisées.

Les dommages observés, principalement des branches mortes et des dégâts d'insectes défoliateurs, sont en forte diminution depuis plusieurs années, aussi bien pour les hêtres que pour les chênes.

Au niveau de la structure, nous observons une légère détérioration entre 2013 et 2015 pour les hêtres. La structure des chênes se serait détériorée entre 2014 et 2015 alors qu'elle s'était améliorée au cours des années précédentes.

Le protocole du suivi photographique a été affiné cette année. Un échantillon de 30 hêtres et 10 chênes ont été sélectionnés : ils représentent bien la variabilité des arbres étudiés, au niveau des classes de défoliation et de circonférence. Les houppiers et la cime de ces arbres ont été photographiés cette année en été et en hiver. La concurrence des couronnes voisines a été quantifiée via des prises de vue verticales effectuées à proximité du tronc.

Date de fin : Février 2016.

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 2015.....	16
4.1. Plan d'échantillonnage	16
4.2. Protocole d'évaluation.....	18
5.1.1. La défoliation, indicateur de vitalité des arbres	18
4.3. Caractéristiques des arbres observés.....	20
4.3.1. Effectifs et distribution des arbres en classes de grosseurs	20
4.3.2. Concurrence – Indice d'ombrage.....	21
4.3.3. Statut social.....	22
4.3.4. Visibilité.....	23
4.4. Encodage et traitement des données.....	24
4.5. Contrôle-qualité.....	24
5. Résultats.....	27
5.1. Défoliation	27
5.1.2. Défoliation moyenne des arbres de la campagne 2015	27
5.1.3. Evolution de la défoliation moyenne de 2009 à 2015	31
5.1.4. Evolution de la défoliation d'un même échantillon d'arbres	32
5.2. Fructification.....	34
5.3. Structure de la couronne	35
5.4. Pousses épïcormiques	39
5.5. Décoloration des feuilles	39
5.6. Lien entre la défoliation et d'autres variables.....	41
5.6.1. Analyses statistiques.....	41
5.6.2. Défoliation et circonférence	41
5.6.3. Défoliation et concurrence	44
5.6.4. Défoliation et décoloration.....	47
5.6.5. Défoliation et fructification.....	49
5.6.6. Défoliation et forme du houppier.....	52
5.7. Dommages.....	55
5.7.1. Distribution des dommages	55
6. Proposition d'adaptations méthodologiques	57
7. Suivi photographique des houppiers à partir du sol	58
7.1. Sélection des arbres	58
7.2. Types de prises de vues.....	62
7.3. Caractéristiques des photographies.....	65
7.4. Nomenclature	65
7.5. Perspectives	66
8. Conclusion et perspectives	67
Références bibliographiques	68

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)	17
Figure 6 : Distribution des arbres observés selon les classes de circonférence	21
Figure 7 : Distribution des arbres selon le degré de concurrence (2015)	22
Figure 8: Proportion des statuts sociaux en fonction des essences (2015)	23
Figure 9: Distribution des arbres en fonction de la visibilité et de l'essence (2015)	24
Figure 10 : 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 %	26
Figure 11 : Informations dérivées des graphiques en boîtes à moustaches (box-plot)	27
Figure 12 : Défoliation des chênes et des hêtres en 2015 ; les moyennes sont représentées par un point rouge et les valeurs extrêmes par un point gris	28
Figure 13 : 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)	29
Figure 14 : Distribution des valeurs de défoliation selon la classe de visibilité (1 : bien visible → 4 : très peu visible)	30
Figure 15 : Tables de contingence reliant la visibilité des couronnes et l'indice d'ombrage	30
Figure 16 : Evolution de la défoliation des hêtres et des chênes de 2009 à 2015	31
Figure 17: Evolution de la défoliation des 31 chênes observés durant les 4 campagnes de 2012 à 2015	32
Figure 18: Evolution de la défoliation des 41 hêtres observés en 2011, 2013 et 2015	33
Figure 19 : Comparaison des classes de défoliation de 2012 et 2015 pour les 31 chênes observés durant toute cette période (la taille des bulles correspond au nombre de points ayant les mêmes coordonnées)	33
Figure 20 : Comparaison des classes de défoliation de 2011 et 2015 pour les 31 chênes observés durant toute cette période (la taille des bulles correspond au nombre de points ayant les mêmes coordonnées)	34
Figure 21 : Evolution du degré de fructification de 2009 à 2015 pour les chênes et les hêtres	35
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	35
Figure 23: Fiche de terrain différenciant les 8 formes du houppier du hêtre	37
Figure 24 : Distribution des chênes selon la structure de la couronne pour les chênes	38
Figure 25 : Distribution des hêtres selon la structure de la couronne	38
Figure 26 : Distribution des arbres selon l'abondance des pousses épïcormiques	39
Figure 27: Distribution des arbres selon le pourcentage de décoloration du feuillage	40
Figure 28 : Régression linéaire de la défoliation des hêtres en fonction de la circonférence en cm (C150) en 2015	43
Figure 29: Défoliation des chênes indigènes et des hêtres selon l'indice d'ombrage en 2015	45
Figure 30: Distribution de la défoliation des chênes indigènes et hêtres selon la classe de décoloration en 2015	47
Figure 31: Distribution de la défoliation des chênes et des hêtres selon l'abondance de la fructification en 2015	51
Figure 32: Distribution de la défoliation des hêtres selon la forme du houppier	54

Figure 33 : Distribution des hêtres selon les classes de défoliation, pour le suivi photographique et pour l'ensemble des observations 2014 et 2015.	60
Figure 34 : Distribution des hêtres selon les classes de c150, pour le suivi photographique et pour l'ensemble des observations 2014 et 2015.....	60
Figure 35 : Distribution des chênes selon les classes de défoliation, pour le suivi photographique et pour l'ensemble des observations 2014 et 2015	61
Figure 36 : Distribution des chênes selon les classes de c150, pour le suivi photographique et pour l'ensemble des observations 2014 et 2015.....	61
Figure 37 : Illustration des prises de vue de type « H » et « C » pour l'arbre 7 de la placette 2877	63
Figure 38 : Illustration des prises de vue de type verticales pour l'arbre 7 de la placette 2877	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 2015 comparées aux normales mensuelles calculées sur la période 1981-2010 (IRM, Uccle)	15
Tableau 3 : Placettes des sous-échantillons. Les numéros correspondent aux identifiants des placettes	16
Tableau 4 : Effectifs (placettes, arbres) lors des campagnes d'observation de 2009 à 2015	20
Tableau 5 : Effectifs des arbres observés durant la campagne 2015.....	20
Tableau 6 : Moyenne des écarts de défoliation par essence observée en 2015 et résultats des tests t de Student	26
Tableau 7: Moyenne de défoliation par année et essence	31
Tableau 8 : Corrélations entre la circonférence et la défoliation en fonction de l'essence et de l'année	42
Tableau 9: Résultats des régressions linéaires entre la circonférence (y ; cm) et la défoliation (x ;%) par essence et par année.....	42
Tableau 10: Résultats des ANOVA testant l'impact de l'indice d'ombrage sur la défoliation	46
Tableau 11: Résultats des ANOVA testant l'impact de la décoloration sur la défoliation	48
Tableau 12: Résultats des ANOVA testant l'impact de la fructification sur la défoliation.....	50
Tableau 13: Résultats des ANOVA testant l'effet de la forme du houppier sur le pourcentage de défoliation	53
Tableau 14: Symptômes et dommages observés et proportion des arbres affectés	56
Tableau 15 : Arbres sélectionnés pour le suivi photographique.....	59

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.

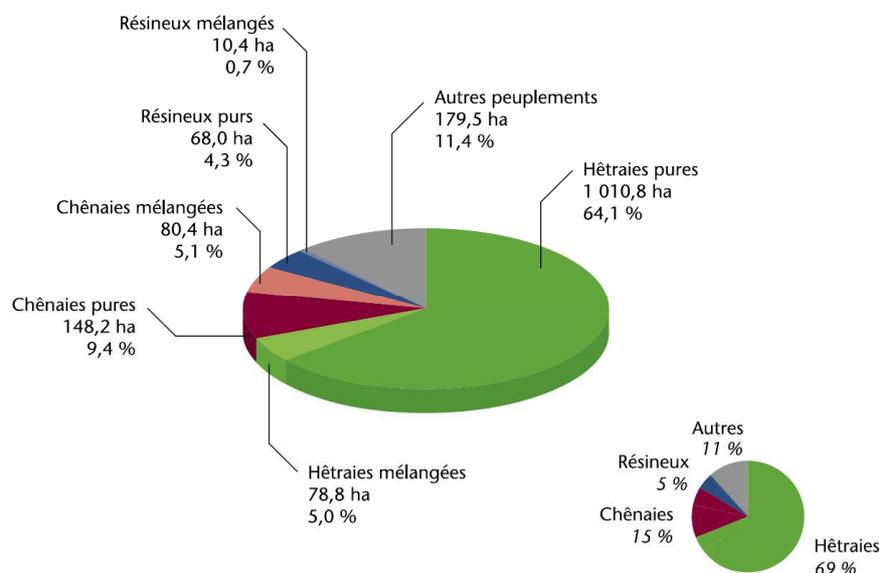


Figure 1: Proportion des types de peuplements en forêt de Soignes bruxelloise (Braem *et al.*, 2010)

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

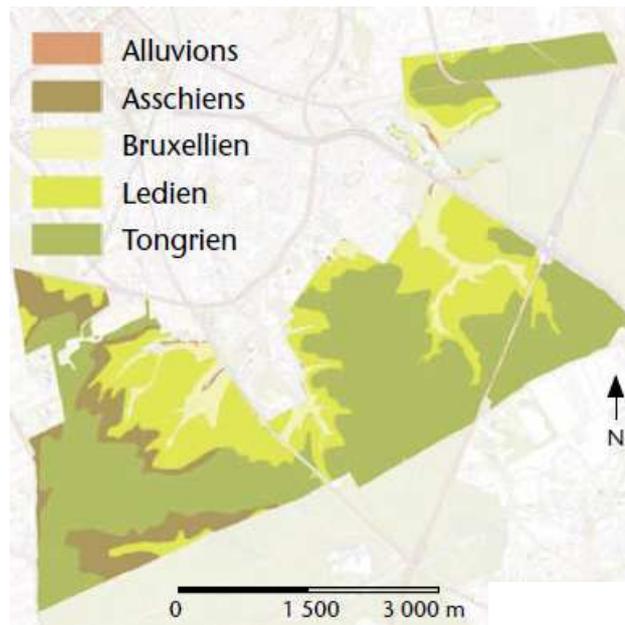


Figure 2: Roche-mère géologique présente sous le limon éolien. Les teintes jaunes présentent les assises à dominance sableuse (source: carte géologique de la Belgique, numérisation: BE-IBGE)

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.

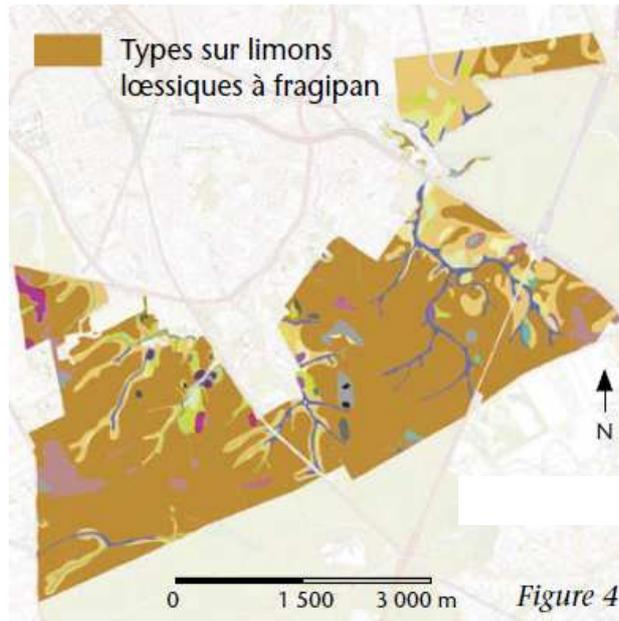


Figure 3 : Les sols de la Forêt de Soignes sont dominés par le type Abc interprété comme étant un sol limoneux à fragipan (source: cartes des sols de Belgique; numérisation BE-IBGE)

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

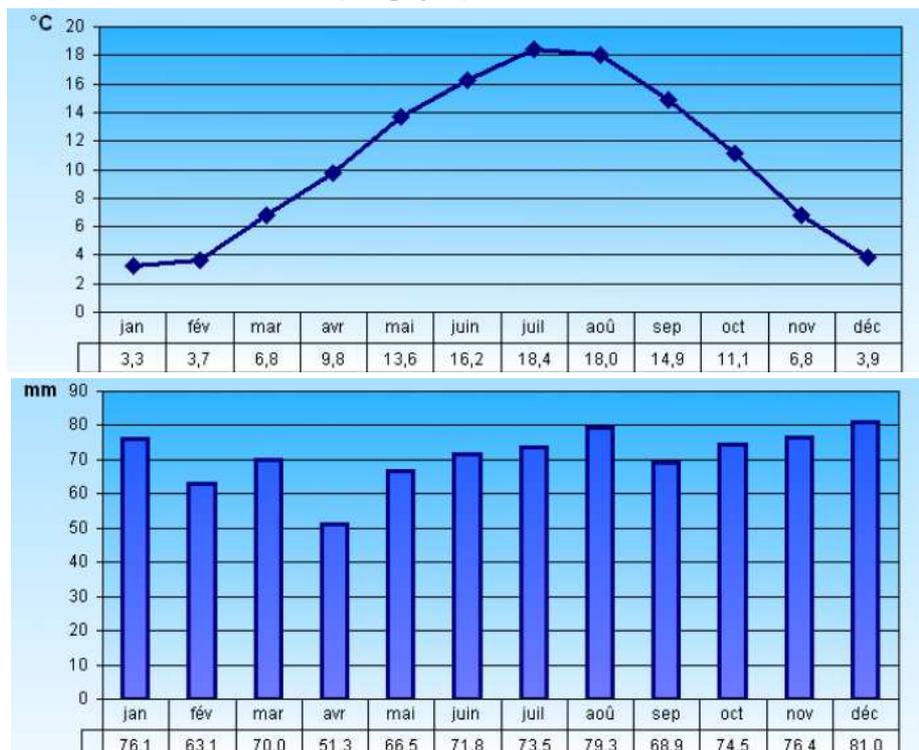


Figure 4 : Température et précipitations mensuelles mesurées à la station météorologique d'Uccle, 1981-2010 (IRM, 2011).

Les valeurs météorologiques mesurées à Uccle en 2015 sont présentées au Tableau 2. Par rapport aux normales mensuelles observées de 1981 à 2010, les précipitations totales de tous les mois considérés sont plus faibles que la normale, voire nettement plus faibles. Cette année est donc caractérisé par un important déficit de précipitations durant la période de végétation. Quant-aux températures, nous observons des valeurs proches des normales au printemps et légèrement supérieures en été. Le risque de déficit hydrique est donc élevé cette année. Sa sévérité et son impact sur la végétation dépendra de la capacité de stockage en eau dans le sol et de la distribution des racines.

Tableau 2 : Valeurs climatiques mesurées en avril, mai, juin, juillet et août 2015 comparées aux normales mensuelles calculées sur la période 1981-2010 (IRM, Uccle)

	P (mm)	P normale (mm)	T moy (°C)	T normale (°C)
Avril 2015	24,4	51,3	10,3	9,8
Mai 2015	62,6	66,5	13,1	13,6
Juin 2015	53,4	71,8	16,5	16,2
Juillet 2015	35,5	73,5	19,0	18,4
Août 2015	68,7	79,3	19,4	18

4. Mise en place de la campagne du suivi sanitaire de 2015

Les activités suivantes ont été réalisées en 2015 :

- (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 23 juin 2015
 - b. La revisite de 11 placettes du suivi sanitaire par l'UCL
- (iii) Le traitement et l'interprétation des données

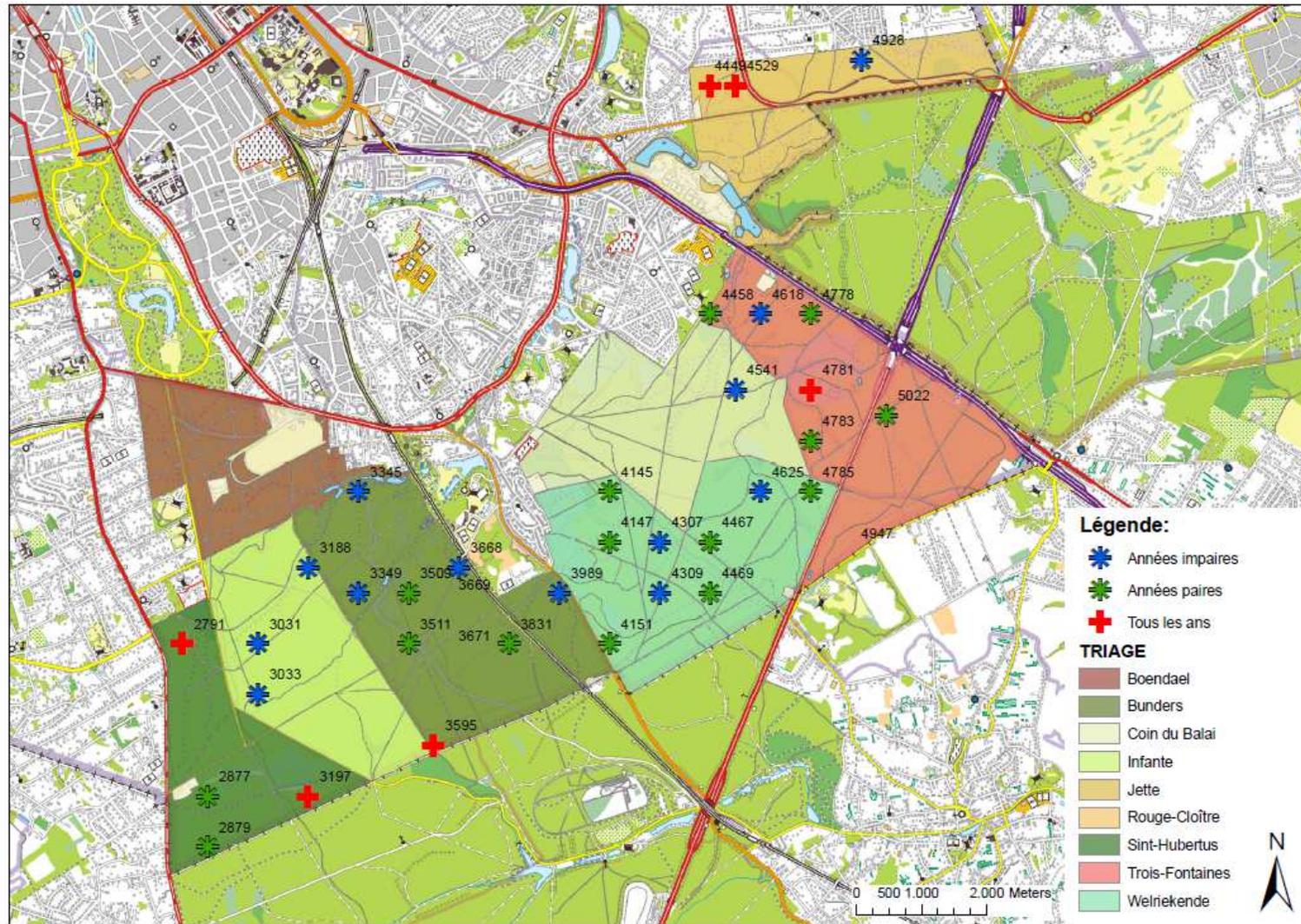
4.1. Plan d'échantillonnage

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 2015 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 chânaie (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 2015, 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.

4.3. Caractéristiques des arbres observés

4.3.1. Effectifs et distribution des arbres en classes de grosseurs

Les effectifs de 2015 sont légèrement inférieurs à ceux de l'année 2012 (Tableau 4). Certaines placettes ont 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.

Tableau 4 : Effectifs (placettes, arbres) lors des campagnes d'observation de 2009 à 2015

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

Les effectifs considérés pour caractériser les arbres observés lors de la campagne 2015 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, les arbres dont la défoliation n'a pas été notée (mauvaise visibilité) ainsi que les arbres dans l'identification est incertaine (problèmes de positionnement). Durant la campagne 2015, l'échantillon retenu pour l'analyse de l'état sanitaire inclus 48 chênes indigènes et 81 hêtres sur 19 placettes, soit un total de 129 arbres (voir Tableau 5). La présentation des caractéristiques de l'échantillon dans ce chapitre (classes de circonférences, ombrage, etc.) porte sur ces 129 arbres.

Pour le calcul des fréquences des dommages, l'observation porte sur les mêmes arbres que pour l'état sanitaire, mais seuls 12 hêtres et 14 chênes indigènes présentaient au moins un dommage visible.

Tableau 5 : Effectifs des arbres observés durant la campagne 2015.

Effectifs	Hêtres	Chêne non spécifié	Chênes pédonculés	Chênes sessiles
Observés	106	4	43	7
Retenus pour caractérisation de l'état sanitaire	81	3	38	7
Dommage(s) observé(s)	12	0	9	5

Par rapport à 2014, on observe une diminution de la proportion des chênes sessiles : 13% en 2015 contre 19% en 2014. Cette diminution est liée à la présence de petits fruits lors de la journée de « formation » au mois de juin, qui a conduit à reconsidérer l'identification de certains individus « compliqués ». Etant donné le faible effectif de chênes sessiles, leur mauvaise répartition spatiale (6 sur 7 dans la placette 2791) et la difficulté d'obtenir une identification certaine, il a été décidé de ne pas séparer les deux essences pour l'interprétation des résultats de 2015.

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

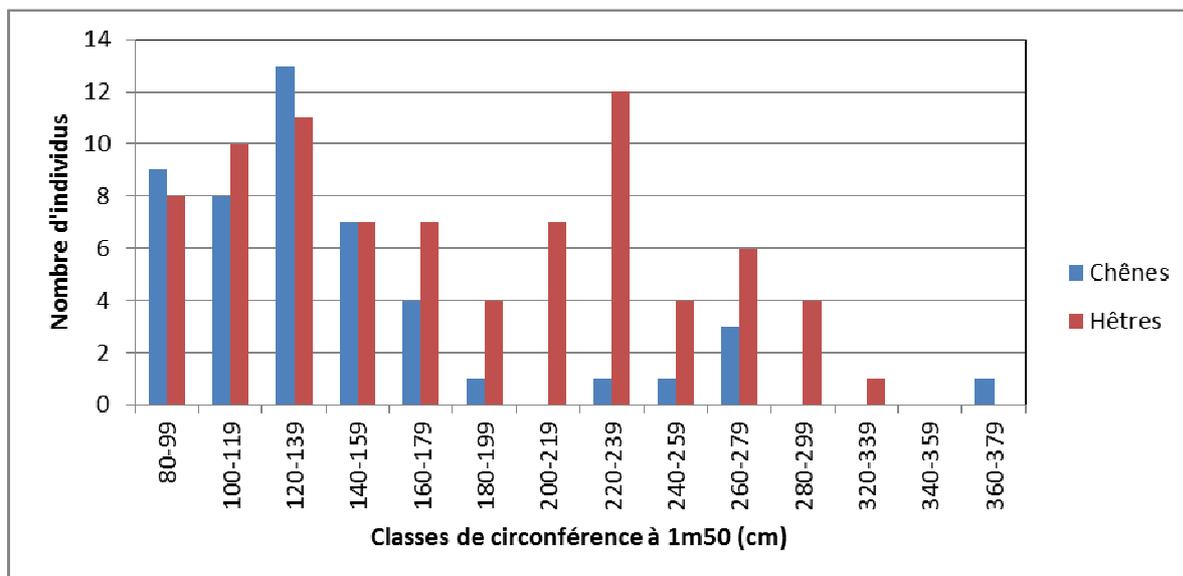


Figure 6. Nous observons une sous-représentation des chênes de circonférence « moyenne » (180 cm à 260 cm), tandis que les hêtres sont mieux distribués, avec une classe 220-239 sur-représentée.

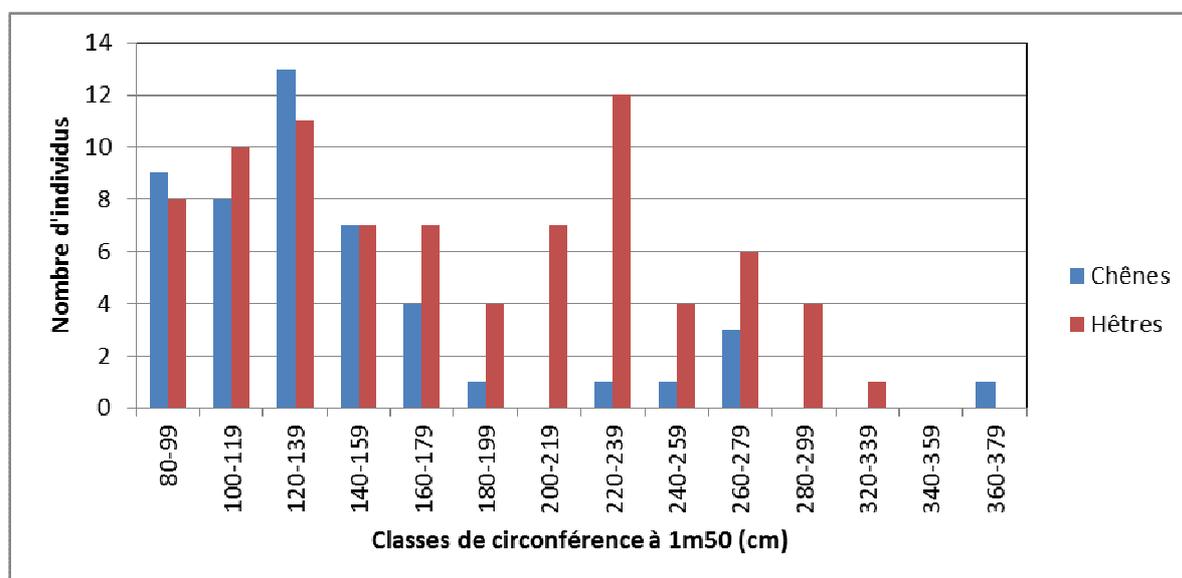


Figure 6 : Distribution des arbres observés selon les classes de circonférence

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 chênes sont touchés par 2 ou 3 côtés, tandis que les hêtres sont bien répartis selon les catégories « 2 côtés », « 3 côtés » et « 4 côtés ». La proportion de chênes en croissance libre (9%) est plus élevée que pour les hêtres (2%).

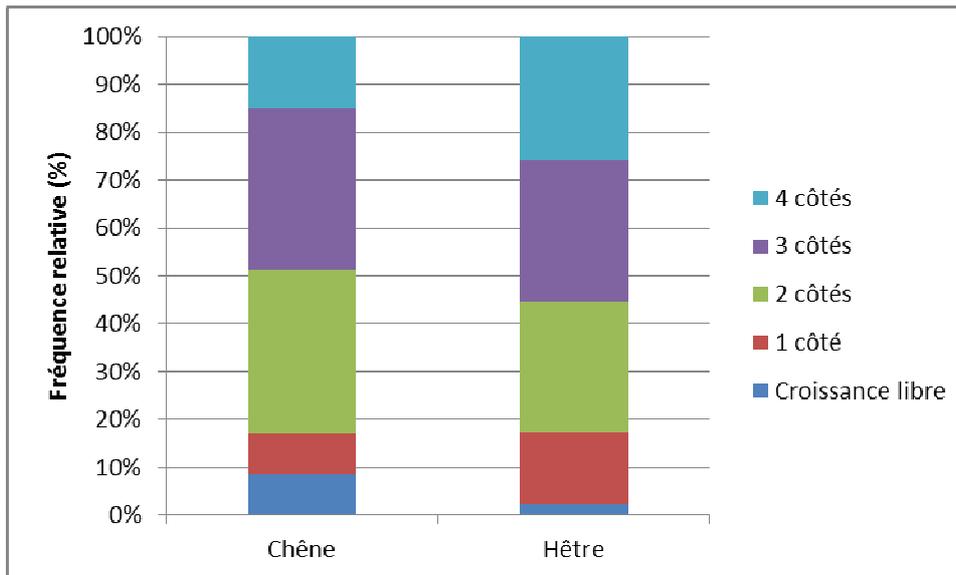


Figure 7 : Distribution des arbres selon le degré de concurrence (2015)

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 dépassé par les cimes voisines 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 : 79% des chênes et 65% des hêtres étudiés sont co-dominants

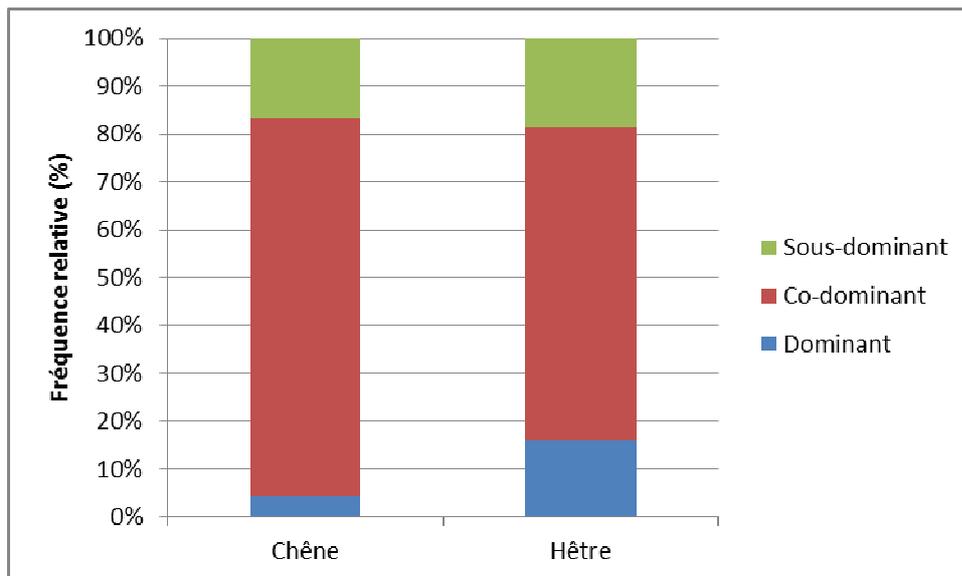


Figure 8: Proportion des statuts sociaux en fonction des essences (2015)

4.3.4. Visibilité

La visibilité concerne la possibilité d’observer le houppier de façon optimale, soit en vue latérale, selon en 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 seuls 17% des chênes indigènes et 33% des hêtres présentent une couronne bien visible. Pour 12% des chênes et 19% des hêtres, la couronne est non visible latéralement, ce qui signifie que ces arbres ont été observés par le bas.

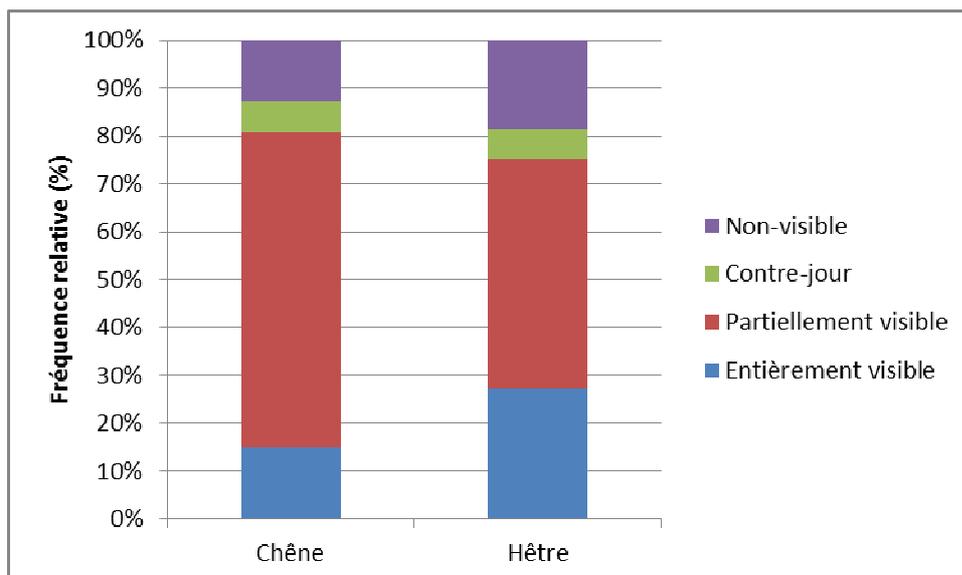


Figure 9: Distribution des arbres en fonction de la visibilité et de l'essence (2015)

4.4. Encodage et traitement des données

L'ensemble des données recueillies durant la campagne 2015 ont été encodées dans la base de données MS Access, puis exportées en *MS Excel* pour effectuer les illustrations et préparer les traitements statistiques (logiciel *JMP pro 12*).

4.5. Contrôle-qualité

La méthode de diagnostic de l'état sanitaire étant basé 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 objectifs de la journée du 23 juin 2015 étaient de (i) présenter les résultats de la campagne 2014, (ii) rappeler la nouvelle classification des formes du houppier du hêtre et de (iii) rappeler les critères permettant l'évaluation de la défoliation des chênes indigènes et du hêtre, avec un accent particulier sur l'évaluation du chêne pédonculé. Les arbres d'entraînement sont les mêmes qu'en 2014, 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. En outre, nous avons visité des placettes de chênes qui ont posé problème lors du contrôle de 2014, en raison de la mauvaise visibilité des arbres et de déformations de cimes liées à de la concurrence ancienne.

Pour assurer le contrôle-qualité des données, l'équipe de référence de l'UCL a revisité six placettes en hêtraie (n° 3031, 3345, 3349, 3989, 4309, 4618, 4625, 4928) ainsi que trois placettes en chênaie (n° 3595, 4449 et 4781) durant le mois de juillet. Au sein de ces huit 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 56 arbres a été contrôlé, cet échantillon comprend 17 chênes et 39 hêtres soit respectivement 35% et 48% des effectifs retenus pour le diagnostic sanitaire (voir Tableau 6). La proportion de cote de défoliation ne variant pas de plus de 10% près entre les deux équipes atteint 88% pour les chênes et 89% pour les hêtres. Pour toutes essences confondues, 89% des arbres observés deux fois ont la même cotation à 10% près; les critères de qualité exigés par le protocole sont donc respectés. La

Figure 10 illustre la bonne correspondance entre les valeurs UCL et IBGE. Nous observons qu'1 hêtre présente une cotation très différente entre les deux équipes, probablement en raison d'une mauvaise identification. La localisation des arbres est parfois compliquée du fait de la disparition d'arbres « repères », permettant de situer le centre des placettes.

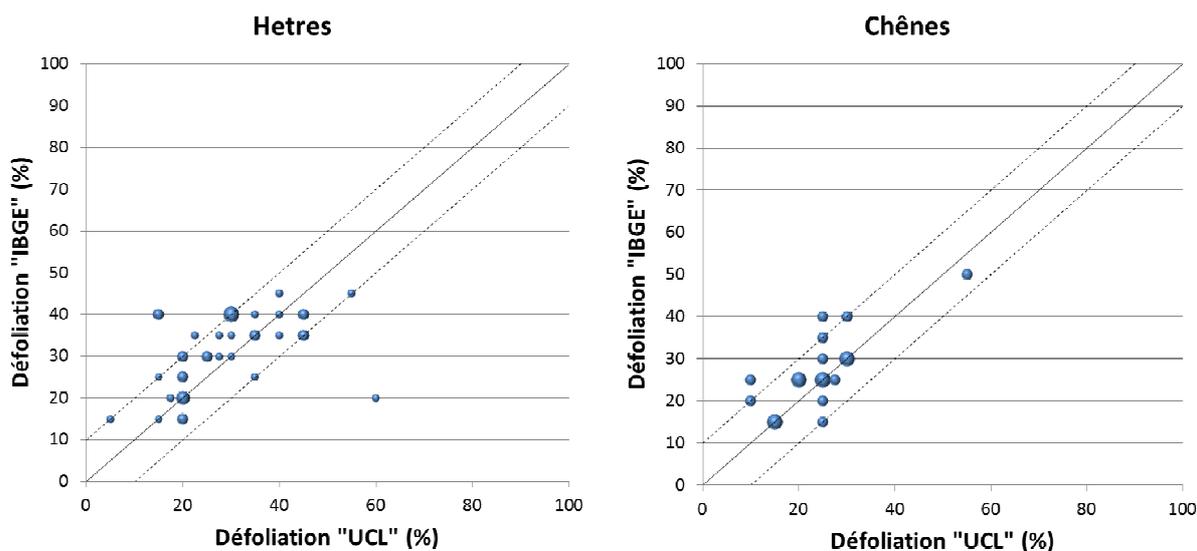


Figure 10 : Comparaison des valeurs de défoliation selon les équipes IBGE et UCL ; la surface des bulles illustre le nombre de points de mêmes coordonnées ; la droite continue correspond au rapport 1:1 ; les droites pointillées correspondent aux seuils de +/- 10 %.

Tableau 6 : Moyenne des écarts de défoliation par essence observée en 2015 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
Chênes	17	35	24	27	3	Prob.> t = 0,09
Hêtres	39	48	29	31	2	Prob.> t = 0,21

Nous observons également que la moyenne des écarts de défoliation entre IBGE et l'UCL est de 3 % pour les chênes et de 2 % pour les hêtres. Les tests appariés (Student) indiquent que ces différences ne sont pas significativement différentes de 0 (voir dernière colonne du Tableau 6).

Nous pouvons donc conclure que les résultats du contrôle sont très bons et que les données 2015 sont parfaitement fiables.

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 11.

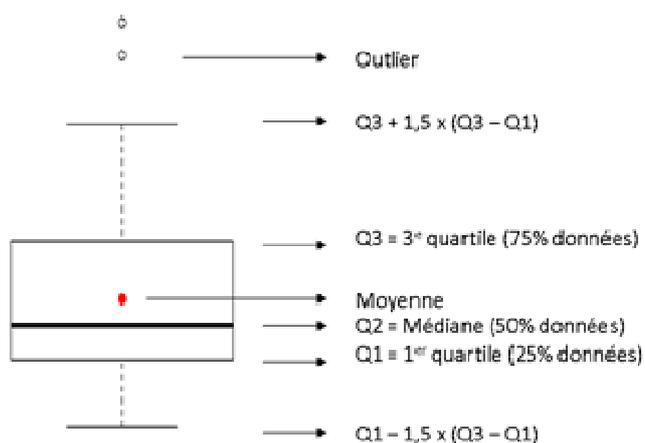


Figure 11 : Informations dérivées des graphiques en boîtes à moustaches (box-plot)

5.1.2. Défoliation moyenne des arbres de la campagne 2015

La Figure 12 présente la distribution des valeurs de défoliation pour les échantillons de 48 chênes et les 81 hêtres répartis au sein des 19 placettes. La défoliation moyenne est de 24% pour les chênes et de 26% 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 31% pour les chênes et 43% pour les hêtres.

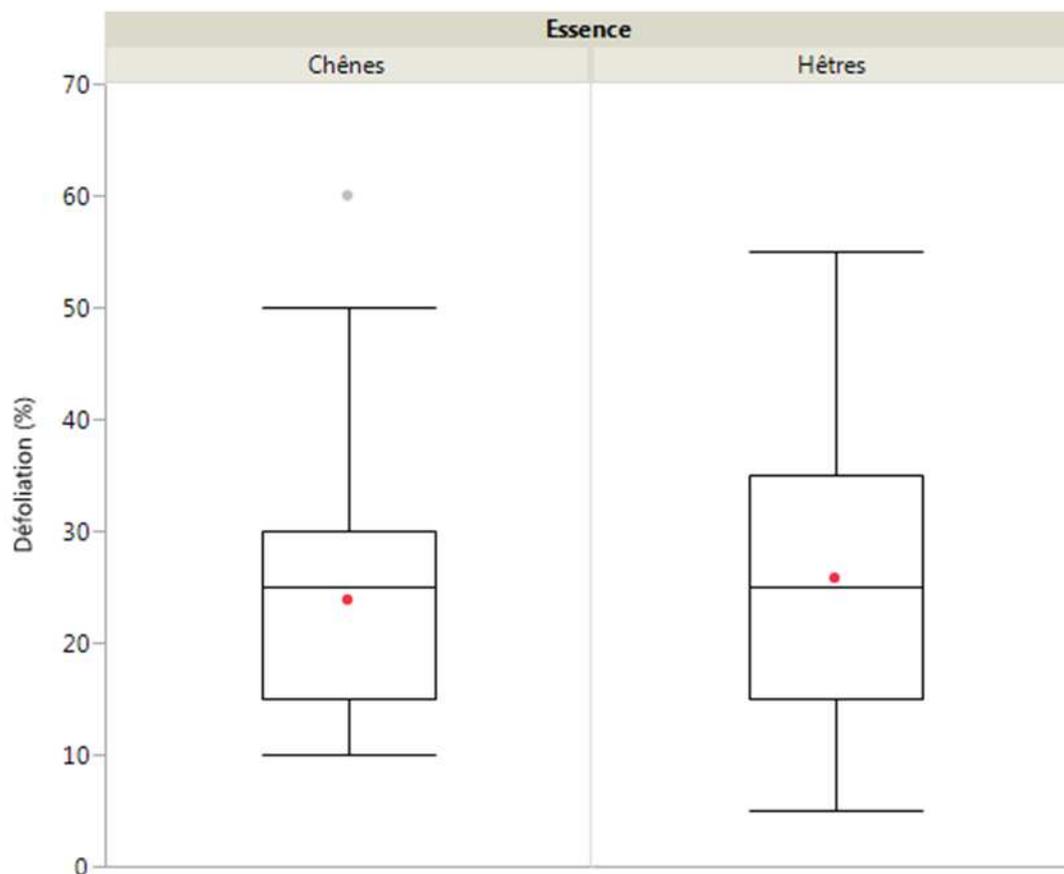


Figure 12 : Défoliation des chênes et des hêtres en 2015 ; les moyennes sont représentées par un point rouge et les valeurs extrêmes par un point gris

Les taux de défoliation par placette sont présentés à la Figure 13 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.

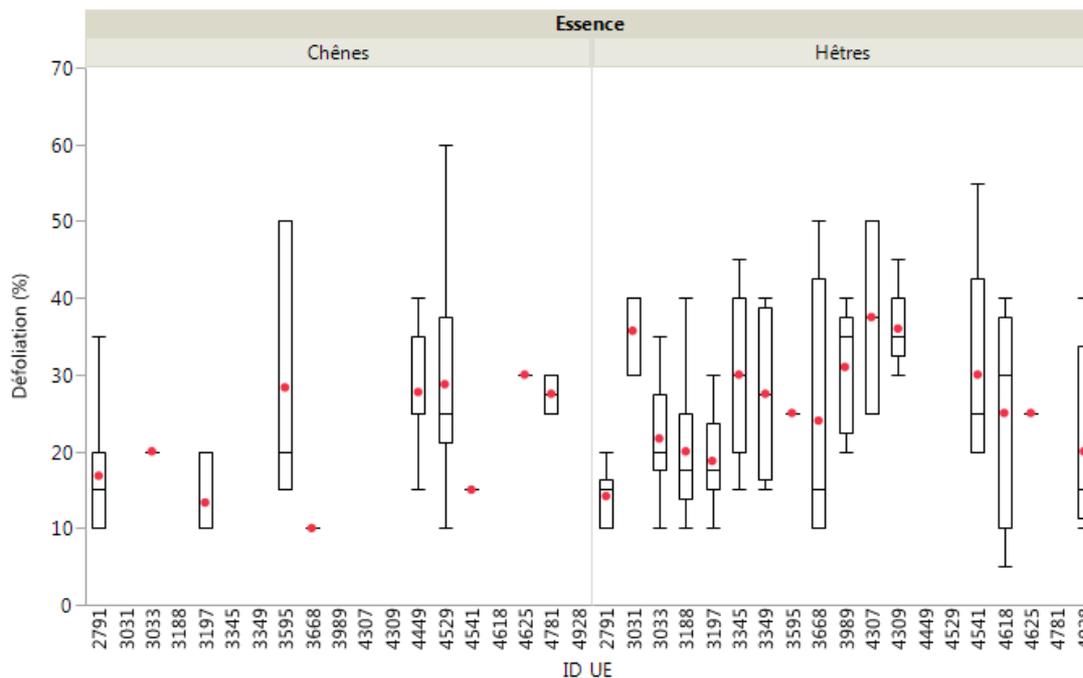


Figure 13 : Défoliation des chênes et des hêtres pour chaque placette. Certains box-plots sont incomplets en raison du nombre réduit d'effectifs (c'est le cas lorsque des chênes sont présents en hêtraie, ou inversement)

Les résultats sont également présentés en fonction de la visibilité de la couronne à observer (Figure 14). L'influence de la visibilité semble être relativement limitée pour le chêne, tandis que l'on observe pour le hêtre une diminution de la défoliation lorsque la visibilité diminue. Cela s'explique d'une part par le fait que les arbres les moins visibles font souvent partie des peuplements plus jeunes et donc présentent une défoliation généralement plus faible. D'autre part, 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). La relation ombrage-défoliation sera abordée dans le chapitre 5.6, mais la dépendance entre ombrage et visibilité nous conduit à ne pas focaliser l'interprétation des résultats sur les arbres bien visibles. Cela pourrait induire un biais.

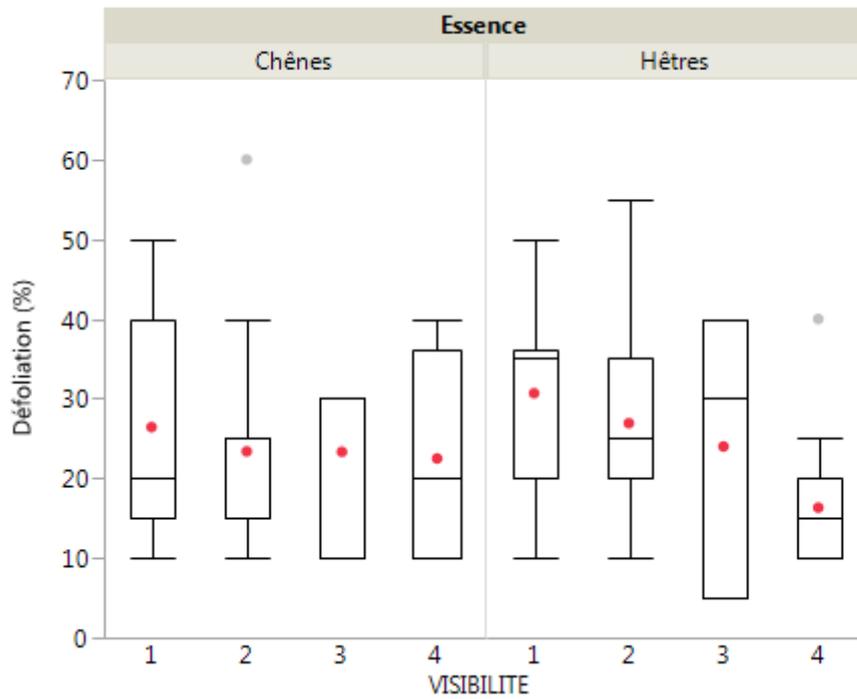


Figure 14 : Distribution des valeurs de défoliation selon la classe de visibilité (1 : bien visible → 4 : très peu visible)

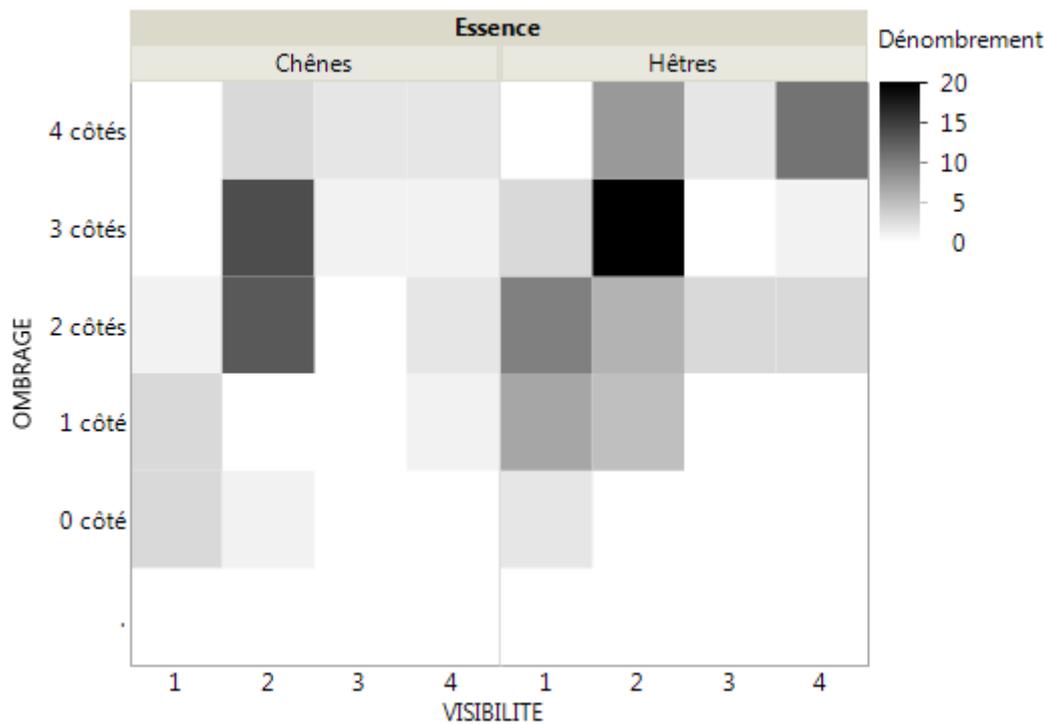


Figure 15 : Tables de contingence reliant la visibilité des couronnes et l'indice d'ombrage.

5.1.3. Evolution de la défoliation moyenne de 2009 à 2015

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. Les chênes présentent des valeurs supérieures en 2015 par rapport à 2014, probablement à cause d'une sous-estimation pour les chênes pédonculés en 2014, comme l'a montré le contrôle qualité. Pour les hêtres, les valeurs sont stables depuis 2012. 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.

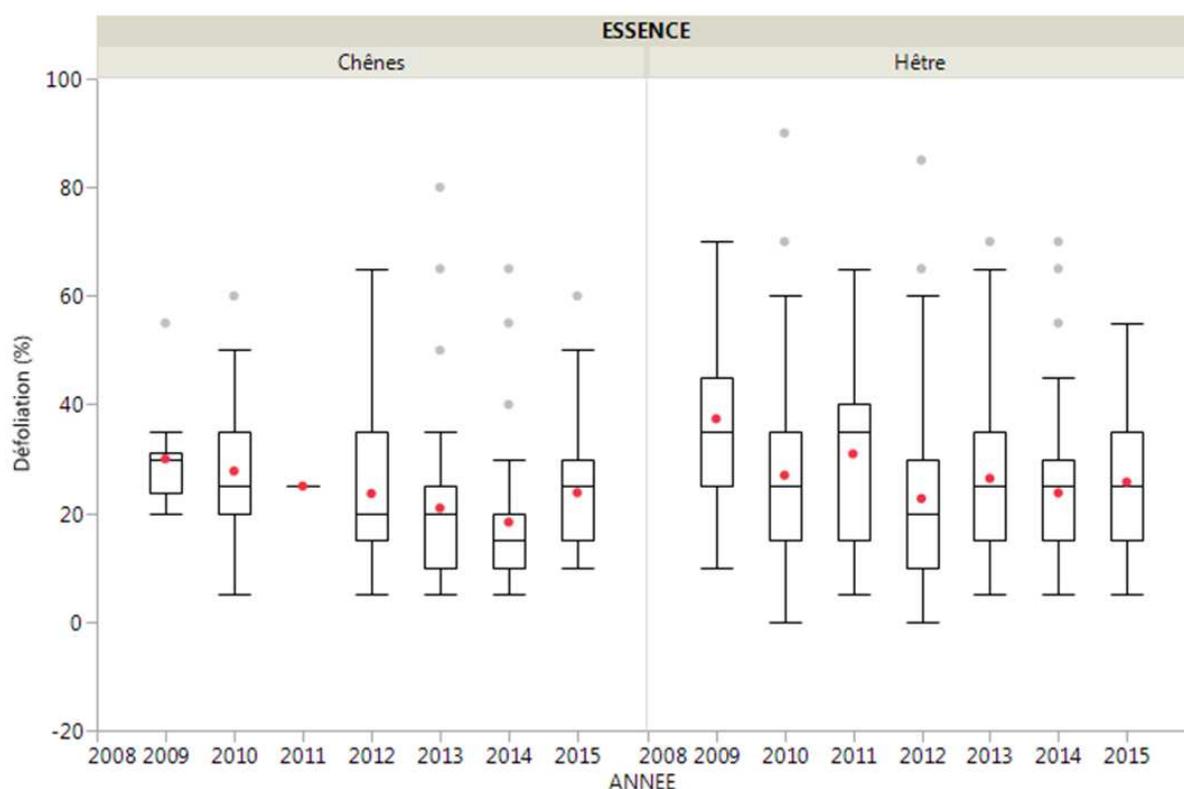


Figure 16 : Evolution de la défoliation des hêtres et des chênes de 2009 à 2015

Tableau 7: Moyenne de défoliation par année et essence

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Chênes	28% (n=14)	30% (n=45)	26% (n=39)	24% (n=63)	21% (n=55)	19% (n=55)	24% (n=48)
Hêtres	37% (n=143)	27% (n=107)	29% (n=105)	22% (n=112)	27% (n=88)	23% (n=100)	26% (n=81)

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 (31 arbres) et toutes les années impaires pour le hêtre (41 arbres). Ce sous-échantillon est certes moins représentatif de la zone étudiée, mais ne présente pas de biais.

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 une augmentation de la défoliation moyenne entre 2014 à 2015, mais les résultats de 2015 ne sont pas significativement différents de 2012 et 2013. Cette observation est probablement liée au biais de -8% détecté en 2014 lors des visites de contrôle pour les chênes pédonculés. Nous pouvons donc conclure que la défoliation moyenne des chênes est stable depuis 2012.

Les hêtres présentent des défoliations moyennes semblables en 2013 et 2015, ces valeurs étant plus basses qu'en 2011.

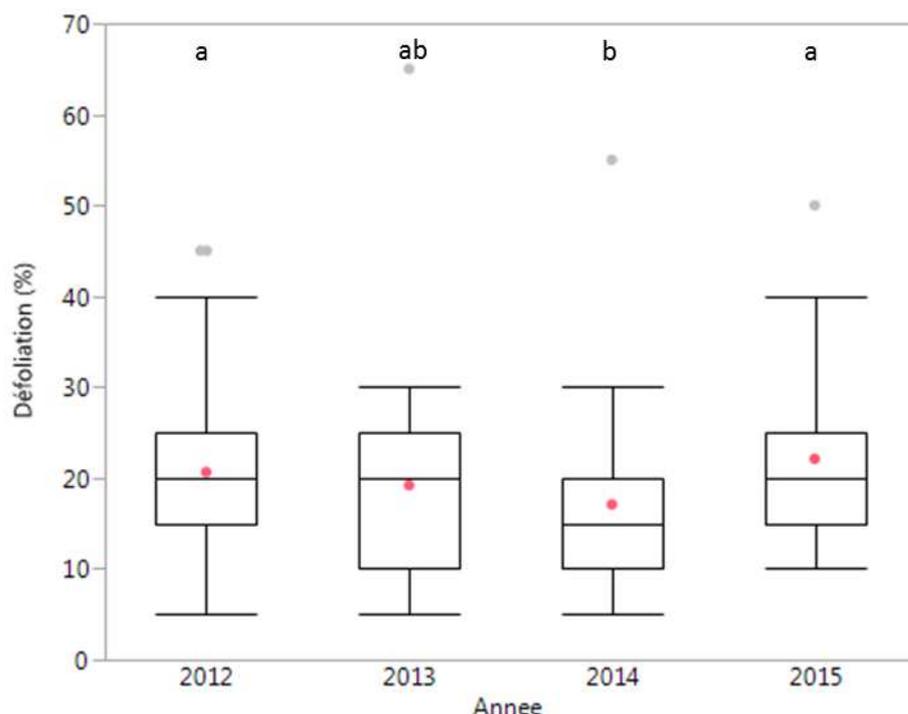


Figure 17: Evolution de la défoliation des 31 chênes observés durant les 4 campagnes de 2012 à 2015

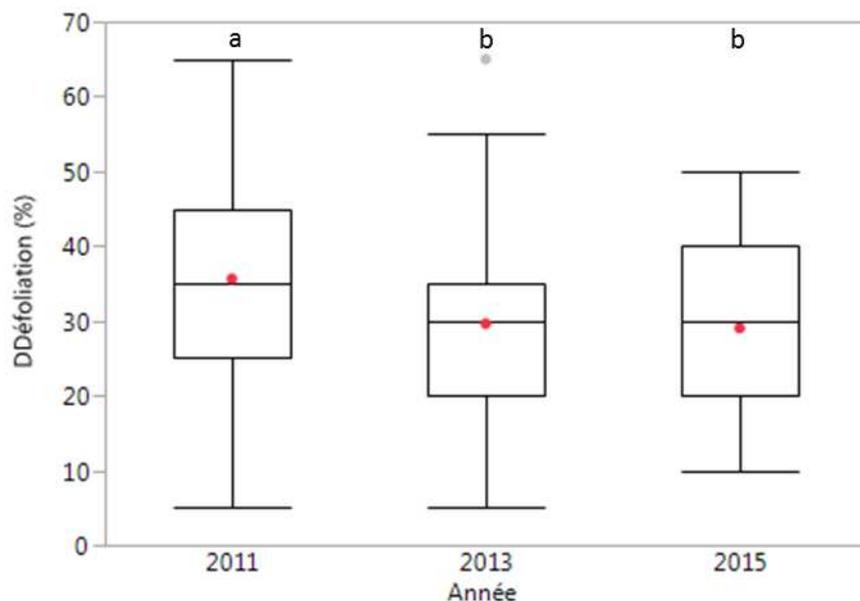


Figure 18: Evolution de la défoliation des 41 hêtres observés en 2011, 2013 et 2015

Nous nous sommes également intéressés à l'évolution individuelle de chacun de ces arbres entre le début à la fin de la période considérée (2012-2015 pour les chênes et 2011-2015 pour les hêtres). Les résultats sont présentés sous forme de graphe en bulle (Figure 19 et Figure 20), afin de pouvoir visualiser les points superposés (données catégorielles).

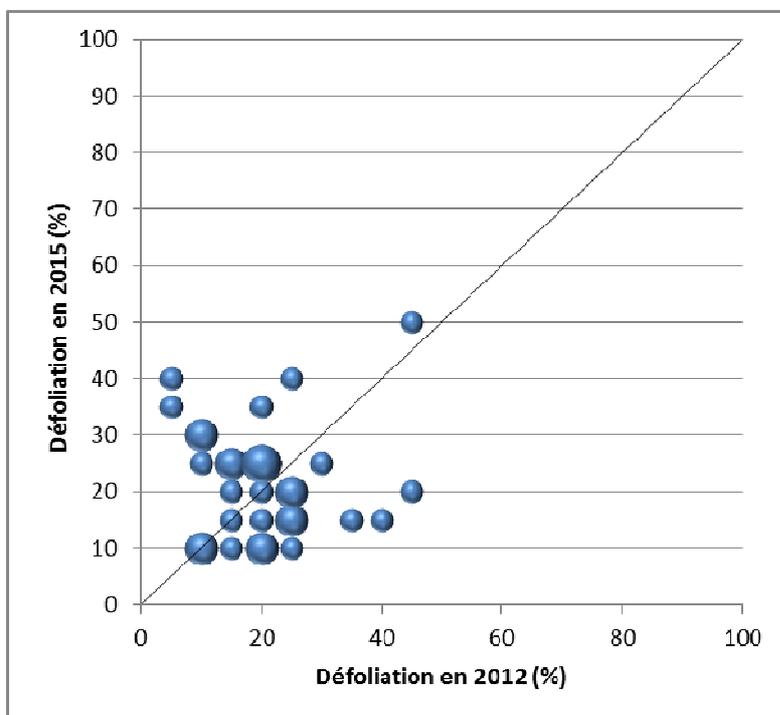


Figure 19 : Comparaison des classes de défoliation de 2012 et 2015 pour les 31 chênes observés durant toute cette période (la taille des bulles correspond au nombre de points ayant les mêmes coordonnées)

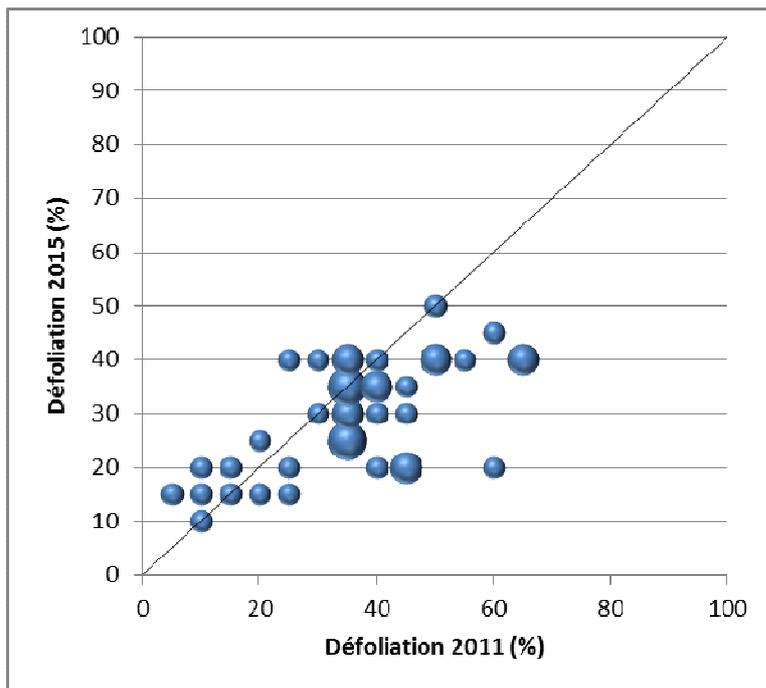


Figure 20 : Comparaison des classes de défoliation de 2011 et 2015 pour les 31 chênes observés durant toute cette période (la taille des bulles correspond au nombre de points ayant les mêmes coordonnées)

Les chênes présentent une évolution très « dispersée » : bien que la moyenne n'évolue pas. Au cours de la période 2012-2015, des individus se sont considérablement dégradés tandis que d'autres présentent une situation sanitaire nettement meilleure.

La plupart des hêtres présentent des défoliations assez semblables en 2011 et 2015 (différence inférieure ou égale à 10 %). Cependant quelques individus présentent une forte diminution de la défoliation durant cette période. La diminution des défoliations moyennes (Figure 18) est donc liée à la forte diminution de la défoliation de certains individus, plutôt qu'à une diminution systématique des valeurs.

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).

Pratiquement aucune fructification n'a été observée en 2015 chez les chênes, malgré la présence de jeunes fruits lors de la journée de formation. Il est probable que la majorité ait avorté durant le mois de juillet. Depuis 2009, nous n'avons pas observé de forte glandaie. Pour les hêtres, sur la période de temps considérée, la fructification semble plus abondante les années impaires, à l'exception de 2015 (Figure 21). Cette tendance à la fructification bisannuelle n'est pas un effet lié à l'alternance des placettes visitées, mais une caractéristique des hêtraies d'Europe occidentale et centrale.

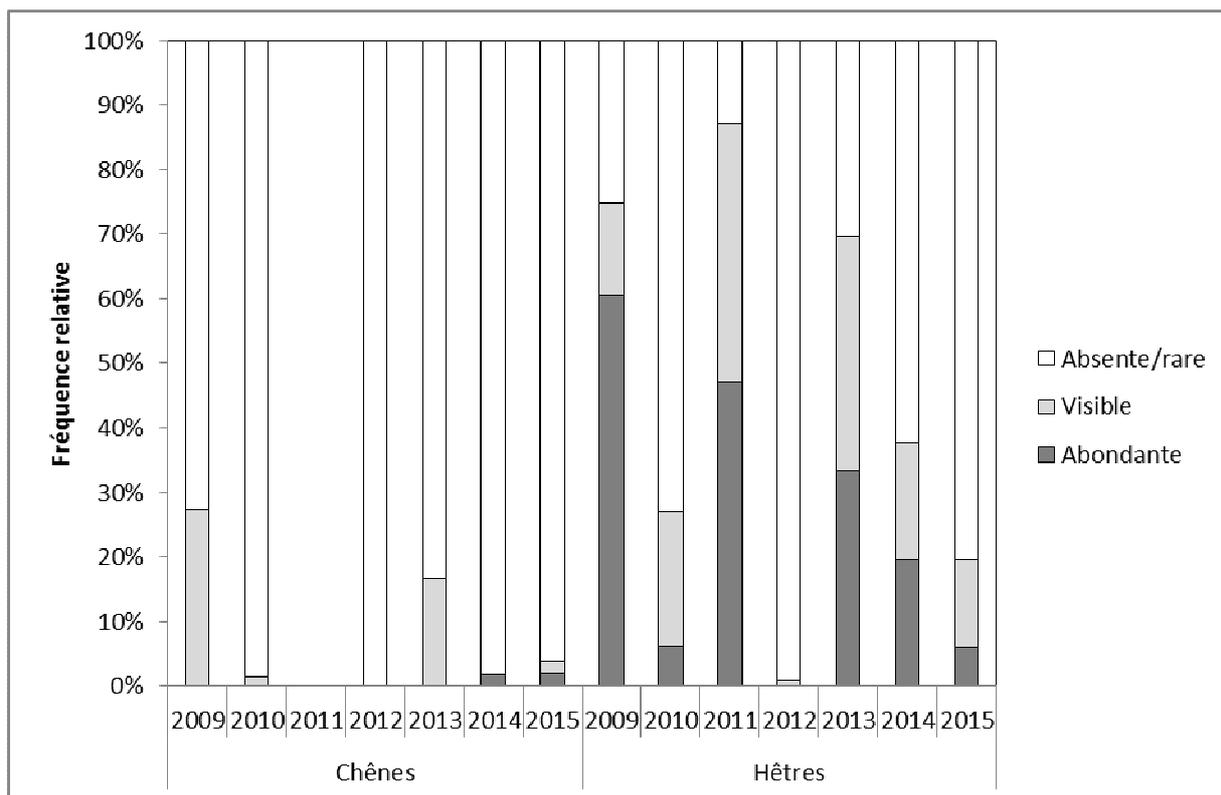


Figure 21 : Evolution du degré de fructification de 2009 à 2015 pour les chênes et les hêtres

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.

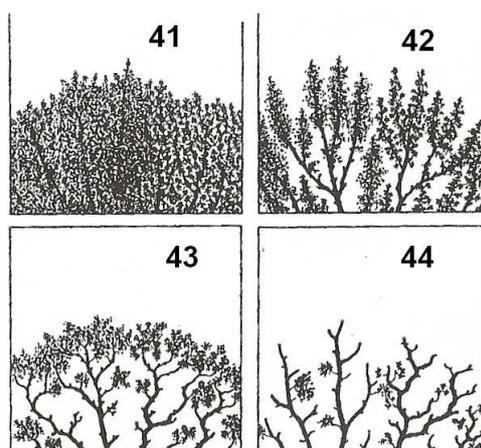


Figure 22 : Les quatre formes de houppier des chênes, avec leurs codes (Eichhorn et al., 2010)
 41 : ramification dense ; 42 : simplification légère ; 43 : simplification importante ; 44 : déclin

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 s’améliore nettement de 2010 à 2014, mais se dégrade nettement en 2015 (Figure 24). Toutefois, il s’agit principalement d’une augmentation de la fréquence de la classe 2 (simplification légère). Seuls 5% des arbres présentent une simplification importante, et aucun ne présente de déclin (classe 4).

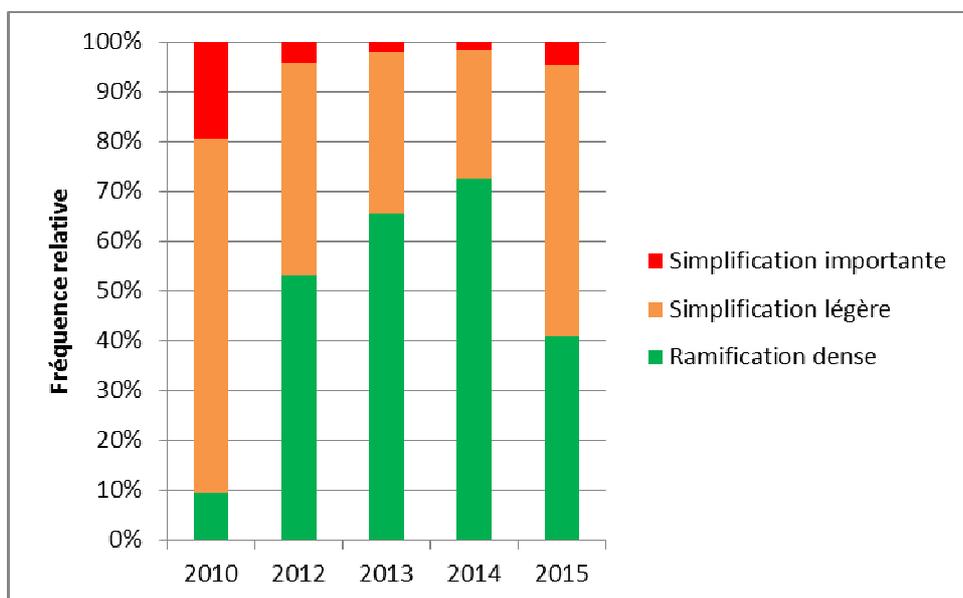


Figure 24 : Distribution des chênes selon la structure de la couronne pour les chênes

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 2014 ne sont pas les mêmes que celles visitées en 2013 et 2015. Nous observons en 2015 que les classes 1 à 5 représentent toutes plus de 10% des arbres, avec des proportions dépassant les 20% pour les classes 2 et 3 (Figure 25). La classe 7 n’a pas été observée en 2015, tandis que la classe 6 représente 5% des effectifs. Par rapport à 2013, nous observons une augmentation de la fréquence de la classe 1 au détriment de la classe 2, mais aussi une augmentation des classes 4 et 5 au détriment de la classe 3. Ces observations suggèrent une détérioration de la structure des arbres durant cette période. Toutefois, il faut rester prudent car l’année 2013 était l’année de l’instauration des nouvelles classes et seule la moitié des arbres avaient été caractérisés selon cette approche.

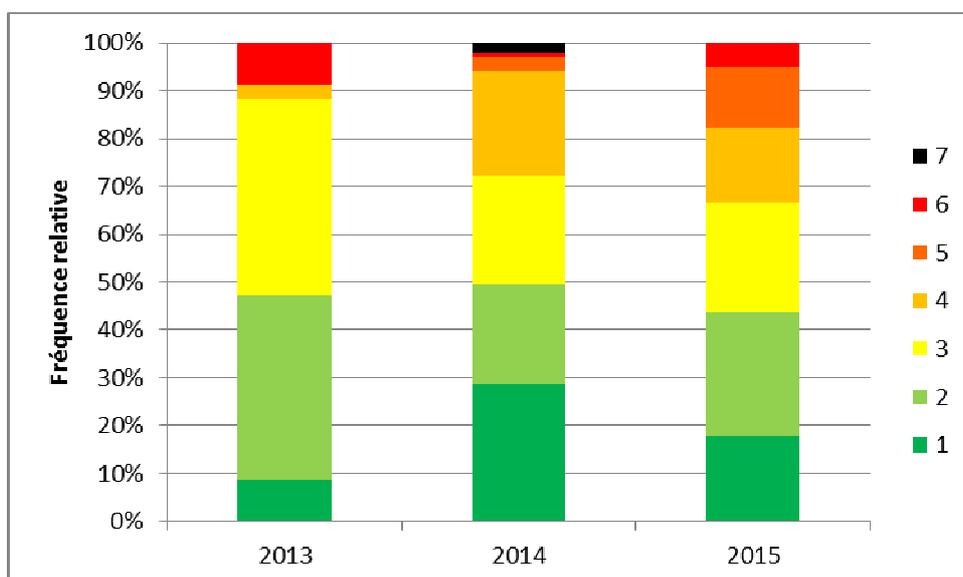


Figure 25 : Distribution des hêtres selon la structure de la couronne

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 et ceci de manière constante puisque la proportion de chênes avec gourmands avoisine les 50%. Pour les deux essences, l'abondance de pousses épicorniques diminue avec le temps (Figure 26). Cette observation ne signifie pas que les pousses épicorniques des années précédentes ont disparu ; elles sont en fait considérées comme des rameaux normaux. La diminution observée se rapporte à la production de nouvelles pousses épicorniques.

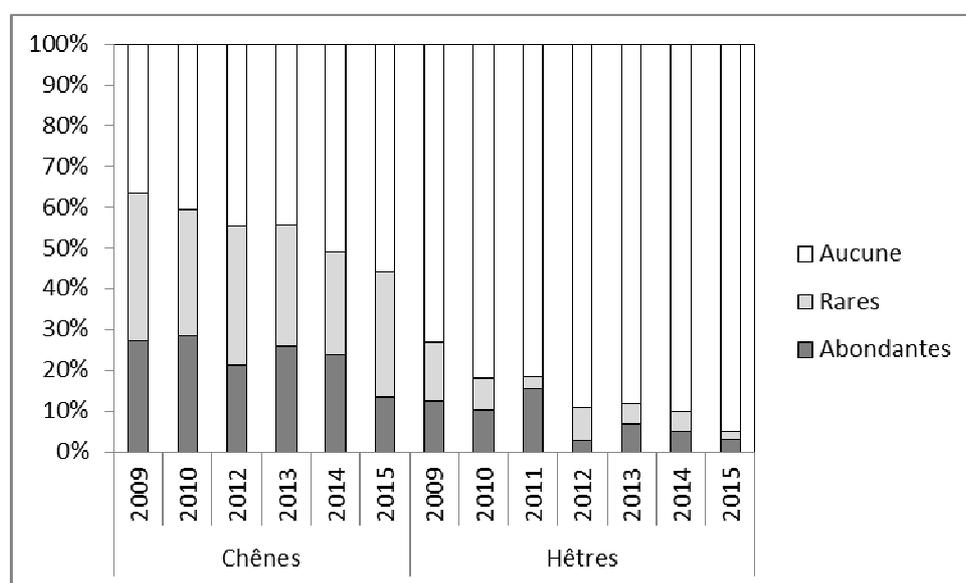


Figure 26 : Distribution des arbres selon l'abondance des pousses épicorniques

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. Il est également prévu de noter les zones des feuilles les plus touchées (extrémités, bande, partie internervaire, etc...).

Globalement, les chênes sont plus affectés par la décoloration que les hêtres (Figure 27). En 2015, 16% des chênes présentaient une décoloration sur plus de 10% des feuilles. Cette proportion est plus élevée qu'en 2014 (2%) et proche de la valeur observée en 2013 (12%). La proportion de hêtres présentant une décoloration sur plus de 10% des feuilles oscille entre 0 et 11% depuis 2010. Aucun hêtre présentant plus de 25% des feuilles décolorées n'a été observé depuis 2011.

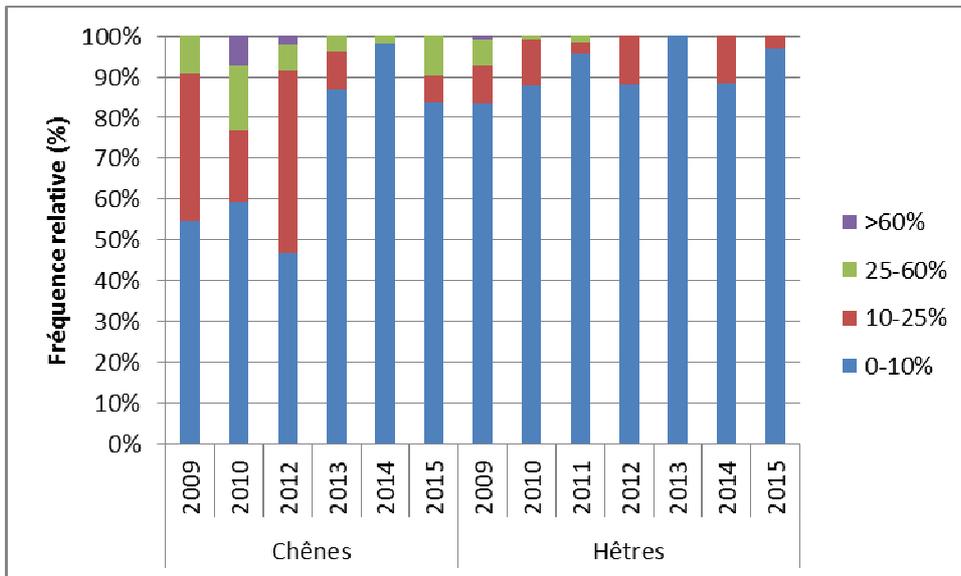


Figure 27: Distribution des arbres selon le pourcentage de décoloration du feuillage

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 pour les années 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 et 2015. 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 marqués d'un astérisque indiquent que la corrélation est significative au seuil de risque $\alpha = 0.05$. 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 : 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)

Les régressions linéaires (Tableau 9) illustrent la relation entre la défoliation et la circonférence. Lorsque la p-valeur calculée est inférieure au niveau de significativité ($\alpha=0,05$), on rejette l'hypothèse nulle selon laquelle il n'existe pas de relation linéaire entre les variables. Nous pouvons donc conclure que la défoliation des hêtres augmente de manière significative avec la circonférence et ce de manière linéaire. Par contre, cette relation n'est pas vérifiée pour les chênes. Ces résultats appuient ceux obtenus en testant la corrélation entre les deux variables.

Tableau 9: Résultats des régressions linéaires entre la circonférence (y ; cm) et la défoliation (x ;%)par essence et par année

Année	Essence	n	équation	R ²	P valeur> t
2009	Chênes	14	$y=0,0029x+27,74$	0,0009	0,91
2010	Chênes	45	$y=0,0299x+26,15$	0,0271	0,281
2011	Chênes	39	$y=-0,0313x+30,1$	0,0450	0,19
2012	Chênes	63	$y=0,0428x+17,72$	0,0421	0,10
2013	Ch. pédonculés	48	$y=0,0384x+16,55$	0,0227	0,30
2014	Ch. pédonculés	45	$y=0,04082x+14,50$	0.0426	0.17
2013	Ch. sessiles	7	$y=0,1056x-3,783$	0,3849	0,13
2014	Ch. sessiles	10	$y=0,1056x-3,783$	0,028	0,64
2015	Chênes	48	$Y=-0.034x+28.71$	0.030	0.24
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

La Figure 28 illustre la distribution des valeurs de défoliation des hêtres en 2015 en fonction de la circonférence à 1m50. Le coefficient de pente est de 0,056. En d'autres termes, sur base des données de 2015, la défoliation augmenterait de 8.22% 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.

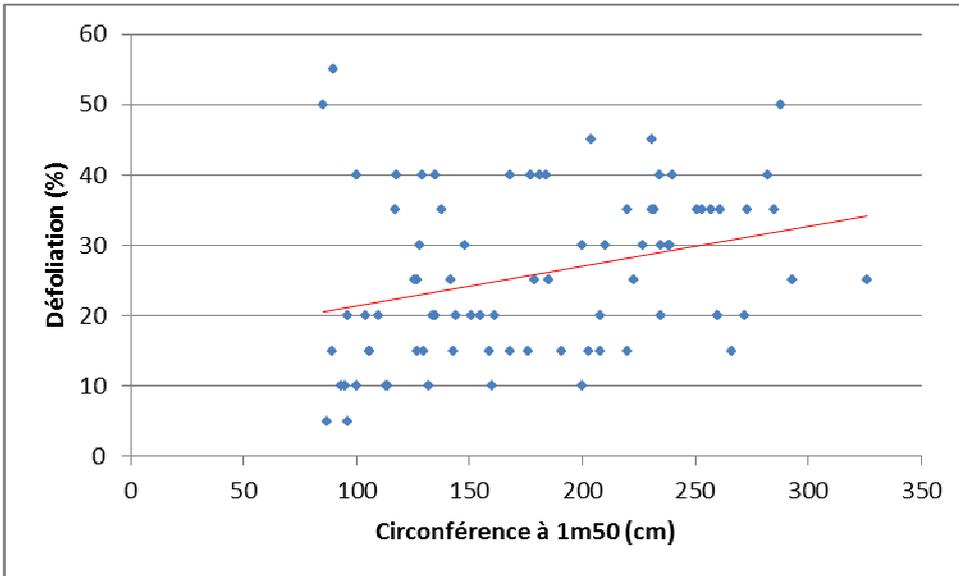


Figure 28 : Régression linéaire de la défoliation des hêtres en fonction de la circonférence en cm (C150) en 2015

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 2015, ne sont pas significativement affectées par le degré de concurrence pour les chênes contrairement aux hêtres.

Pour les séries d'arbres dont la défoliation varie en fonction de l'indice d'ombrage, on réalise un test de Tukey afin de classer des groupes qui sont significativement différents. Pour une année considérée, les indices d'ombrage portant des lettres communes forment des groupes non significativement différents les uns des autres.

Comme illustré à la Figure 29 et le Tableau 10, déficit foliaire des chênes n'est pas en lien avec le degré de concurrence du houppier. Contrairement aux chênes, nous constatons qu'à mesure que la couronne des hêtres est concurrencée, la défoliation tend à diminuer. D'après le test de Tukey, la moyenne pour les arbres en croissance libre est significativement plus élevée que pour les arbres concurrencés sur 4 côtés. 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 (Figure 15). 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.

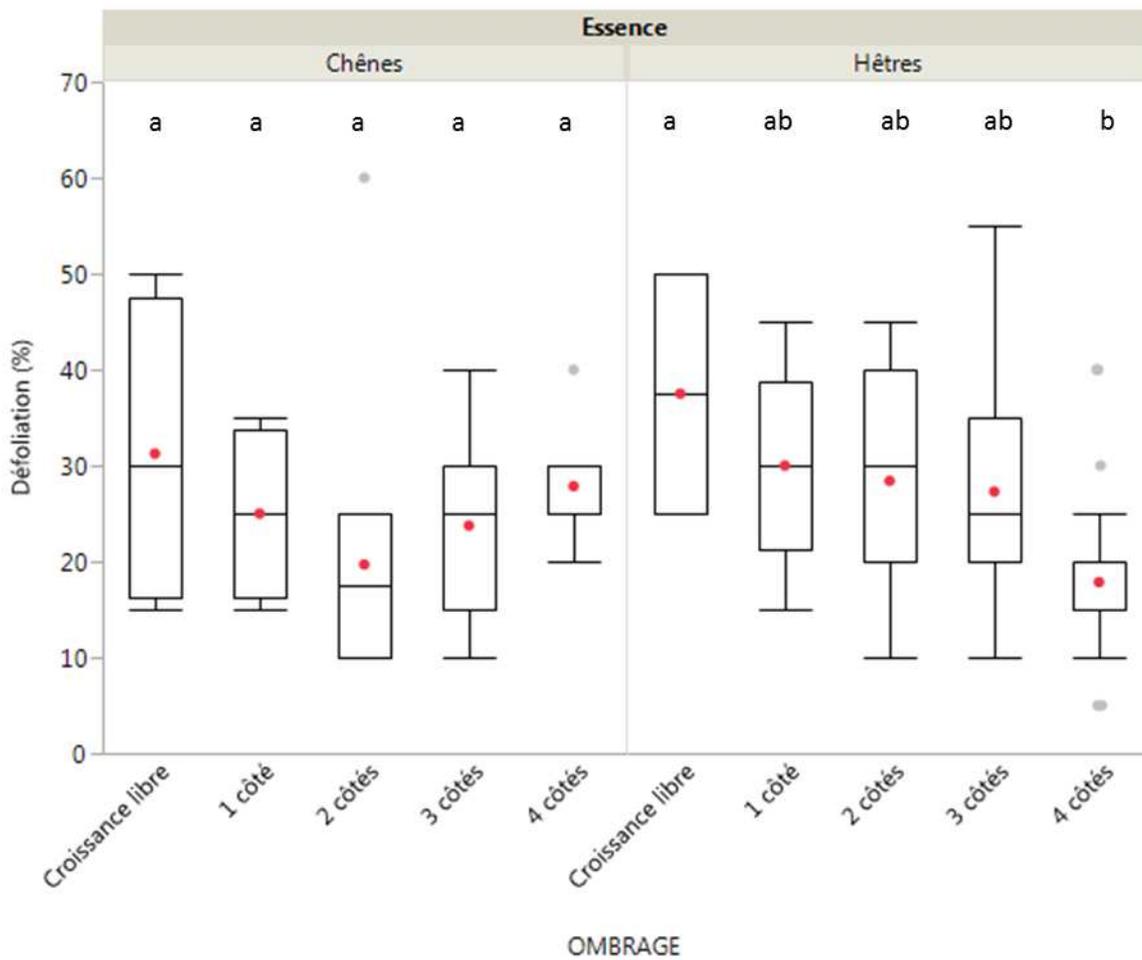


Figure 29: Défoliation des chênes indigènes et des hêtres selon l'indice d'ombrage en 2015

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
Ch. pédonculés 2013	4	1418,59	354,65	1,9168	0,1249
Ch. pédonculés 2014	5	1348,558	269,712	2,6128	0,03942*
Ch. sessiles 2013	2	76,19	38,09	0,3265	0,7390
Ch. sessiles 2014	2	76,6666	38,3333	0,8050	0,4845
Chênes 2015	4	613	153	1.24	0.305
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*

5.6.4. Défoliation et décoloration

La perte foliaire et la décoloration des feuilles sont deux symptômes qui peuvent intervenir à la suite de facteurs divers souvent difficiles à identifier ; on citera notamment les carences et les stress biotiques. Il est donc intéressant d'analyser si ces deux variables sont corrélées.

La Figure 30 illustre la distribution des valeurs de défoliation par classe de décoloration pour les chênes et les hêtres respectivement. Comme cité ci-dessus, aucune tendance ne se dessine pour les chênes, la défoliation moyenne n'est pas significativement différente selon les classes de décoloration. Les effectifs pour les classes de coloration élevées sont cependant très réduits. Le Tableau 11 indique qu'aucune moyenne de défoliation n'est significativement affectée par la classe de décoloration, hormis les hêtres observés en 2009, 2010 et 2014.

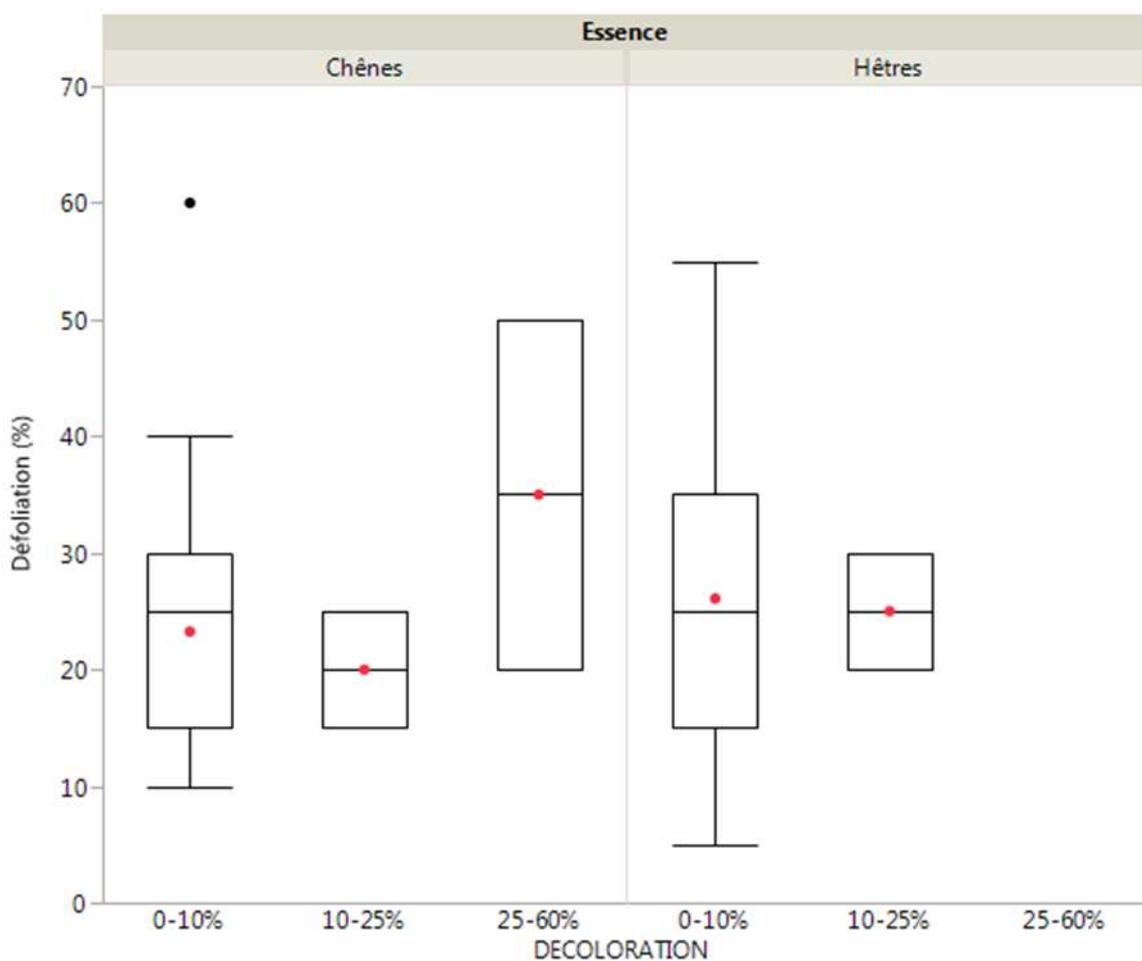


Figure 30: Distribution de la défoliation des chênes indigènes et hêtres selon la classe de décoloration en 2015

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

Source	DDL	Somme des carrés	Carrés moyens	F	Pr > F
Chênes 2009	2	56,93	28,46	0,7692	0,4889
Chênes 2010	3	52,11	17,37	0,1541	0,9265
Chênes 2011	2	78,72	39,36	0,4724	0,6274
Chênes 2012	3	517,51	172,51	0,9961	0,4011
Ch. pédonculés 2013	2	313,68	156,84	0,7789	0,4650
Ch. pédonculés 2014	1	26,7172	26,7172	0,2148	0,6453
Ch. sessiles 2013	2	61,61	30,80	0,26	0,7859
Ch. sessiles 2014	0	0	x	x	x
Chênes 2015	2	417	209	1.74	0.187
Hêtres 2009	3	3235,27	1078,42	6,3380	0,0005*
Hêtres 2010	2	1590,59	795,30	3,6702	0,0289*
Hêtres 2011	2	400,30	200,15	0,8988	0,4103
Hêtres 2012	1	18,18	18,18	0,0726	0,7881
Hêtres 2013	0	0	x	x	x
Hêtres 2014	1	1363,89	1363,89	8,2865	0,0049*
Hêtres 2015	1	2.3	2.3	0.0171	0.8964

5.6.5. Défoliation et fructification

Depuis 2009, aucune glandaie n'a été observée ; par conséquent, le lien entre la défoliation et la fructification n'a pu être mis en évidence, sauf pour les chênes sessiles en 2014 (voir Tableau 12). Les hêtres observés lors des campagnes de 2009, 2011, 2013 et 2014 ont des défoliations moyennes significativement différentes en fonction de l'abondance de la fructification. Rappelons que ces années sont caractérisées par de bonnes fainées. En 2015, aucune différence significative n'a été observée (Tableau 12 et Figure 31)

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. Une autre justification probable est que la fructification modifie la morphologie de l'arbre et influence donc la perception du taux de défoliation par l'observateur (Braem, 2011).

Tableau 12: 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
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. sessiles 2013	0	0	x	x	x
Ch. sessiles 2014	1	178,57143	178,57143	6,2500	0,0465*
Chênes 2015		163	81	0.65	0.52
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

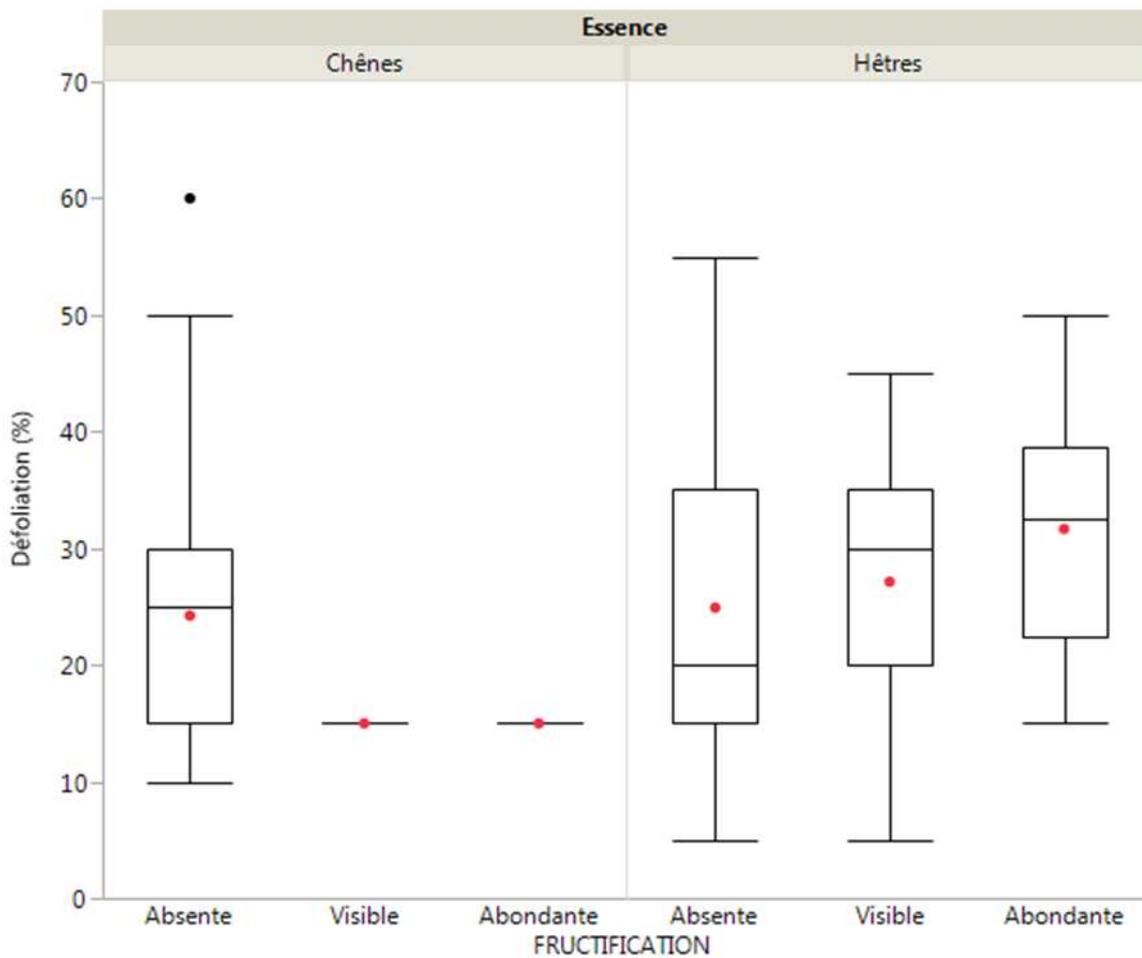


Figure 31: Distribution de la défoliation des chênes et des hêtres selon l'abondance de la fructification en 2015

5.6.6. Défoliation et forme du houppier

Une relation nette existe entre la défoliation des chênes et des hêtres et la forme du houppier (Tableau 13 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.

Tableau 13: 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*
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. sessiles 2013	1	59,52	59,52	0,6158	0,4682
Ch. sessiles 2014	1	160,0	160,0	5,120	0,0535
Chênes 2015	4	3262	815	14,9	<0,0001*
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*

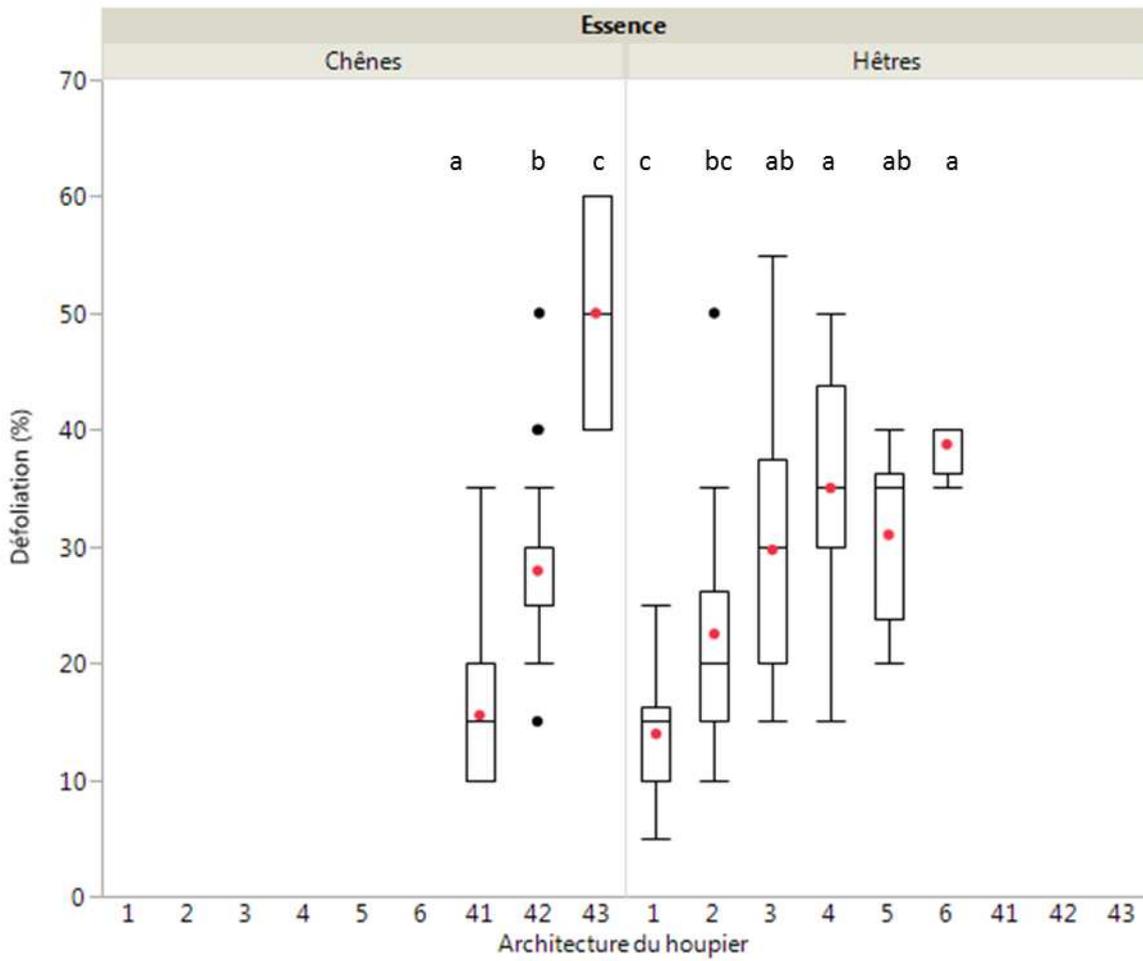


Figure 32: Distribution de la défoliation des hêtres selon la forme du houppier

5.7. Dommages

5.7.1. Distribution des dommages

Les dommages sont répertoriés 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 14 reprend l'ensemble des dommages observés en 2015, 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 81 hêtres).

Les principaux dommages sont l'altération de feuilles par les insectes défoliateurs pour les chênes (15% des arbres atteints) et la perte de rameaux fins pour le hêtre (5% des arbres atteints).

En 2014, 58% des chênes pédonculés et 10% chênes sessiles étaient atteints par les défoliateurs. En 2013, on dénombrait 65% des chênes pédonculés et 86% chênes sessiles atteints par les défoliateurs. En 2015 par contre, seuls 15% des arbres présentent de tels symptômes. Nous constatons donc une nette amélioration à ce niveau.

Pour le hêtre, nous observons également une diminution du pourcentage d'arbres présentant des rameaux fins morts depuis 2012 : (32% en 2012 ; 13% en 2013 ; 7% en 2014 et 5% en 2015). Les rameaux présents en 2012 tombent progressivement et ne sont pas remplacés, ce qui signifie que la mortalité des rameaux est très réduite ces dernières années.

Le suivi photographique des couronnes permettra d'observer plus finement l'évolution de la structure des houppiers des hêtres et chênes.

Les symptômes observés sur le tronc (blessures, écoulement de sève, pourriture, déformations,...) sont la deuxième cause de dommages pour le chêne. Les plaies dues à l'exploitation (élagage, abattage, débardage, vandalisme) peuvent entraîner l'apparition de champignons lignivores. Il est difficile d'estimer la proportion exacte d'arbres endommagés lors des travaux d'exploitation, car les blessures disparaissent sous l'écorce reconstituée (Nageleisen *et al.*, 2010).

Tableau 14: Symptômes et dommages observés et proportion des arbres affectés

Chênes				
	Partie affectée	Symptômes	Nombre de cas	%arbres observés
Feuilles	Feuilles	Dévorés/ manquants	7	15
		Déformée	1	2
		Microphyllie (feuilles nanisées)	1	2
		Rouge à brun	1	2
Branches	Rameaux latéraux (diamètre<2cm)	Branche morte ou mourante	1	2
	Branches (diam.>10cm)	Cassées	1	2
Tronc	Totalité du tronc	Blessures (écorcement, cassures, etc,...)	4	8
	Collet et racines visibles		1	2
Hêtres				
	Partie affectée	Symptômes	Nombre de cas	%arbres observés
Feuilles		Partiellement ou totalement dévorées/manquantes	1	1
Branches	Rameaux latéraux (diamètre<2cm)	Branche morte ou mourante	4	5
	Branches (diam.>2 et < 10cm)	Branche morte ou mourante	1	1
	Branches (diam.>10cm)	Branche morte ou mourante	2	2
Tronc	Tronc sous le houppier	Blessures (écorcement, cassures, etc,...)	1	1
		Déformations	1	1
	Totalité du tronc	Blessures (écorcement, cassures, etc,...)	2	2
		Dégâts d'arthropodes	1	1
	Collet et racines visibles	Blessures (écorcement, cassures, etc,...)	2	2

6. Proposition d'adaptations méthodologiques

Il nous semble utile de re-évaluer trois points du protocole : le nombre de placettes contrôlées, l'alternance bisannuelle des visites en hêtraie, la localisation des arbres.

Lors des visites de contrôle 2015, 17 chênes et 39 hêtres ont été observés l'UCL, ce qui représente respectivement 35% et 48% des effectifs observés par les agents de l'IBGE. Ces proportions sont nettement plus élevées que les 5% préconisées dans le protocole ICP-forest, et les résultats des tests de contrôles sont généralement très bons. D'un autre côté, il est nécessaire de disposer d'un nombre suffisant d'observations en double pour pouvoir effectuer les tests statistiques. Nous proposons dès lors de conserver le même protocole pour les chênes, mais de diviser par deux le nombre de placettes de hêtre contrôlées (4 au lieu de 8). Nous obtiendrions dès lors un échantillon de 15-20 arbres pour chaque genre. Nous proposons d'utiliser le temps ainsi libéré pour une vérification systématique de l'identification des espèces de chêne.

L'alternance bisannuelle des visites de placettes de hêtre permet de disposer d'un échantillon largement représentatif des situations (sol, âge, ...), tout en limitant le travail de terrain. Toutefois, ce protocole engendre des soucis pour les analyses statistiques, 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 proposons donc de réduire d'environ 50% le nombre de placettes en hêtraie, mais de visiter annuellement l'ensemble des placettes retenues. La sélection devrait se baser sur les informations accumulées pour l'ensemble des placettes. Le sous-échantillon retenu devra être représentatif de la pyramide des âges, des différents sols et de la variabilité de l'état sanitaire. Il devra en outre assurer une bonne répartition spatiale.

La plupart des arbres n'étant pas numérotés, leur identification est basée sur des mesures d'azimuts et de distance à partir du point central de la placette. Ce point central est déterminé par des mesures d'azimut et de distance par rapport à des arbres repères marqués par des chiffres romains au niveau du collet. L'identification des arbres est donc dépendante d'une identification très précise du point central. Or, dans certaines placettes, une partie des arbres repères (voire tous ; cf placette 4147), ont « disparu », ce qui rend l'identification du point central approximative. Le placement systématique d'une borne sous la litière au point central (comme c'est déjà le cas dans certaines placettes) permettrait à la fois de gagner du temps et de la précision. On éviterait ainsi la mauvaise identification de certains arbres, mentionnée dans le paragraphe consacré au contrôle.

En outre, nous proposons de réfléchir à une meilleure prise en compte des éclaircies, récentes ou anciennes, pour l'interprétation des résultats. Nous suggérons d'évaluer la qualité et la complétude des données disponibles à ce sujet. Si nécessaire, une adaptation des formulaires de terrain sera effectuée, en concertation avec les agents de terrain. Nous proposons également d'introduire des critères supplémentaires, tels que le rapport h/d ou les dimensions du houppier pour les arbres faisant l'objet du suivi photographique. Ces paramètres seraient donc mesurés par l'équipe de l'UCL.

7. Suivi photographique des houppiers à partir du sol

Le suivi photographique des houppiers permettra d'illustrer la notation faite par l'observateur et de mettre en avant les facteurs influençant la structure du houppier : perte de ramilles mortes, descente de cime, redéfinition du houppier observable due à des éclaircies ou autre. Cette analyse permettra également d'évaluer comment la structure du houppier influence la note de défoliation.

La mise en place du suivi photographique a été testée durant la campagne 2014 en s'appuyant sur la méthodologie développée par l'UCL (Alexandra Delente, novembre 2013). Vingt et un arbres ont été sélectionnés en 2014 sur les placettes de contrôle visitées cette même année. Cet échantillonnage devait être complété en 2015. Finalement, seuls 9 de ces arbres ont été repris dans l'échantillon final car certains n'étaient observables qu'à contre-jour et car il est plus efficace de réaliser une sélection multicritère à partir d'une feuille blanche qu'à partir d'une pré-sélection.

7.1. Sélection des arbres

Les critères de sélection principaux sont

- la visibilité du houppier : il est nécessaire de pouvoir observer une partie significative du houppier depuis un point unique, selon un angle d'environ 45° (inclinaison), et en absence de branches basses dans le champ de vision. Alors qu'il est possible d'observer l'arbre selon plusieurs angles pour le diagnostic sanitaire, ce n'est évidemment pas le cas pour la prise de photos, ce qui limite fortement les possibilités.
- l'azimut de la prise de vue : afin d'éviter les contre-jour, il est important d'éviter les prises de vue orientées vers le sud.
- une distribution des circonférences représentative des arbres observés pour le diagnostic sanitaire

L'ensemble des placettes contrôlées en 2014 et 2015 ont été visitées au cours de l'été 2015. Nous avons photographié tous les houppiers répondant aux deux premières conditions, et ce depuis plusieurs points lorsque c'était possible. Un total de 41 hêtres et 23 chênes ont ainsi été présélectionnés.

La qualité de chaque photo a été notée sur une échelle de 1 à 10 (netteté, contraste, définition). Pour les arbres pouvant être observés selon plusieurs angles, les points de prise de vue donnant les meilleurs résultats ont ensuite été retenus

Les arbres ont ensuite été sélectionnés afin de respecter au mieux les distributions des circonférences et des défoliations, en donnant la priorité aux photographies de bonne qualité. Un total de 30 hêtres et 10 chênes (6 pédonculés, 1 sessile et 3 indéterminés) ont finalement été retenus (Tableau 15).

Tableau 15 : 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
4781	102	CP	30	156
5022	2	HE	35	155
	104	HE	25	208

Les distributions des valeurs de défoliation et de circonférence des hêtres sélectionnés sont présentées Figure 33 et Figure 34 par comparaison aux observations de 2015 ou 2014. Les très faibles valeurs de défoliations et de circonférences sont sous-représentées dans le sous-échantillon sélectionné, en raison de la très mauvaise visibilité de ces arbres (inadaptés pour les photos). Toutefois, seuls les arbres présentant des défoliations inférieures à 15% et des circonférences inférieures à 100 cm sont absents de la sélection (pour rappel, $c150_{\text{seuil}} = 80 \text{ cm}$ pour l'échantillon global). Les arbres sélectionnés couvrent donc relativement bien les gammes de défoliation et de circonférence des arbres observés.

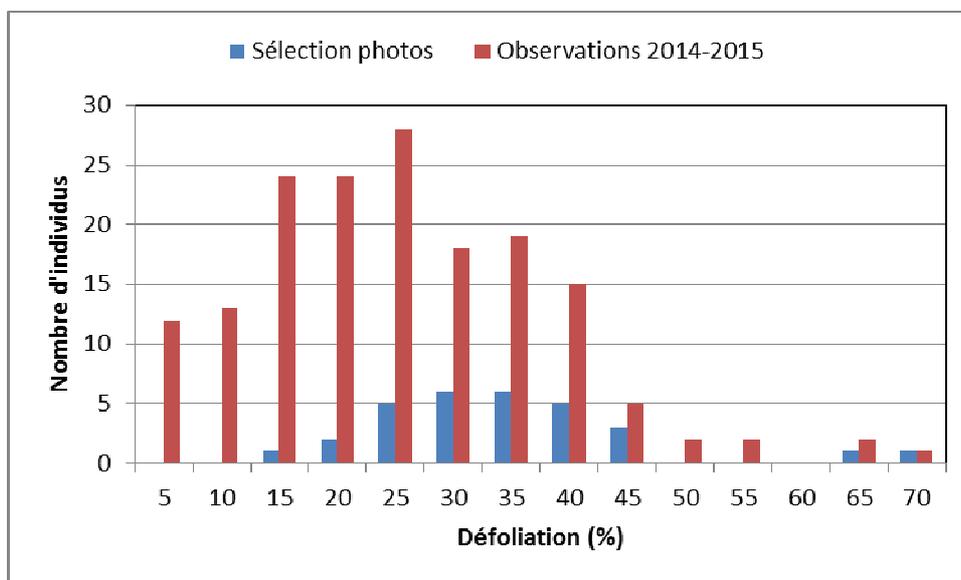


Figure 33 : Distribution des hêtres selon les classes de défoliation, pour le suivi photographique et pour l'ensemble des observations 2014 et 2015.

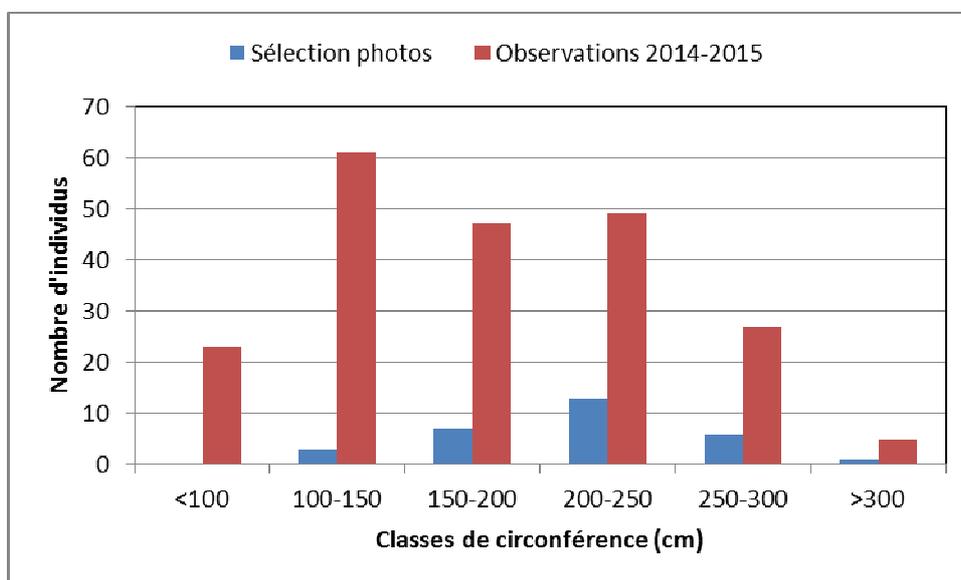


Figure 34 : Distribution des hêtres selon les classes de c150, pour le suivi photographique et pour l'ensemble des observations 2014 et 2015.

Les distributions des valeurs de défoliation et de circonférence des chênes sélectionnés sont présentées aux Figure 35 et Figure 36 par comparaison aux observations de 2015. Les classes de défoliation inférieures à 10% ou supérieures à 50%, ainsi que les circonférences supérieures à 300 cm ne sont pas représentées pour le suivi photographique. Toutefois, ces situations ne concernent qu'un nombre très faible d'individus parmi les arbres observés.

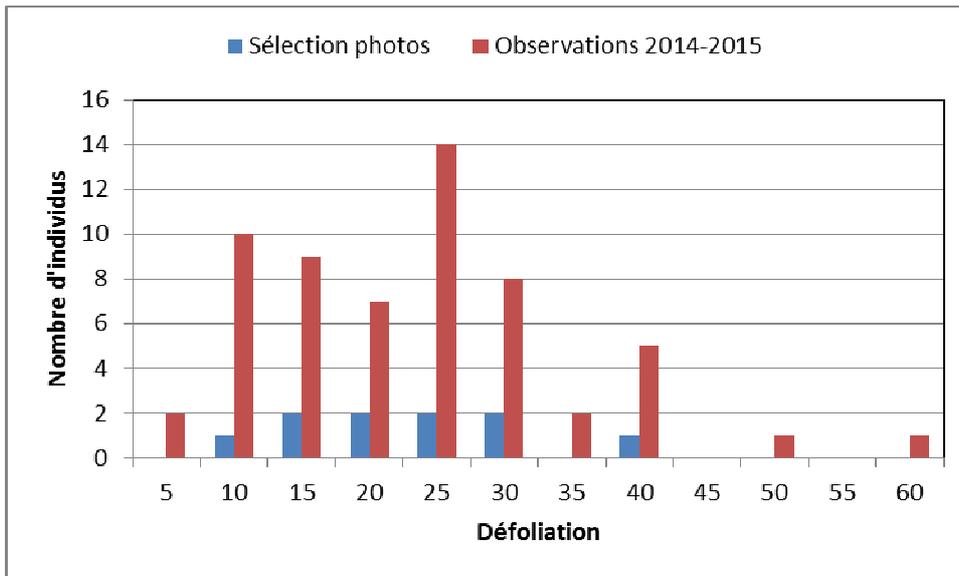


Figure 35 : Distribution des chênes selon les classes de défoliation, pour le suivi photographique et pour l'ensemble des observations 2014 et 2015

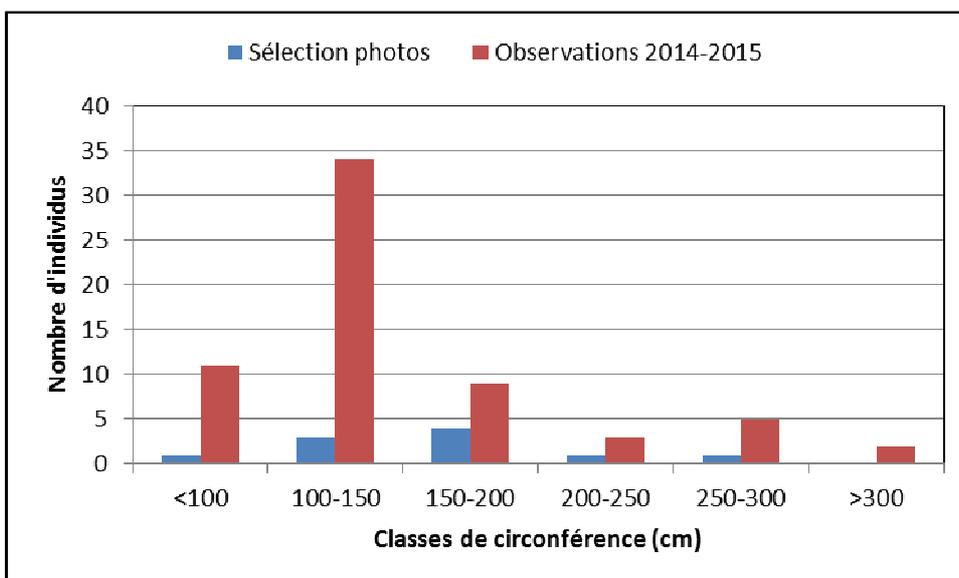


Figure 36 : Distribution des chênes selon les classes de c150, pour le suivi photographique et pour l'ensemble des observations 2014 et 2015

Globalement, le sous-échantillon d'arbres sélectionnés pour le suivi photographique représente bien les arbres observés pour le diagnostic sanitaire. Toutefois, nous pourrions envisager de compléter cet échantillon par 1 ou 2 hêtres de faible diamètre et présentant une défoliation inférieure à 15%. Ce type d'arbre est à rechercher dans les placettes non contrôlées en 2014 ou 2015.

Il est important de mentionner que d'un point de vue pratique, ce type de campagne est très compliquée à planifier, car nous sommes tributaires de la météo. Nous avons bénéficié en 2015 de conditions météorologiques très favorables, à la fois en été et en fin d'automne. Si l'on voulait augmenter significativement le nombre d'arbres photographiés, on prendrait le risque de ne pas disposer d'un nombre de jour suffisant pour effectuer toutes les photographies dans de bonnes conditions.

7.2. Types de prises de vues

Plusieurs types de prises de vue ont été effectuées :

- Le houppier observable, selon une prise de vue à 45° (= prise de vue « H ») : cette prise de vue correspond aux conditions d'observation pour la mesure de la défoliation (Figure 37).
- La partie sommitale du houppier (cime), selon une prise de vue à 45 (= prise de vue « C ») : cette photo est prise du même point que pour « H », mais avec une distance focale plus grande (zoom), afin d'obtenir une résolution optimale pour l'observation de l'architecture des branches sommitales (Figure 37). Notons qu'en été 2015, seule une partie des arbres a été l'objet d'une telle photo, car nous avons eu l'idée en cours de campagne. La météo n'a pas permis de retourner sur les mêmes placettes dans de bonnes conditions avant le début de la décoloration automnale.
- Le houppier observé par le dessous : deux prises de vue verticales à proximité du tronc sont effectuées pour chaque arbre, l'une (« V1 ») du côté du point correspondant aux prises de vue « H » et « C », l'autre (« V2 ») du côté opposé (Figure 38). La distance par rapport au tronc est dépendante de la forme du houppier et de la présence de branches basses. Elle est généralement comprise entre 2m et 4 m. Ces prises de vues sont effectuées au grand angle (entre 28 et 45 mm) et remplacent les photographies hémisphériques. En effet, seuls les houppiers observés et les voisins ont un intérêt pour nous. Ceux-ci ils ne représentent qu'une toute petite zone au centre d'une photo hémisphérique. Ces photographies seront utilisées pour quantifier la proportion de la couronne présentant un contact avec les couronnes voisines, calculée en découpant l'image de l'arbre en secteurs angulaires. Par exemple l'arbre illustré à la Figure 38 présente un contact sur 15% pour la demi-couronne du côté observé (V1) et sur 95% pour l'autre moitié (V2).

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

Les prises de vue « V1 » et « V2 » seront effectuées en hiver, tous les 3 ans ainsi que l'année qui suit une éclaircie.

Les points de prise de vue correspondant à ces 3 types sont à présent fixés pour les futures campagnes photographiques. Par contre, la focale n'est pas fixée car l'arbre peut grandir. Le cadrage est en général un peu plus large que la zone d'intérêt, permettant un recadrage standardisé ultérieur tout en limitant la perte de résolution.

	Houppier	Cime
Eté		
Hiver		

Figure 37 : Illustration des prises de vue de type « H » et « C » pour l'arbre 7 de la placette 2877



Figure 38 : Illustration des prises de vue de type verticales pour l'arbre 7 de la placette 2877

7.3 Caractéristiques des photographies

Les photographies sont effectuées avec un appareil **Olympus Sylus I**, appartenant à la catégorie « compact haut de gamme ». Il est doté d'un objectif d'une large amplitude (28-300 mm en équivalent réflex) qui ouvre à 2.8 sur toute la plage focale. Le capteur est de 12Mp et mesure 1/1.7".

Les photographies sont effectuées en privilégiant une vitesse élevée par rapport à une grande profondeur de champ. En effet, l'extrémité des branches est souvent agitée par une petite brise et une grande profondeur de champ n'est pas nécessaire car le point de prise de vue est relativement éloigné du sujet. La plupart des photos ont donc été prises avec une ouverture de 2.8 ou 3.5, à des vitesses supérieures à 1/320s pour les prises de vues de types « H » et supérieures à 1/640s pour les prises de vue de type « C ». La sensibilité est systématiquement de 100 ISO. La mesure de la luminosité est « pondérée centrale » en été et « matricielle » en hiver. Une légère correction d'exposition (négative en été et positive en hiver) est souvent appliquée en fonction de la couleur du ciel et de l'orientation par rapport au soleil.

Les photographies sont effectuées à main levée car il est très délicat d'effectuer un cadrage correct dans un appareil orienté en position verticale et incliné à 45°. De plus, le pied ne peut rien contre le mouvement des branchettes, qui nous obligent à sélectionner des vitesses élevées. Cela permet d'éviter les flous liés à la main levée, même à 300 mm.

Les caractéristiques des photographies sont consultables en consultant les propriétés des fichiers « .jpg » avec un logiciel de gestion de photos ou via l'explorateur *Windows*. Les caractéristiques majeures de chaque photo (date, focale, vitesse, ouverture, exposition, ISO), ainsi que les coordonnées des points de prises de vue sont stockées dans une nouvelle table de la base de données *Access*.

7.4 Nomenclature

Les prises de vue effectuées cette année sont fournies en format JPG en annexe de ce rapport.

Les noms de fichier permettent de les identifier et de les classer facilement. Ils sont structurés selon le principe suivant :

numéro placette _ numéro arbre _ type de photo (H, C, V1 ou V2) _ saison (E ou H) _ année

L'ordre de ces clefs a été choisi en fonction du type de regroupement souhaité lorsque les fichiers sont affichés par ordre alphabétique.

7.5. Perspectives

L'étape de sélection des arbres et des points de prise de vue est à présent terminée, moyennant l'ajout possible d'1 ou 2 hêtres très faiblement défolié en 2016. Les photographies seront dorénavant prises en routine au cours des prochaines années. Afin de garantir que les points de prise de vue ne varieront pas, il serait souhaitable de prévoir une matérialisation de ces points. Des petits piquets en bois, ressortant de 5 à 10 cm du sol pourraient être utilisés.

La prochaine année sera consacrée à l'élaboration d'une méthode de comparaisons interannuelle des images (recadrage, traitement automatisé des images, ...).

8. Conclusion et perspectives

Les résultats de la campagne 2015 ont été jugés « très fiables » à la suite du contrôle qualité.

Ils ont mis en évidence une stabilisation des valeurs de défoliation moyenne des hêtres depuis 2013 (26%), cette valeur étant significativement plus basse qu'en 2011 (29%). Nous avons mis en évidence que cette diminution est liée à la forte baisse des valeurs de défoliation de quelques arbres, plutôt qu'à une baisse modérée et généralisée.

Pour le chêne, les valeurs moyennes de défoliation de 2015 sont identiques à celles de 2012 (24%), avec une forte disparité entre les individus : augmentation pour certains compensée par une baisse pour d'autres. La comparaison par rapport à 2014 est délicate car ces dernières valeurs sont probablement biaisées.

Nous n'observons donc pas d'effet négatif de la sécheresse printanière de cette année. Toutefois, les effets de tels événements climatiques peuvent se manifester au cours des années suivantes. Nous garderons donc bien ce point à l'esprit lorsque nous analyserons les données 2016.

Les dommages observés, principalement des branches mortes et des dégâts d'insectes défoliateurs, sont en forte diminution depuis plusieurs années, aussi bien pour les hêtres que pour les chênes.

Au niveau de la structure, nous observons une légère détérioration entre 2013 et 2015 pour les hêtres. La structure des chênes se serait détériorée entre 2014 et 2015 alors qu'elle s'était améliorée au cours des années précédentes. Bien que globalement liées lorsque l'on compare les arbres entre eux, la dégradation de structure et la dégradation de la défoliation ne semblent pas évoluer conjointement. Il peut s'agir d'un effet de la différence de zones d'observation : la partie sommitale pour la structure et le houppier hors concurrence pour la défoliation. Pour certains individus, les branches de la cime se dégradent et meurent mais les parties plus basses du houppier observable semblent reprendre vigueur. Ce phénomène, difficile à quantifier sur le terrain, pourra être étudié grâce au suivi photographique.

Le protocole de suivi photographique a été affiné cette année. Un échantillon de 30 hêtres et 10 chênes ont été sélectionnés : ils représentent bien la variabilité des arbres étudiés, au niveau des classes de défoliation et de circonférence. Les houppiers et la cime de ces arbres ont été (et seront) photographiés chaque année à partir de points fixes, en été et en hiver. La concurrence des couronnes voisines a été (et sera) quantifiée tous les 3 ans via des prises de vue verticale depuis des points situés à proximité du tronc.

Certaines modifications au protocole ont été proposées (§6). Nous souhaitons en parler en comité d'accompagnement afin de les appliquer, le cas échéant, dès 2016.

Références bibliographiques

Alderweireld, M., 2007. *Etude de la mise en place d'inventaires du patrimoine forestier de la Région Bruxelles-Capitale : guide méthodologique*. Convention FUSAGx-IBGE 2007.108 p.

AWAC-ISSeP, 2010. *Réseau de surveillance de la qualité de l'air. Rapport 2009*. Service Public de Wallonie, 250 p.

Braem, S., 2009. *Suivi de l'état sanitaire en Forêt de Soignes bruxelloise*. Rapport complet, 39 p.

Braem, S., 2011. *Suivi de l'état sanitaire en Forêt de Soignes bruxelloise*. Rapport complet, 83 p.

Campagna, M., 1996. *Le cycle du carbone et la forêt : de la photosynthèse aux produits forestiers*. Direction de l'environnement forestier, Service de l'évaluation environnementale, 15 p.

COM, 2005. *Stratégie thématique de la pollution atmosphérique 446 final*. Commission des Communautés Européennes. Communication de la Commission au Conseil et au Parlement Européen, Bruxelles, 21/09/2005, 15 p.

Delatour C., 1990. *Dépérissement des Chênes et pathogènes*. Revue forestière française, 42, 2, 182 p.

Daise J., Claessens H., Vanwijtsberghe S., 2011. *Analyse de l'adéquation actuelle et future des arbres à leur station en forêt de Soignes bruxelloise*. Forêt Wallonne, 110, 3-21.

Dobbertin, M., 2005. *Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. Crown defoliation improves tree mortality models*. European Journal of Forest Research, 124, 319-333.

Eichhorn, J., Icke, R., Isenberg, A., Paar, U., Schönfelder, E., 2005. *Temporal development of crown condition of beech and oak as a response variable for integrated evaluations*. European Journal of Forest Research, 124,335-347.

Eichhorn, J., Roskams, P., Ferretti, M., Mues, V., Szepesi, A., Durrant, D., 2010. *Manual on the methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests, part IV: visual assessment of crown condition and damaging agents*. UNECE, ICP Forests, Hamburg, 59 p.

Fischer, R., Lorenz, M., Grancke, O., Mues, V., Iost, S., Van Dobben, H., Reinds, G.J., De Vries, W., 2010. *Forest Condition in Europe, 2010 – Technical Report of ICP Forests*. Work Report of the Institute for World Forestry 2010/1. ICP Forests Hamburg, 175 p.

Froehlich, H.A., 1990. *Soil compaction from logging equipment: effects on growth of young Ponderosa pine*. Journal of Soil and Water Conservation, 34, 276-277.

Herbauts, J., El Bayad, J., Gruber, W., 1998. *L'impact de l'exploitation forestière mécanisée sur la dégradation physique des sols: le cas des sols limoneux acides de la forêt de soignes*. Revue Forestière Française, 50, 2, 124-138.

Garrec, J.-P., Kerfourn, C., Laitat, E., 1989. *Etude des surfaces foliaires des arbres dépérissants*. Annals of Forest Science, 46, 547-552.

Gryseels, M., Prignon, J.-C., Vanwijnsberghe, S., Alaïme P., 2006. *La Forêt de Soignes*. Bruxelles Environnement - IBGE. 44 p.

Langohr, R., 2010. *Quelques facteurs édaphiques dans l'écosystème forêt de Soignes*. Forêt Wallonne, 105, 3-14.

Laurent, C., Perrin, D., Bemelmans, D., Carnol, M., Claessens, H., De Cannière, C., François, L., Gérard, E., Grégoire, J.-C., Herman, M., Marbaix, P., Ponette, Q., Quévy, B., Sérusiaux, E., Vincke, C., 2009. *Le changement climatique et ses impacts sur les forêts wallonnes. Recommandations aux décideurs et aux propriétaires et gestionnaires*. Rapport de recherche externe, Ministre de l'Agriculture, de la ruralité, de l'environnement et du tourisme, 44 p.

Nageleisen L.M., Piou, D., Saintonge, F. X., Riou-Nivert, P., 2010. *La santé des forêts*. Institut pour le Développement Forestier, 608 p.

Schmidt, M., 1991. *The interrelation of leaf loss and fruiting in beech*. Allgemeine Forstzeitschrift, 46,501-503.

Vanwijnsberghe, S., 2003. *Plan de gestion de la Forêt de Soignes, partie de Bruxelles-Capitale*. Document public disponible à l'IBGE (Bruxelles). 163 p.