

Université catholique
de Louvain



Bruxelles-Environnement
BE-IBGE



Earth and Life Institute
Environmental
Sciences



Suivi de l'état sanitaire en forêt de Soignes bruxelloise 2014

Réalisation

Ir. Raphaèle Van der Perre

Novembre 2014

Technicien

Frédéric Hardy

Promoteur

Prof. Quentin Ponette

Appui scientifique

Dr. Mathieu Jonard

Convention UCL – Bruxelles Environnement 2014

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

Appui scientifique : Dr. Mathieu Jonard

Résumé

Dans le cadre 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 observées 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 2014, 15 placettes en hêtraie visitées les années paires et 6 placettes en chênaie ont été observées par les adjoints forestiers de BE-IBGE. 10 chênes sessiles, 45 chênes pédonculés et 100 hêtres soit un total de 155 arbres non dominés ont été notés pour les critères repris ci-dessus dont la défoliation. Vingt hêtres ont été sélectionnés et photographiés sur les placettes de contrôle.

D'après les observations de 2014, la défoliation moyenne est de 20.1% \pm 11% (\pm écart-type) pour les chênes pédonculés, 13% (\pm 7%) pour les chênes sessiles et de 23.4% (\pm 13%) pour les hêtres. Concernant la fructification, aucune glandaie massive n'a été observée depuis la mise en place du dispositif. Sur la période de temps, la fructification des hêtres semble plus abondante les années impaires. Néanmoins en 2014, la proportion de hêtres ayant une fructification abondante a augmenté par rapport à 2012.

De manière générale, la structure des chênes indigènes et des hêtres s'améliore nettement depuis 2009. Une ramification dense est observée pour 67% des chênes pédonculés et 90% des chênes sessiles. Avant 2013, la forme du houppier des hêtres était notée de manière similaire à celle du chêne selon 4 classes. Depuis 2013, cette classification a évolué en 7 classes conformément au protocole *ICP Forests* afin d'analyser plus finement l'évolution de la ramification. Après avoir établi

une correspondance entre l'ancienne et la nouvelle classification, nous estimons qu'en 2014, 47% des hêtres sont caractérisés par une ramification dense du houppier.

La présence de pousses épïcormiques est plus généralement observée chez les chênes et ceci de manière constante puisque depuis 2009, la proportion de chênes avec gourmands avoisine les 50%. En 2014, comme en 2013, on observe une nette diminution de la décoloration en chênaie. Cette année, la majorité des chênes pédonculés (99%) et tous les chênes sessiles ont entre 0 et 10% de leur feuillage décoloré. Les chênes indigènes n'ont jamais été aussi peu touchés par la décoloration depuis 2009. Pour les hêtres, la tendance est identique puisque seulement 87% des arbres ont une décoloration entre 0 et 10%.

Concernant les proportions d'arbres présentant des dommages par rapport à l'ensemble des arbres évalués, 58% des chênes pédonculés et 10% chênes sessiles sont atteints par les défoliateurs, en 2014. En 2013, on dénombrait 65% de chênes pédonculés et 86% de chênes sessiles atteints par les défoliateurs alors que ce pourcentage n'atteignait que 29 % pour les chênes indigènes en 2012.

Par ailleurs, le pourcentage de hêtres montrant des rameaux ($\Phi < 2$ cm) morts ou mourants a chuté de 32 à 13% de 2012 à 2013. En 2014, ce pourcentage n'est que de 7%. Près de la moitié des rameaux morts des hêtres seraient tombés entre 2012 et 2011, sous l'effet de vents violents.

En considérant l'ensemble des campagnes, on constate que la défoliation moyenne des chênes a évolué entre un minimum de 19% en 2014 et un maximum de 30% en 2010. Par ailleurs, la défoliation moyenne des chênes indigènes en 2014 est significativement plus faible que celle de 2010 et 2011 et non significativement plus faible que celle des autres années de mesures. La défoliation des chênes indigènes en forêt de Soignes diminue depuis 2010. La défoliation moyenne des hêtres a varié entre 22% en 2012 et 37% en 2009. Statistiquement la moyenne de 2009 est significativement différente des autres années. Il en est de même entre les moyennes de 2012 et 2014 avec celle de 2011.

Les pertes de vitalité observées en forêt de Soignes peuvent être attribuées à un certain nombre de facteurs. La défoliation des chênes semble être en partie de nature accidentelle (attaque de défoliateurs, etc.). Par ailleurs, selon les années, entre 9 et 27% de la variabilité de la défoliation du hêtre s'explique par la circonférence du tronc. Il apparaît également que les défoliations moyennes du hêtre sont significativement différentes selon l'indice d'ombrage qui reflète le degré de concurrence du houppier. De même, les hêtres observés lors des campagnes en 2009, 2011, 2013 et 2014 ont des moyennes de défoliation significativement différentes en fonction de l'abondance de la fructification.

Finalement, une relation nette existe entre la défoliation des chênes et des hêtres, et la forme du houppier puisque la défoliation augmente de manière significative en fonction du degré de simplification du houppier.

Au niveau de la mise en place du réseau photographique, vingt arbres ont été sélectionnés. Ceux-ci sont répartis sur les placettes de contrôle sélectionnées en 2014. Les positions des arbres et du (des) point(s) de vue ont été cartographiées à l'aide du système d'information géographique Arcmap.

Date de fin : Novembre 2014.

Table des matières

Résumé	2
Table des figures.....	5
Table des tableaux.....	6
1. Contexte	7
2. Objectifs	8
3. Description de la forêt de Soignes	8
3.1. Composition spécifique.....	8
3.2. Sols	9
3.3. Climat	10
4. Etat sanitaire et dépérissement.....	11
5. Mise en place de la campagne du suivi sanitaire de 2014	12
5.1. Plan d'échantillonnage.....	12
5.2. Protocole d'évaluation	14
5.3. Caractéristiques des arbres observés.....	15
5.3.1. Effectifs et distribution des arbres en classes de grosseurs.....	15
5.3.2. Concurrence – Indice d'ombrage	16
5.3.4. Visibilité.....	18
5.4. Encodage et traitement des données	19
5.5. Contrôle-qualité	19
6. Résultats.....	22
6.1. Défoliation.....	23
6.1.1. La défoliation, indicateur de vitalité des arbres.....	23
6.1.2. Défoliation moyenne des arbres de la campagne 2014.....	23
6.1.3. Evolution de la défoliation moyenne de 2009 à 2014.....	28
6.1.4. Evolution de la défoliation moyenne d'un même échantillon d'arbres.....	30
6.2. Fructification	31
6.3. Structure de la couronne	32
6.4. Pousses épïcormiques.....	35
6.5. Décoloration des feuilles.....	35
6.6. Lien entre la défoliation et d'autres variables	37
6.6.1. Analyses statistiques	37
6.6.2. Défoliation et circonférence	37
6.6.3. Défoliation et concurrence.....	40
6.6.4. Défoliation et décoloration	43
6.6.5. Défoliation et fructification.....	45
6.6.6. Défoliation et forme du houppier	48
6.7. Dommages	50
6.7.1. Distribution des dommages	50
6.7.2. Extension des dommages par placette	52
7. Suivi photographique des houppiers à partir du sol	53
7.1. Sélection des arbres	53
7.2. Caractéristiques techniques des photographies	56
7.3. Spatialisation des arbres et des prises de vues	58
7.4. Méthodologie	59
8. Conclusion	60
Références bibliographiques	62

Table des figures

Figure 1: Proportion des types de peuplements en forêt de Soignes bruxelloise (Braem <i>et al.</i> , 2010)	8
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).....	9
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).....	10
Figure 4: Température et précipitations mensuelles mesurée à la station météorologique d'Uccle, 1981-2010 (IRM, 2011).....	10
Figure 5: Localisation des placettes en hêtraie et chênaie	13
Figure 6: Distribution des arbres observés selon les classes de circonférence.....	16
Figure 7: Distribution des arbres observés selon le degré de concurrence (2014).....	17
Figure 8: Proportion des statuts sociaux en fonction des essences (2014)	18
Figure 9: Distribution des arbres en fonction de la visibilité et de l'essence (2014).....	19
Figure 10: Légende d'un boxplot.....	24
Figure 11: boxplot de la défoliation des chênes pédonculé (Cp), sessiles (Cs) et des hêtres (He) en 2013.....	24
Figure 12: Distribution des arbres selon les classes de défoliation en 2012 (au-dessus) et en 2014 (en-dessous)	26
Figure 13: Boxplot de la défoliation des arbres dont la couronne est entièrement visible en fonction de l'essence en 2014. Pour comparaison, la Figure 11 reprend l'ensemble des arbres.	26
Figure 14: Distribution des valeurs de défoliation des chênes de 2009 à 2014.....	28
Figure 15: Distribution des valeurs de défoliation des hêtres de 2009 à 2014.....	29
Figure 16: Evolution individuelle de la défoliation de 6 chênes.....	30
Figure 17: Evolution de la défoliation d'un même échantillon de 72 hêtres entre 2010, 2012 et 2014	31
Figure 18: Evolution du degré de fructification de 2009 à 2014 pour les chênes et les hêtres.....	32
Figure 19: Les quatre formes de houppier des chênes, avec leurs codes (Eichhorn <i>et al.</i> , 2010) 41: ramification dense ; 42: simplification légère ; 43: simplification importante ; 44: déclin	32
Figure 20: Fiche de terrain différenciant les 7 formes du houppier du hêtre.....	33
Figure 21: Distribution des arbres selon la structure de la couronne pour les chênes (au-dessus) pour les hêtres (en-dessous)	34
Figure 22: Distribution des arbres selon l'abondance des pousses épicromiques.....	35
Figure 23: Distribution des arbres selon le pourcentage de décoloration du feuillage	36
Figure 24 : Régression linéaire de la défoliation des hêtres en fonction de la circonférence en cm (C150) en 2014	39
Figure 25: Evolution de la défoliation moyenne des chênes indigènes selon l'indice de concurrence et l'année.....	41
Figure 26: Evolution de la défoliation moyenne des chênes pédonculés et sessiles selon l'indice de concurrence en 2013 et 2014	42
Figure 27: Evolution de la défoliation moyenne des hêtres selon l'indice de concurrence et l'année	42
Figure 28: Evolution de la défoliation moyenne des chênes indigènes selon la classe de décoloration de 2009 à 2012 (au-dessus) et des chênes pédonculés et sessiles en 2013 et 2014 (en-dessous).	44
Figure 29: Evolution de la défoliation moyenne des hêtres selon la classe de décoloration et l'année	45
Figure 30: Evolution de la défoliation moyenne des chênes selon la fructification et l'année.....	47
Figure 31: Evolution de la défoliation moyenne des hêtres selon la classe la fructification et l'année	48
Figure 32: Evolution de la défoliation moyenne des chênes selon la forme du houppier et l'année.....	49
Figure 33: Evolution de la défoliation moyenne des hêtres selon la classe la forme du houppier et l'année.....	49
Figure 34 : Photographie d'un arbre de la placette 3197 (appareil photo : Olympus Stylus 1).....	54
Figure 35 : Distribution des arbres provenant de l'ensemble de la campagne 2014 et de ceux sélectionnés pour le suivi photo selon les classes de défoliation.....	54
Figure 36 : Distribution des arbres provenant de l'ensemble de la campagne 2014 et de ceux sélectionnés pour le suivi photo selon les classes de structure du houppier.	55
Figure 37 : Distribution des arbres provenant de l'ensemble de la campagne 2014 et de ceux sélectionnés pour le suivi photo selon les classes de circonférence.	55
Figure 38 : Relation entre la défoliation et la structure du houppier pour les arbres sélectionnés.	56
Figure 39 : Photo hémisphérique	58

Table des tableaux

Tableau 1: Valeurs climatiques mesurées en avril, mai, juin, juillet et août 2014 comparées aux normales mensuelles calculées sur la période 1981-2010 (IRM, Uccle)	11
Tableau 2: Caractéristiques et exemples de facteurs de dépérissement.	11
Tableau 3 : Placettes des sous-échantillons. Les numéros correspondent aux identifiants des placettes.....	12
Tableau 4: Effectifs (placettes, arbres) lors des campagnes d'observation de 2009 à 2014	15
Tableau 5: Effectifs des arbres observés durant la campagne 2014.....	15
Tableau 6: Moyenne des écarts de défoliation par essence observée en 2014 et résultats des tests t de Student	20
Tableau 7: Moyenne et écarts-types des défoliations et des circonférences par essence et par placette (2014).....	27
Tableau 8: Moyenne de défoliation par année et essence	29
Tableau 9: Corrélations entre la circonférence et la défoliation en fonction de l'essence et de l'année	37
Tableau 10: Résultats des régressions linéaires entre la circonférence et la défoliation par essence et par année	38
Tableau 11: Résultats des ANOVA testant l'impact de l'indice d'ombrage sur la défoliation	40
Tableau 12: Résultats des ANOVA testant l'impact de la décoloration sur la défoliation	43
Tableau 13: Résultats des ANOVA testant l'impact de la fructification sur la défoliation	46
Tableau 14: Résultats des ANOVA testant l'effet de la forme du houppier sur le pourcentage de défoliation ...	48
Tableau 15: Symptômes et dommages observés et proportion des arbres affectés.....	51
Tableau 16: Proportion des arbres touchés par l'attaque de défoliateurs selon les placettes.....	52
Tableau 17: Proportion des arbres touchés par la mortalité des rameaux ($\Phi < 2$ cm) selon les placettes	52
Tableau 18: Nombre d'arbres sélectionnés selon les placettes de contrôle 2014.....	53
Tableau 19 : Distance et azimut de chaque prise de vue par rapport à l'arbre sélectionné.	57

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, l'alimentation hydrique et minérale (Daise *et al.*, 2011). Par ailleurs, le sol limoneux de la forêt de Soignes est également très sensible au tassement dû aux exploitations forestières, au développement des loisirs, etc. 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 des inondations ; (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.

Grace à ce suivi on a pu mettre en évidence que la structure de la ramification s'améliore d'année en année pour les chênes et hêtres. Néanmoins, les causes de cette amélioration sont encore peu

connues. Ce regain de vitalité apparent peut être dû à une récupération de la cime par le bas par le développement des pousses épïcormiques, ou encore à une perte de ramilles et de branches mortes. Un suivi photographique a été mis en place durant l'été 2014 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.

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 d'en dégager d'éventuelles tendances.

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.

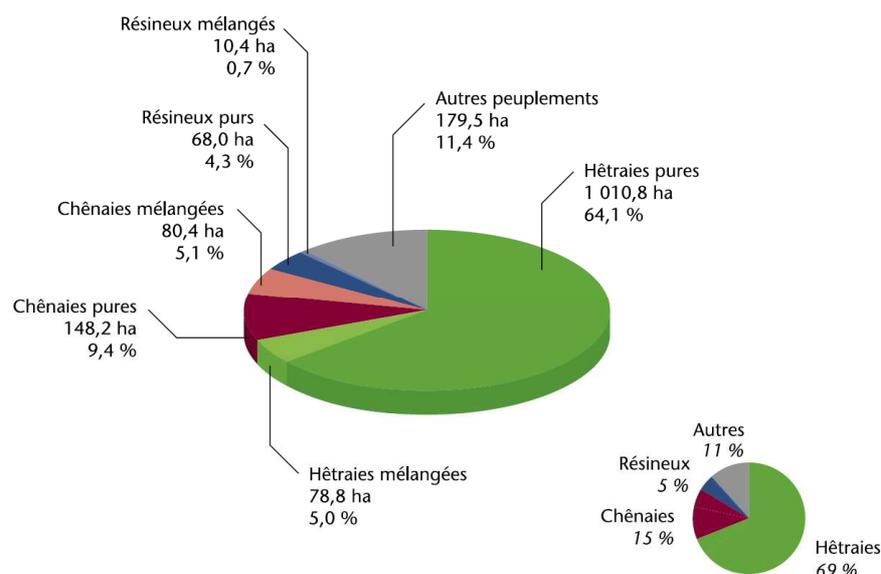


Figure 1: Proportion des types de peuplements en forêt de Soignes bruxelloise (Braem *et al.*, 2010)

3.2. Sols

Le sous-sol sonien, présent sous le limon éolien, 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).

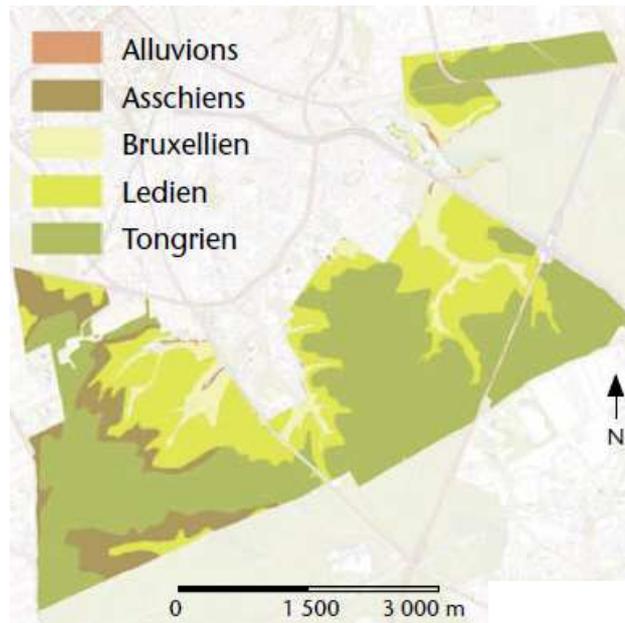


Figure 2: Roche-mère géologique présente sous le limon éolien. Les teintes jaunes présentent les assises à dominance sableuse (source: carte géologique de la Belgique, numérisation: BE-IBGE)

Les sols soniens sont de type limoneux non gleyfiés sur près de 85% de la surface. Ces sols sont acides par décalcification 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). Cette dégradation 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-eau de l'ordre de 3,5 à 4,5) et plus élevée entre 2 et 4 mètres de profondeur (pH-eau 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), au-dessus duquel (de 0 à 40 cm de profondeur) le sol est lessivé et l'humification de la litière est faible. 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 racines rencontrent une résistance latérale et sont progressivement asphyxiées.

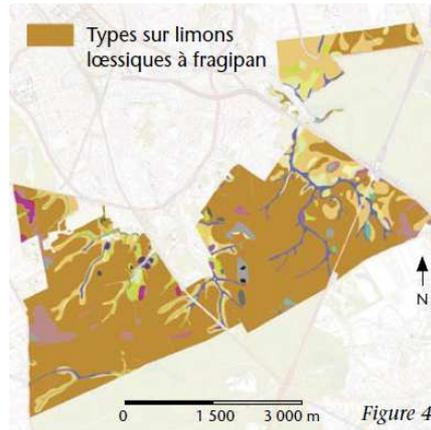


Figure 3: Les sols de la Forêt de Soignes sont dominés par le type Abc interprété comme étant un sol limoneux à fragipan (source: cartes des sols de Belgique; numérisation BE-IBGE)

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

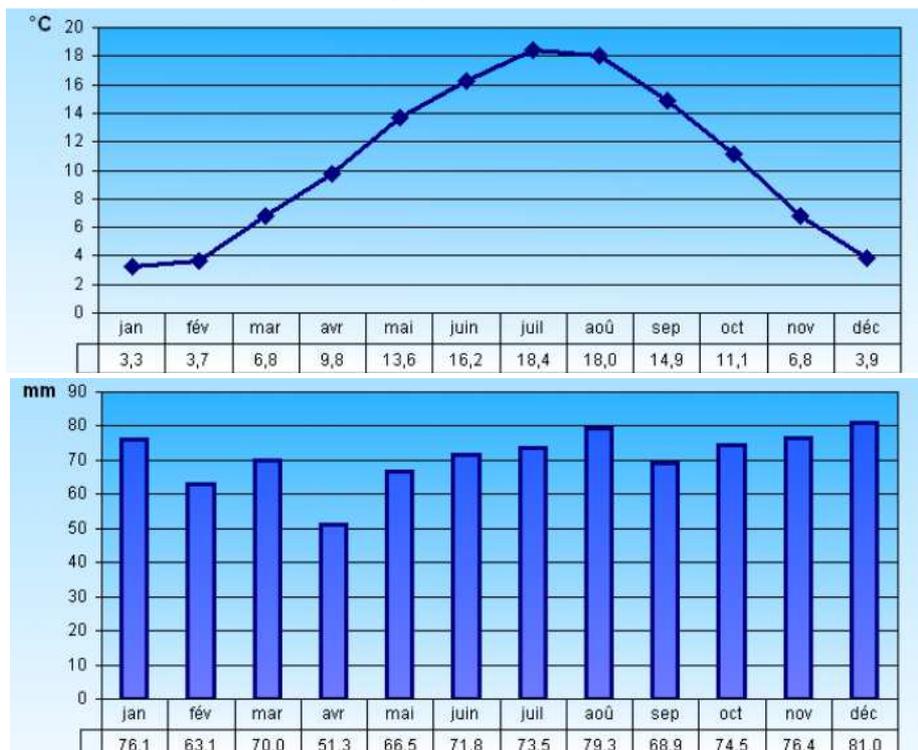


Figure 4: Température et précipitations mensuelles mesurées à la station météorologique d'Uccle, 1981-2010 (IRM, 2011).

Les valeurs météorologiques mesurées à Uccle en 2014 sont présentées au Tableau 1. Par rapport aux normales mensuelles observées de 1981 à 2010, les précipitations totales du mois d'avril et mai sont plus faibles que la normale alors que celles de juin, juillet et août sont bien plus élevées. Les températures moyennes s'écartent des normales mensuelles en avril et en août 2014 avec de plus faibles valeurs.

Tableau 1: Valeurs climatiques mesurées en avril, mai, juin, juillet et août 2014 comparées aux normales mensuelles calculées sur la période 1981-2010 (IRM, Uccle)

	P (mm)	P normale (mm)	T moy (°C)	T normale (°C)
Avril 2014	20,1	51,3	12,4	9,8
Mai 2014	54,1	66,5	13,5	13,6
Juin 2014	95	71,8	16,5	16,2
Juillet 2014	117,2	73,5	19,3	18,4
Août 2014	136	79,3	16,2	18

4. Etat sanitaire et dépérissement

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 2).

Tableau 2: 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

5. Mise en place de la campagne du suivi sanitaire de 2014

Les activités suivantes ont été réalisées en 2014 :

- (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 conformément au protocole *ICP Forests*
 - c. La mise en place du suivi photographique des houppiers en hêtraie
- (ii) Le contrôle qualité, comprenant
 - a. La formation pratique des adjoints forestiers le 28 juin 2013
 - b. La revisite de 8 placettes du suivi sanitaire par l'UCL
- (iii) Le traitement des données relatives à l'état sanitaire recueillies en 2013

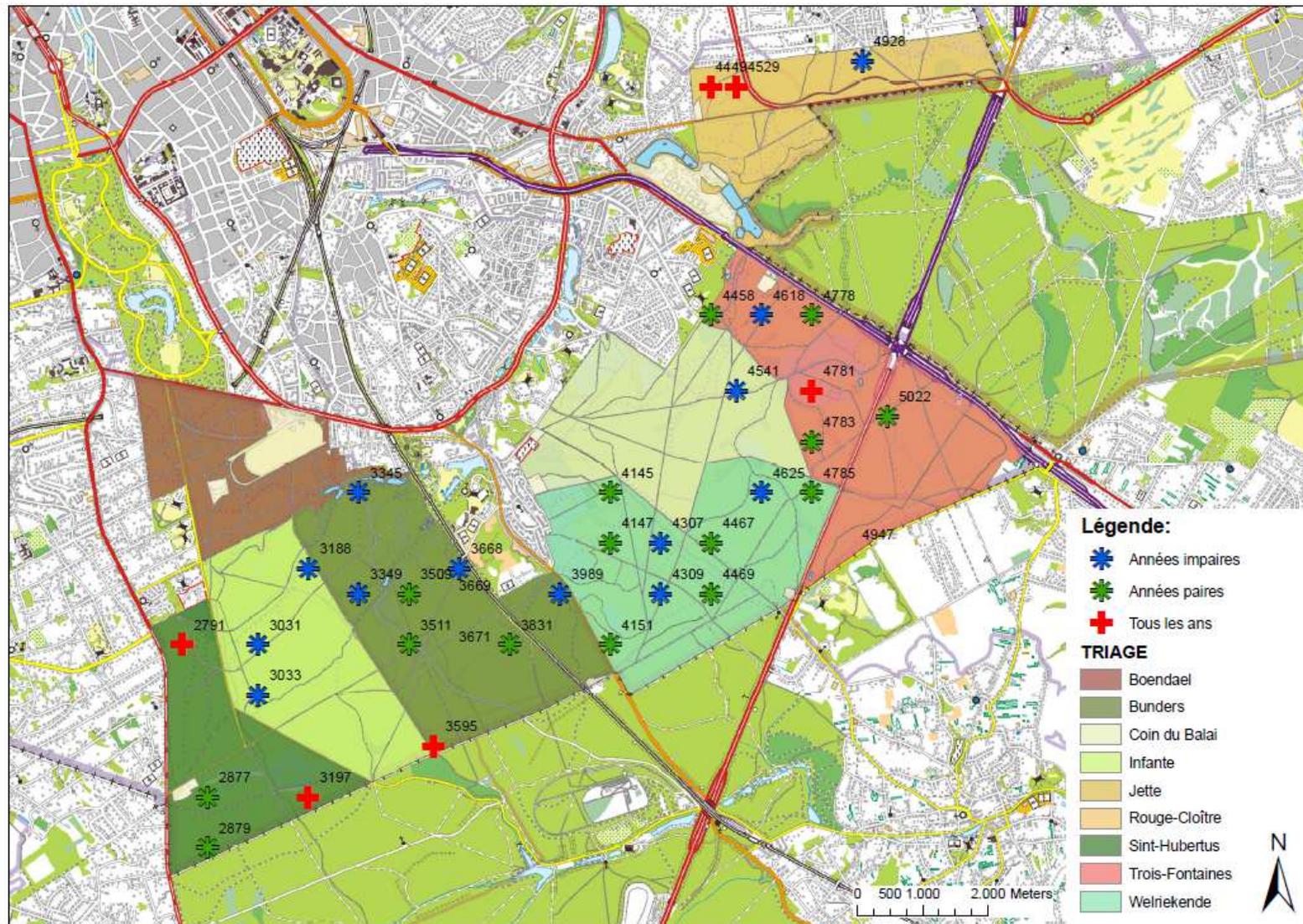
5.1. Plan d'échantillonnage

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 2014 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 et chênaie

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 codominants dont le houppier capte la lumière directe. Les arbres surcimés ne sont 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, depuis 2009, le nombre d'arbres observés dans certaines placettes est supérieur à celui préconisé par le protocole. Par conséquent, la règle précédemment citée sera appliquée uniquement pour les nouvelles placettes de remplacement. Les anciennes placettes, quant-à-elles conserveront 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.

En 2014, la campagne d'observation a été coordonnée par MM. Bram Aertsen et Bart Swerts désignés correspondants-observateurs parmi les adjoints forestiers.

5.2. Protocole d'évaluation

Le protocole suivi lors de la campagne a été conçu dans le cadre du programme international concerté sur les forêts (*ICP Forests*). L'objectif est d'évaluer différents critères tels que la défoliation, la décoloration, la fructification, les dommages et les symptômes 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 un document « aide-mémoire » de terrain. L'évaluation de l'état du houppier est estimée au sein de la « couronne observable », c'est-à-dire, la partie du houppier non concurrencée par les arbres voisins. Les dommages sont, quant à eux, estimés sur les différentes parties de l'arbre (houppier, tronc, collet).

5.3. Caractéristiques des arbres observés

5.3.1. Effectifs et distribution des arbres en classes de grosseurs

Les effectifs de 2014 sont légèrement inférieurs à ceux de l'année 2012 (voir 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 2014

	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Nombre de placettes	34	21	19	21	19	21
Nombre de chênes	20	49	42	66	59	58
Nombre de hêtres	200	141	111	140	114	132
Total	220	190	153	206	173	190

Les effectifs considérés pour caractériser les arbres observés lors de la campagne 2014 incluent l'ensemble des arbres soumis à au moins une observation. Par contre, les résultats développés du point 6.1. au point 6.6. inclus, ont été obtenus en écartant les arbres dominés et les arbres dont la défoliation n'a pas été notée. Durant la campagne 2014, au sein de 21 placettes, 55 chênes indigènes et 100 hêtres ont été observés pour leur défoliation soit un total de 155 arbres (voir Tableau 4). L'analyse des dommages a été effectuée sur base des effectifs totaux hors arbres dominés. Seul 43 hêtres et 38 chênes indigènes présentaient un ou plusieurs dommages.

Tableau 5: Effectifs des arbres observés durant la campagne 2014.

Effectifs	Hêtres	Chênes pédonculés	Chênes sessiles
Caractérisation	132	47	11
Défoliation notée	100	45	10
Domage(s) observé(s)	43	36	2

La ventilation des effectifs observés selon les classes de circonférence est illustrée à la Figure 6. Tout d’abord, le nombre de chênes pédonculés décroît selon une allure proche de l’exponentielle décroissante avec la circonférence. On observe un faible nombre d’individus pour la classe des circonférences comprises entre 80 et 99 cm.

Les chênes sessiles, quant-à-eux, sont faiblement représentés puisque seuls un à trois arbres sont compris dans six classes de circonférence. Ceci s’explique notamment par le fait qu’en 2009, lors du choix des placettes, le chêne pédonculé n’était pas différencié du chêne sessile dans le cadre du suivi. Les deux essences étaient confondues sous la dénomination « chênes indigènes ». Depuis 2013, la distinction entre les chênes indigènes est réalisée étant donné les différences écologiques des essences.

La distribution des hêtres décroît sensiblement à partir de la classe de circonférence 220 à 239. Les classes de circonférence inférieure à celle-ci présentent un nombre d’arbres relativement similaire qui oscille entre 11 et 14 individus.

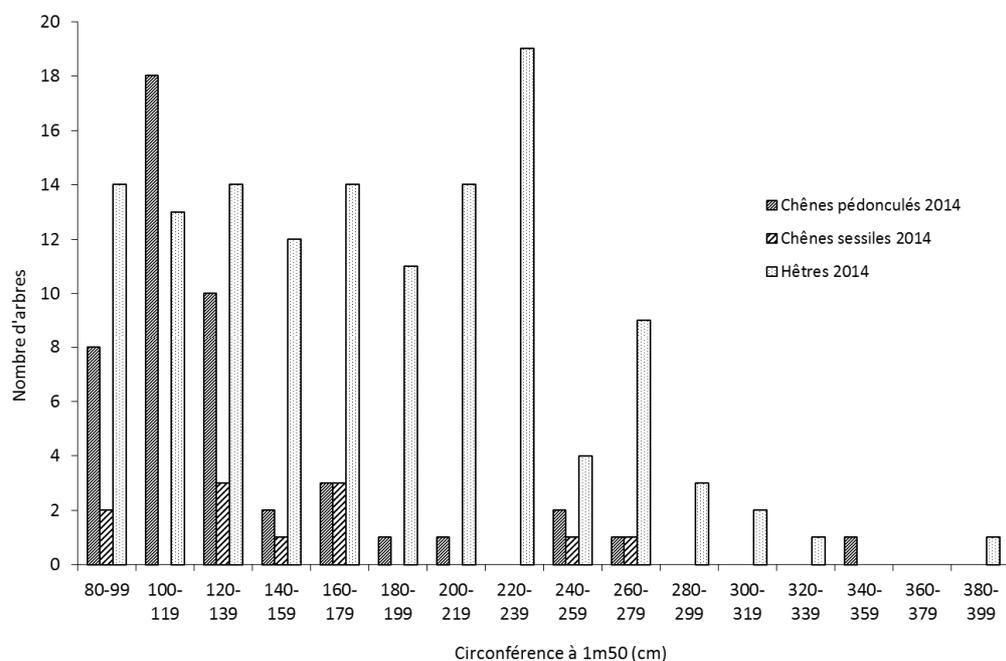


Figure 6: Distribution des arbres observés selon les classes de circonférence

5.3.2. 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 six classes allant de « couronne touchée par un côté » à « couronne touchée par quatre côtés ». A ces quatre niveaux de concurrence, on ajoute également deux autres classes : « houppier en croissance libre » pour les arbres isolés et « arbre dominé » pour les arbres présents en sous-étage bien que ces derniers sont exclus des analyses statistiques.

La classe « couronne touchée par quatre côtés » est la plus représentée pour le chêne pédonculé et le hêtre, soit respectivement 31% et 43% des effectifs (voir Figure 7). A l'inverse, les houppiers des chênes sessiles sont moins concurrencés puisque 8 arbres sur 11 ont leur couronne touchée sur un ou deux côtés.

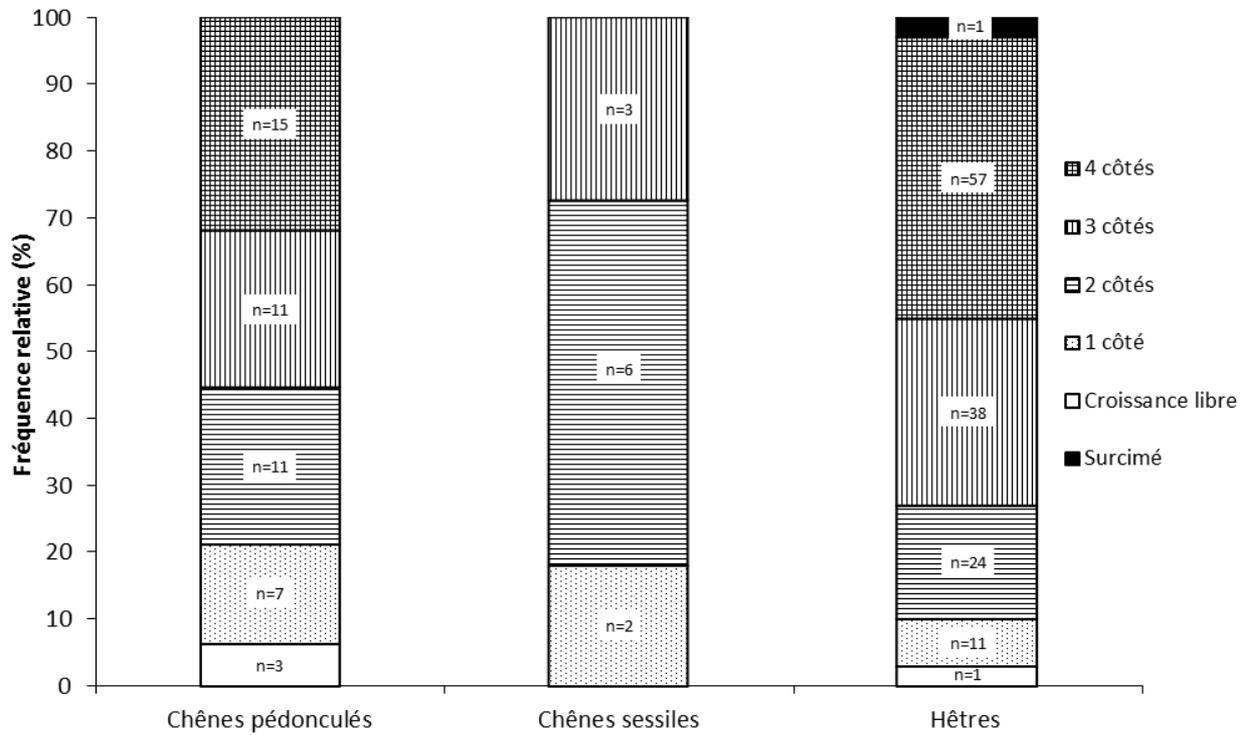


Figure 7: Distribution des arbres observés selon le degré de concurrence (2014)

5.3.3. 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. Dominé¹ : arbre largement dépassé par les cimes voisines et ne recevant aucune lumière directe.

Comme l'indique la Figure 8, le statut « arbre codominant » est le mieux représenté pour les trois essences ; 72% des chênes pédonculés sont codominants contre 54% pour les chênes sessiles et 60% pour les hêtres.

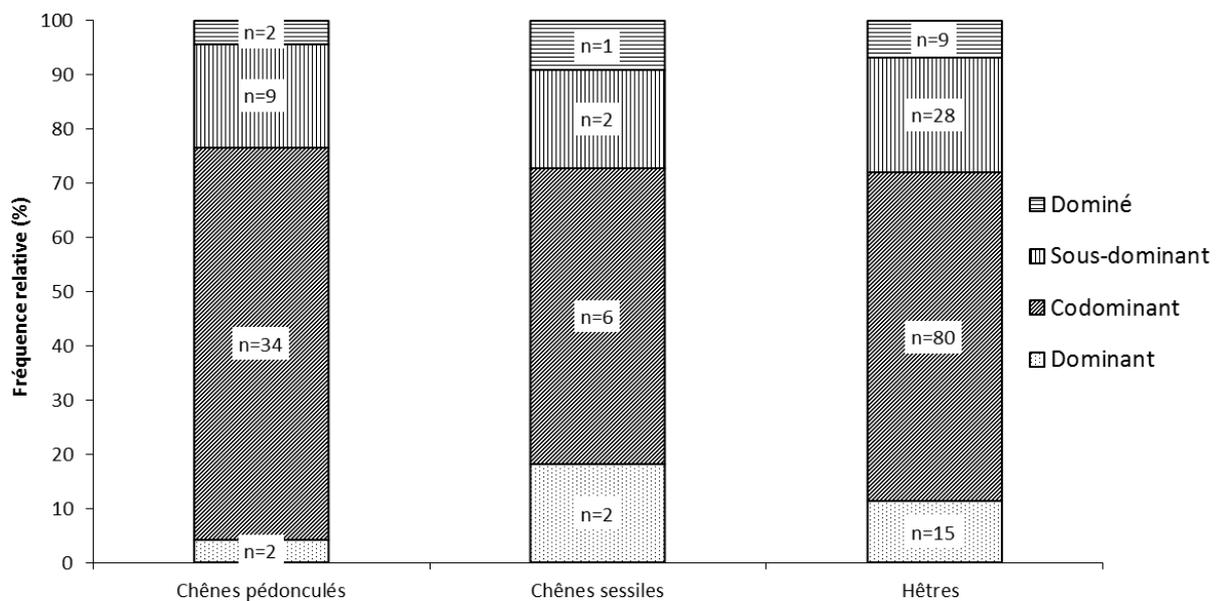


Figure 8: Proportion des statuts sociaux en fonction des essences (2014)

5.3.4. Visibilité

La visibilité concerne le houppier observable. Quatre catégories sont retenues :

- i. Couronne entièrement visible ;
- ii. Couronne partiellement visible ;
- iii. Couronne partiellement visible mais à contre-jour ;

¹ Selon le protocole les arbres dominés sont exclus du suivi de l'état sanitaire. Néanmoins, les arbres ayant ce statut social ont été observés et pris en compte uniquement dans cette analyse.

iv. Couronne non visible due à la concurrence 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 concurrents, 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.

Le graphique ci-dessous indique que 19% des chênes indigènes et 31% des hêtres présentent une couronne non visible. Les houppiers sont entièrement visibles pour 36% des chênes pédonculés, 18% des chênes sessiles et 33% des hêtres.

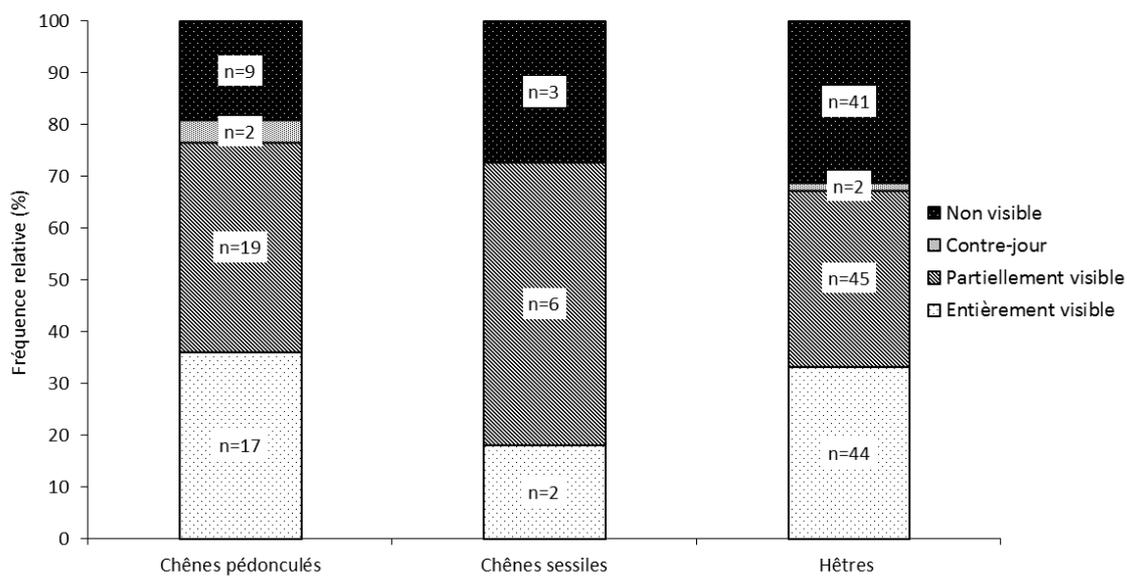


Figure 9: Distribution des arbres en fonction de la visibilité et de l'essence (2014)

5.4. Encodage et traitement des données

L'ensemble des données recueillies durant la campagne 2014 ont été encodées et illustrées sous forme de graphiques grâce au logiciel Excel, puis, exportées dans la base de données MS Access. Le traitement statistique des données a été effectué à l'aide des logiciels JMP 9 et R 2.15.1.

5.5. Contrôle-qualité

Afin de s'assurer de la fiabilité des données, le protocole prévoit des contrôles qualité qui s'effectuent à deux niveaux : (i) en amont, la formation des observateurs avant la campagne d'observation ; (ii) en aval, le contrôle des observations de terrain par une équipe de référence.

Les adjoints forestiers BE-IBGE sont formés chaque année depuis 2009 ; c'est pourquoi, 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 24 juin 2014 étaient de (i) présenter les résultats de la campagne 2013, (ii) rappeler la nouvelle classification des formes du houppier du hêtre (voir point 6.3.) 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 ont été préalablement sélectionnés sur l'ensemble de la 2^e brigade. Ces arbres ont été localisés précisément et seront observés lors de prochaines formations. Cette méthode assure l'observation d'arbres présentant des morphologies et des états sanitaires variés avant chaque campagne. Cinq arbres ont été ajoutés en 2014 pour améliorer la représentativité de l'échantillon. Un total de 39 arbres a été observé durant la formation 2014.

Pour assurer le contrôle-qualité des données, l'équipe de référence de l'UCL a revisité six placettes en hêtraie (n° 2877, 2879, 4145, 4147, 4469, 5022) ainsi que trois placettes en chênaie (n° 2791, 3197 et 4529) 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 75 arbres a été contrôlé, cet échantillon comprend 20 chênes pédonculés, 9 chênes sessiles et 46 hêtres soit respectivement 44%, 90% et 45% des effectifs notés en défoliation (voir Tableau 6). La proportion de cote de défoliation ne variant pas de plus de 10% près entre les deux équipes atteint 62% pour les chênes pédonculés, 100% pour les chênes sessiles et 80% pour les hêtres. Pour toutes essences confondues, 77% des arbres observés deux fois ont la même cotation à 10% près; le critère de qualité exigé par le protocole est donc respecté.

Tableau 6: Moyenne des écarts de défoliation par essence observée en 2014 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 pédonculés	20	44	28	20	-8	Prob.> t = 0,03*
Chênes sessiles	9	90	12	15	3	Prob.> t = 0,3
Hêtres	46	45	30	26	-4	Prob.> t = 0,077

On observe que la moyenne des écarts de défoliation entre BE-IBGE et l'UCL est de - 8 % pour les chênes pédonculés, 3 % pour les chênes sessiles et de -4 % pour les hêtres. De plus, les tests appariés indiquent que la différence des moyennes de défoliation entre les deux équipes est significativement différente de 0 avec un seuil de risque $\alpha = 0,05$ pour les chênes pédonculés contrairement aux hêtres et aux chênes sessiles (voir dernière colonne Tableau 6). Nous pouvons donc conclure que bien que

les données soient fiables pour toutes essences confondues au sens du protocole *ICP Forests*, les observateurs **sous-estiment** de manière significative la défoliation des chênes pédonculés. L'inverse fut observé en 2014, où les observateurs **surestimaient** de manière significative la défoliation des chênes pédonculés (Moyenne des écarts BE-IBGE – UCL(%)= 6, Prob.> |t| = 0,0014*).

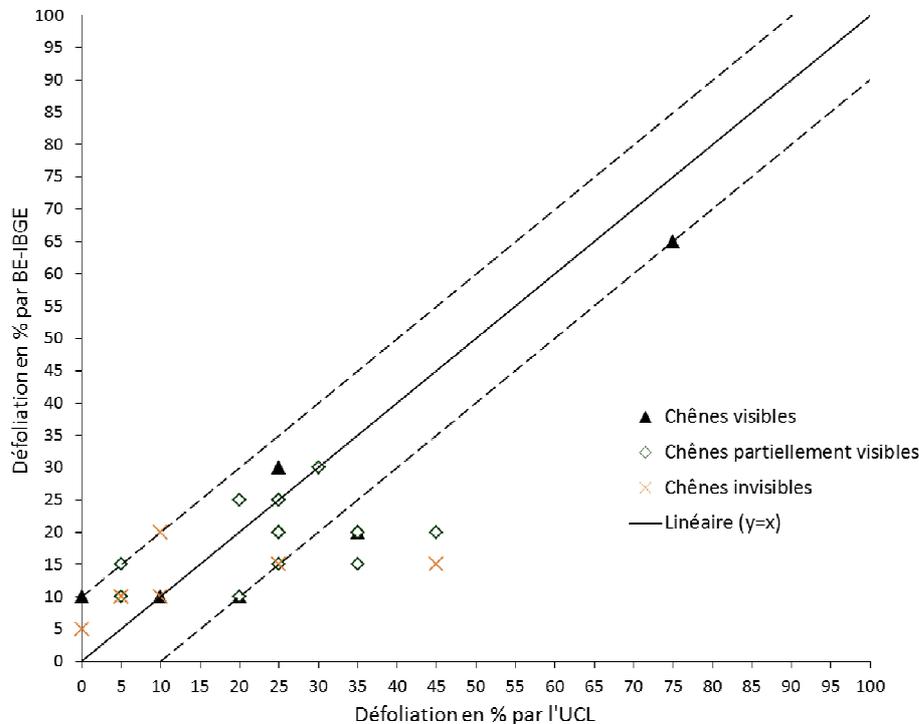


Figure 10: Comparaison des observations de défoliation des chênes entre BE-IBGE et l'UCL. Les droites en pointillés délimitent un intervalle de 10% de part et d'autre de la droite $y=x$ (correspondance parfaite)

Les figures 10 et 11 illustrent les écarts de cotation entre BE-IBGE et l'UCL selon les conditions de visibilité. Parmi les 7 chênes indigènes sur les 29 en dehors de l'intervalle de cotation de 10 %, 5 ont leur couronne partiellement visible. En effet, il s'agit d'arbres situés sur la placette 4529 (Rouge-Cloître) qui est une placette difficile à observer car la visibilité est particulièrement médiocre. Cette placette sera ajoutée aux observations réalisées durant la journée de formation en 2015. Les 2 autres chênes en dehors de l'intervalle de cotation de 10% sont un arbre dont la couronne est invisible et un chêne particulièrement difficile à coter dû à une forme peu commune.

En chênaie, la qualité des observations s'est améliorée par rapport à la campagne 2013 puisque la problématique liée à une surestimation de la défoliation du chêne pédonculé n'est plus observée en 2014 et que les arbres situés en dehors de l'intervalle de cotation de 10 % sont particulièrement difficiles à évaluer. D'autant plus que pour l'ensemble des chênes, 76% des arbres observés deux fois ont la même cotation à 10% près. ; le critère de qualité exigé par le protocole est donc respecté.

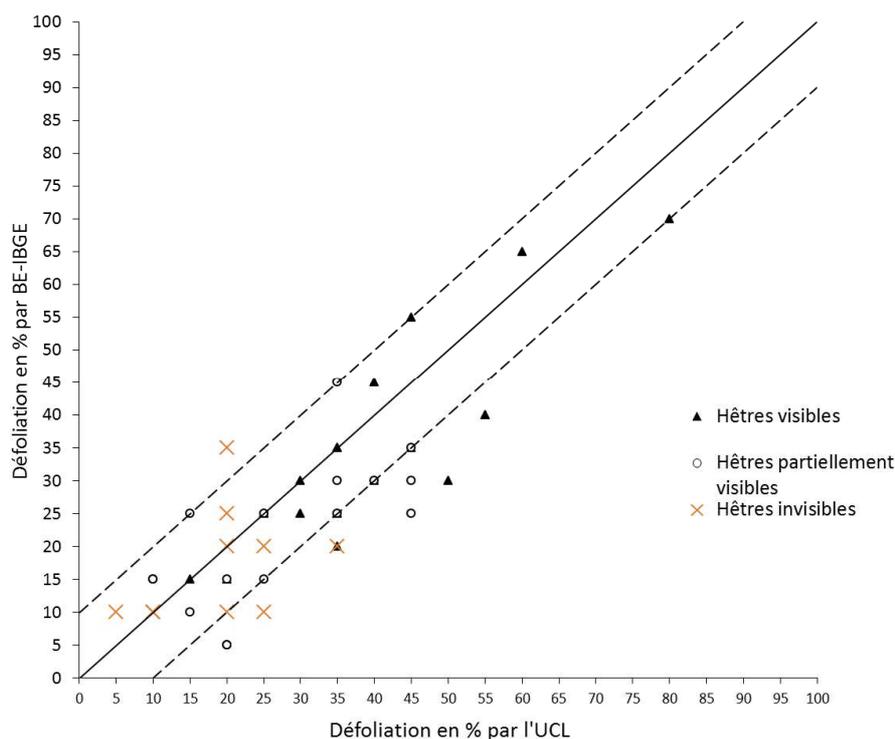


Figure 11: Comparaison des observations de défoliation des hêtres entre BE-IBGE et l'UCL. Les droites en pointillés délimitent un intervalle de 10% de part et d'autre de la droite $y=x$ (correspondance parfaite)

Parmi les 9 hêtres sur les 46 contrôlés en dehors de l'intervalle de cotation de 10 %, 3 ont leur couronne partiellement visible et 3 présentent une couronne invisible. On observe également sur la figure ci-dessus qu'un nombre important de hêtres présentent une couronne invisible. Malgré cette contrainte, les évaluations des observateurs sont proches des évaluations de contrôle. On observe néanmoins une tendance à la sous-estimation de la défoliation.

Le bilan de ce contrôle 2014 est positif en hêtraies et en chênaies. Ce résultat assure la pertinence des résultats présentés dans les points suivants.

6. Résultats

Cette section examine successivement :

- les pourcentages de défoliation des arbres de la campagne 2014 ;
- la comparaison des valeurs de 2014 par rapport à celles enregistrées depuis 2009 ;
- l'évolution graphique de 2009 à 2014 du degré de fructification,
 - de la structure de la couronne,
 - de la présence de pousses épïcormiques et
 - de la décoloration des feuilles ;
- la relation statistique, par comparaison des moyennes ou par régression linéaire, de la défoliation des chênes indigènes et des hêtres en fonction :
 - de la circonférence,
 - du degré de concurrence,
 - de la décoloration,

- de la fructification et
- de la forme du houppier ;
- la distribution des dommages selon l'essence et les placettes d'observation.

6.1. Défoliation

6.1.1. 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 dépérissant lors des éclaircies. Ce dernier effet, pourrait éventuellement être contrôlé avec la mise en place de certaines mesures.

6.1.2. Défoliation moyenne des arbres de la campagne 2014

Les boxplot suivants permettent de visualiser la distribution des données et les statistiques élémentaires ; la Figure 10 en illustre la légende.

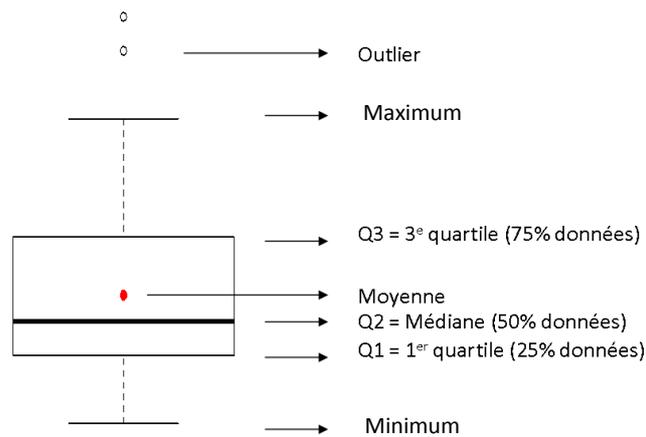


Figure 10: Légende d'un boxplot

La

présente la distribution des valeurs de défoliation pour les 45 chênes pédonculés, les 10 chênes sessiles et les 100 hêtres repartis au sein des 21 placettes et dont la défoliation a été notée. La défoliation moyenne est de 20.1% pour les chênes pédonculés, 13% pour les chênes sessiles et de 23.4% pour les hêtres. De plus, on remarque que 50% des valeurs de défoliation, centrées sur la médiane, sont comprises entre 15 et 25% (Q1-Q3) pour les chênes pédonculés, entre 10 et 20% pour les chênes sessiles et entre 15 et 30% pour les hêtres. En conclusion, les degrés de défoliation sont plus variables pour les hêtres.

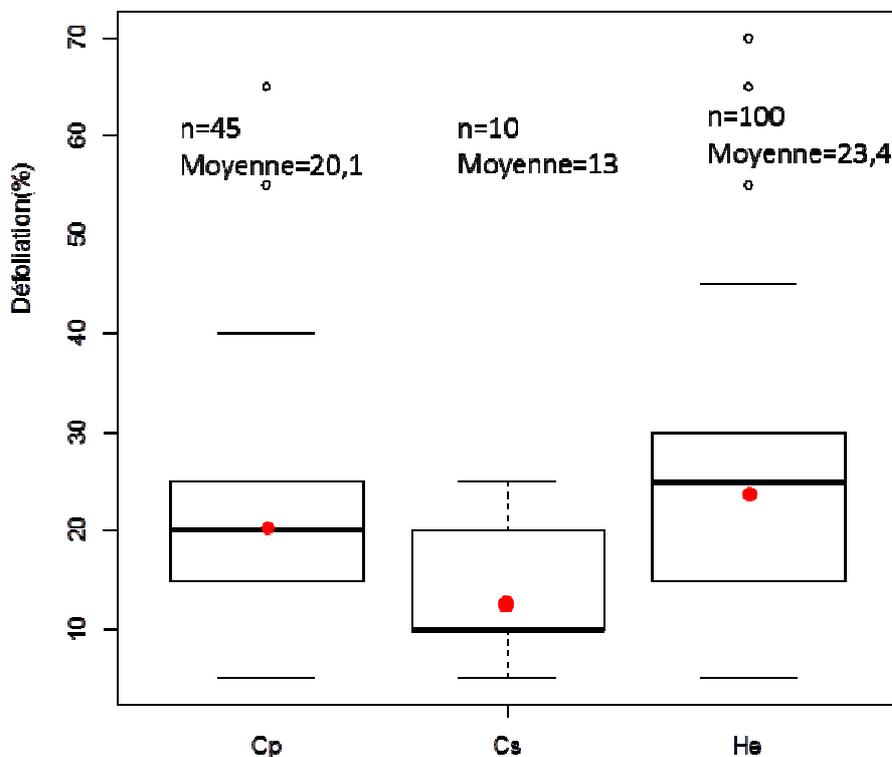


Figure 11: boxplot de la défoliation des chênes pédonculé (Cp), sessiles (Cs) et des hêtres (He) en 2013

La Figure 12 complète la

car elle illustre le nombre d'arbres attribués à chaque classe de défoliation. Les effectifs en chênes suivent une distribution de type log-normale étirée vers la droite, identique à la tendance observée depuis 2010.

La distribution des hêtres, de type log-normale étirée vers la droite, est similaire à celle observée en 2010. Par contre, en 2012 le nombre de hêtres décroissait de manière approximativement linéaire avec la défoliation. Il apparaît que la tendance a évolué vers une distribution log-normale suite à une diminution des effectifs présentant une défoliation entre 0 à 19% et à une augmentation des effectifs présentant une défoliation entre 20 à 29%. Les effectifs maximum sont atteints pour des défoliations de 20 à 29 %.

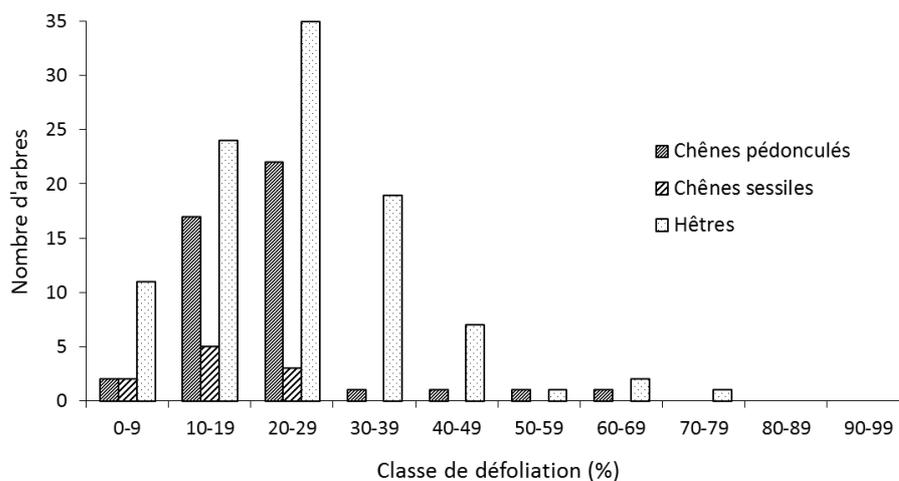
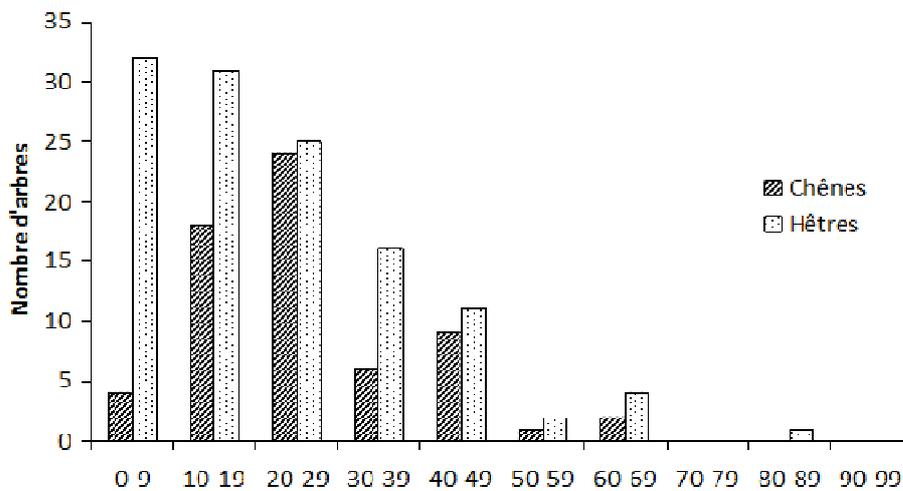


Figure 12: Distribution des arbres selon les classes de défoliation en 2012 (au-dessus) et en 2014 (en-dessous)

La

repré- prend les valeurs de défoliation attribuées aux arbres dont la couronne est entièrement visible (voir 5.3.3). Les arbres dont la couronne est partiellement ou complètement cachée par les arbres voisins n'ont pas été pris en compte afin d'exclure les valeurs de défoliation qui ont été extrapolées à partir d'un seul angle de vue réduit. Au total, 17 chênes pédonculés, 2 chênes sessiles et 44 hêtres ont été retenus. La défoliation moyenne des arbres visibles chez les chênes est similaire à celle de l'ensemble des arbres puisque le déficit foliaire moyen est supérieur de 2% pour les chênes pédonculés et est inférieure de 3% pour les chênes sessiles ; soit respectivement 22.3% pour les chênes pédonculés, 10% pour les chênes sessiles. Par contre, les hêtres présentent une augmentation de 7% par rapport à l'ensemble des arbres. 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 ; les arbres les plus visibles sont cotés plus durement que les autres. On observe ce phénomène après les éclaircies où l'évaluation de la défoliation des arbres résiduels augmente systématiquement.

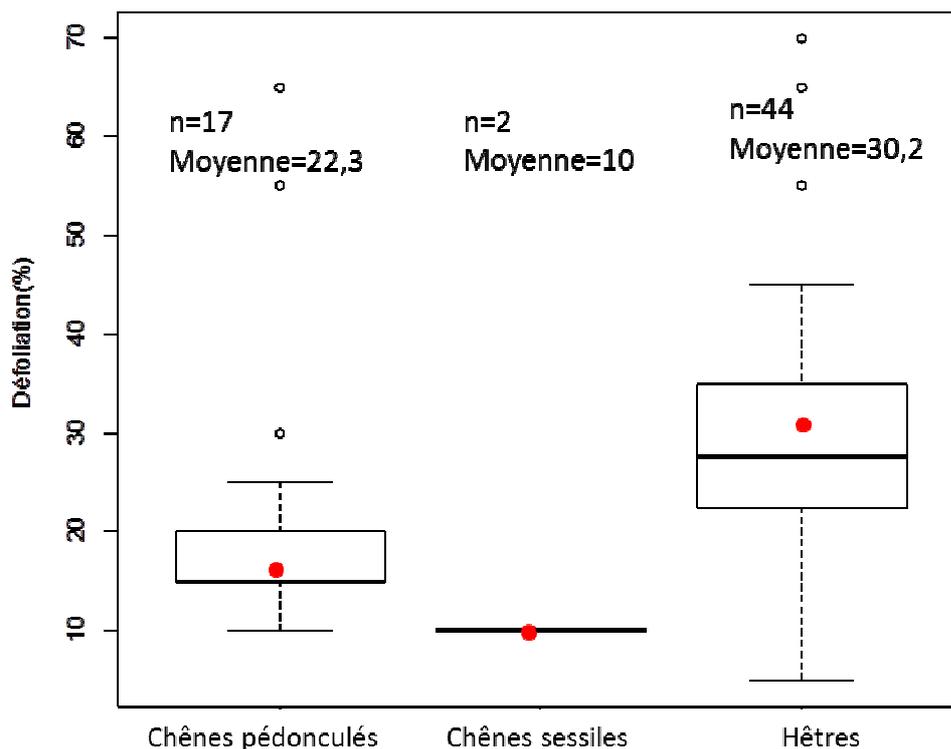


Figure 13: Boxplot de la défoliation des arbres dont la couronne est entièrement visible en fonction de l'essence en 2014. Pour comparaison, la Figure 11 reprend l'ensemble des arbres.

Le Tableau 7 synthétise les valeurs de défoliation et circonférences moyennes par placette et par essence.

Tableau 7: Moyenne et écarts-types des défoliations et des circonférences par essence et par placette (2014)

Chênes pédonculés						
Placette	Typologie	Effectif	Défoliation (%)		C150 (cm)	
			Moyenne	Ecart-type	C150	Ecart-type
2791	Hêtraies- Chênaies	4	15	4	120	14
2877	Hêtraies pures	1	30	x	197	x
3197	Hêtraies- Chênaies	4	18	6	193	44
3595	Hêtraies- Chênaies	3	35	17	247	27
4151	Chênaies pures	5	25	11	123	17
4449	Chênaies pures	15	15	6	124	67
4529	Chênaies pures	11	23	15	113	11
4781	Hêtraies - Chênaies	2	20	7	137	16
		45	20	11	137	56
Chênes sessiles						
Placette	Typologie	Effectif	Défoliation (%)		C150 (cm)	
			Moyenne	Ecart-type	C150	Ecart-type
2791	Hêtraies - Chênaies	6	9	4	141	34
4147	Hêtraies pures	2	18	11	192	90
4529	Chênaies pures	1	20	x	262	x
4781	Hêtraies - Chênaies	1	20	x	175	x
		10	13	7	167	56
Hêtres						
Placette	Typologie	Effectif	Défoliation (%)		C150 (cm)	
			Moyenne	Ecart-type	C150	Ecart-type
2791	Hêtraies -Chênaies	6	16	5	157	19
2877	Hêtraies pures	9	28	8	219	37
2879	Hêtraies pures	1	40	x	225	x
3197	Hêtraies -Chênaies	7	19	10	217	48
3509	Hêtraies pures	7	25	7	199	42
3511	Hêtraies pures	7	33	16	233	50
3595	Hêtraies -Chênaies	1	25	x	291	x
3831	Hêtraies pures	6	31	6	237	40
4145	Hêtraies pures	8	34	19	203	41
4147	Hêtraies pures	7	17	7	160	112
4458	Hêtraies pures	5	19	8	97	23
4467	Hêtraies pures	5	8	4	108	18
4469	Hêtraies pures	4	43	20	255	34
4778	Hêtraies pures	8	17	12	152	32
4783	Hêtraies pures	7	16	9	219	56
4785	Hêtraies pures	7	14	11	202	48
5022	Hêtraies pures	5	32	4	173	26
		100	23	13	192	61

6.1.3. Evolution de la défoliation moyenne de 2009 à 2014

Les données des campagnes de 2009 à 2013 ont été extraites de la base de données MS Access. L'ensemble de ces données ont été traitées une nouvelle fois en 2014.

Afin de tester si les moyennes des différentes années sont significativement différentes ou non, des tests ANOVA ont été réalisés. Si l'hypothèse d'égalité des moyennes est rejetée, alors le test de Tukey (comparaisons multiples de moyennes) peut être appliqué afin d'établir quels couples sont significativement différents entre eux. Dans la présentation des résultats, les moyennes de défoliation accompagnées de lettres communes ne sont pas significativement différentes entre elles au seuil de 0,05.

La Figure 14 reflète l'évolution des valeurs de défoliation des chênes de 2009 à 2014. Les chênes pris en considération appartiennent soit aux placettes de type chênaie soit aux placettes de type hêtraie-chênaie.

La défoliation moyenne des chênes est passée de 28% à 30% de 2009 à 2010 et de 26% à 24% de 2011 à 2012 puis 21% à 19% de 2013 à 2014. Le 1^{er} et le 3^e quartile de la distribution atteignent 25% et 30% en 2009 ; 25% et 35% en 2010 ; 20% et 35% en 2011 ; 15% et 30% en 2012, 10% et 25% en 2013 et 10% et 22% en 2014. De manière générale, la variabilité des niveaux de défoliation a augmenté de 2009 à 2011 et se stabilise depuis. Par ailleurs, la défoliation moyenne des chênes indigènes de 2014 est significativement plus faible que celle de 2010 et 2011 et non significativement plus faible que celle des autres années de mesures. La défoliation du chêne indigène en forêt de Soignes diminue depuis 2010. Cependant, il faut également tenir compte de la surestimation de la défoliation des chênes mise en évidence ces dernières années par le contrôle-qualité.

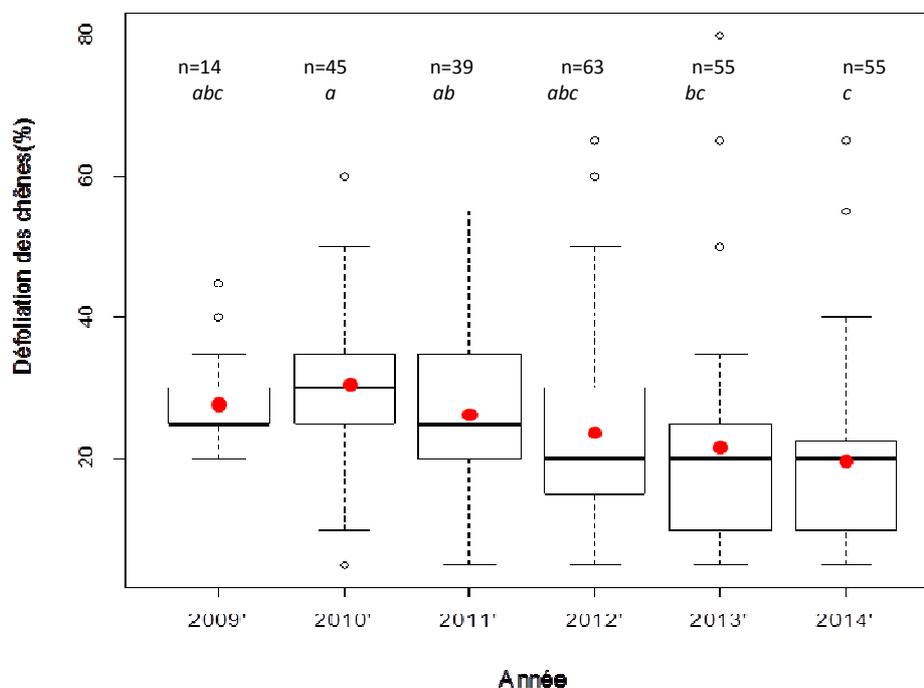


Figure 14: Distribution des valeurs de défoliation des chênes de 2009 à 2014

La défoliation moyenne des hêtres diminue de 37% à 27% de 2009 à 2010, de 29% à 22% de 2011 à 2012 et de 27% à 23% de 2013 à 2014. La moyenne élevée de 2009 peut s'expliquer par des conditions climatiques difficiles, une forte fructification et un manque d'expérience dans l'évaluation de la défoliation (Braem, 2011). En effet, en 2009, 40% des hêtres de contrôle, soit un effectif restreint de 6 arbres, étaient surestimés de minimum 10% en défoliation. La distribution des valeurs est plus large comparativement à celle des chênes. En effet, le 1^{er} et le 3^e quartile, atteignent 27% et 45% en 2009 ; 15% et 35% en 2010 ; 15% et 40% en 2011 ; 10% et 30% en 2012, 15 et 35% en 2013 et 15 et 30 en 2014. Statistiquement la moyenne de 2009 est significativement différente des autres années. Il en est de même entre les moyennes de 2012 et 2014, et celle de 2011. Rappelons que les séries d'arbres observés les années paires et impaires sont différentes. Par rapport à 2012, la défoliation est la même mais la distribution des valeurs est moins large (voir Figure 12).

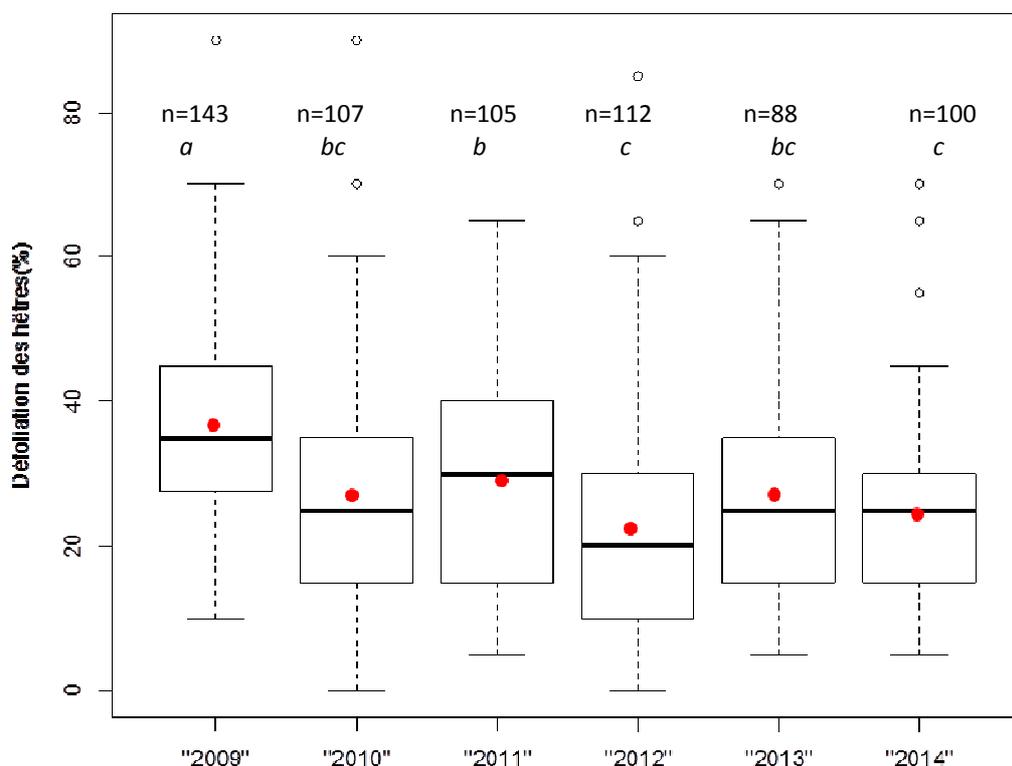


Figure 15: Distribution des valeurs de défoliation des hêtres de 2009 à 2014

Le Tableau 8 résume les valeurs moyennes de défoliation par année et essence.

Tableau 8: Moyenne de défoliation par année et essence

	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Chênes	28% (n=14) <i>abc</i>	30% (n=45) <i>a</i>	26% (n=39) <i>ab</i>	24% (n=63) <i>abc</i>	21% (n=55) <i>bc</i>	19% (n=55) <i>c</i>
Hêtres	37% (n=143) <i>a</i>	27% (n=107) <i>bc</i>	29% (n=105) <i>b</i>	22% (n=112) <i>c</i>	27% (n=88) <i>bc</i>	23% (n=100) <i>c</i>

Excepté pour l'année 2009, la moyenne de défoliations du hêtre reste relativement stable dans le temps.

6.1.4. Evolution de la défoliation moyenne d'un même échantillon d'arbres

La Figure 16 représente l'évolution de la défoliation de 6 chênes notés en 2009, 2010, 2012 et 2013. L'année 2011 n'a pas été considérée puisque certains individus de l'échantillon n'ont pas été observés uniquement cette année-là. Analyser l'évolution d'un même échantillon d'arbres permet de minimiser le biais dû (i) à la variabilité des conditions d'observation (visibilité des arbres, concurrence, etc.) si celles-ci ne changent pas dans le temps et (ii) à la variabilité des valeurs de défoliation due à l'évaluation d'arbres situés dans des conditions stationnelles différentes (sol, structure du peuplement, etc.).

Nous constatons que la variation interannuelle est importante car elle oscille entre 0 et 25% et ce, aussi bien négativement que positivement. Par ailleurs, sur cet échantillon restreint, aucune tendance ne peut être dégagée.

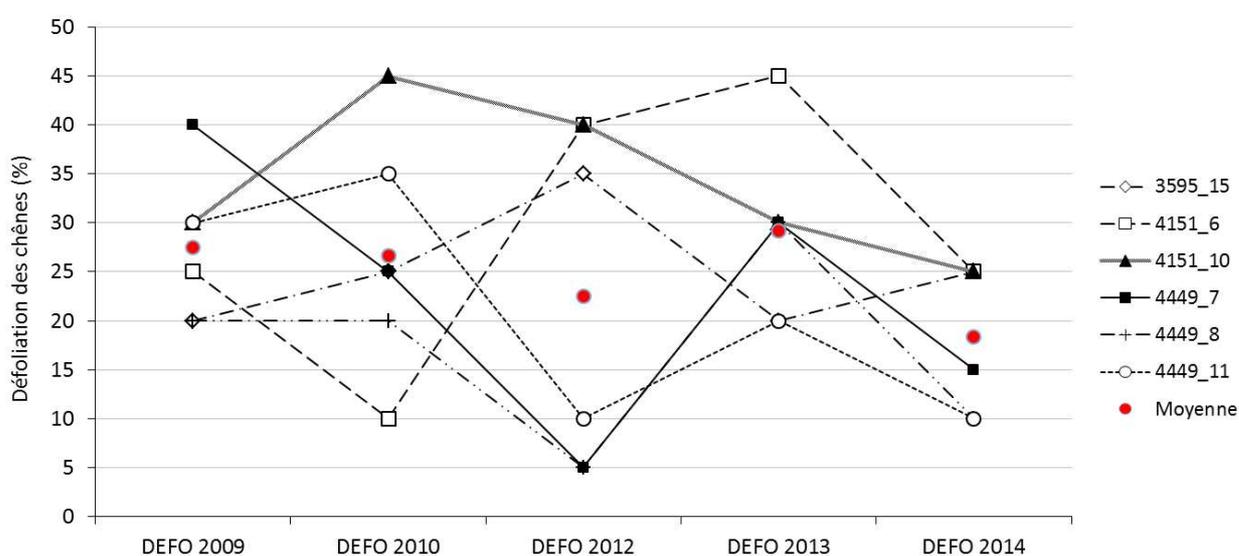


Figure 16: Evolution individuelle de la défoliation de 6 chênes

Il apparaît que la défoliation moyenne des 6 chênes est constante. De fait, les moyennes, non significativement différentes entre elles, s'élèvent à 27% en 2009 et 2010, 22% en 2012, 29% en 2013 et 18 en 2014. Le niveau moyen de défoliation de cet échantillon commun diffère de maximum 5% par année par rapport à l'échantillon total. Toutefois, aucune déduction fiable ne peut être dégagée d'un échantillon de 6 arbres.

Les hêtres observés les années paires relèvent d'un échantillonnage différent. C'est pourquoi, les données de la campagne 2009, 2011 et 2013 n'ont pas été considérées dans l'analyse. La défoliation moyenne de l'échantillon commun de 72 hêtres est de 29% en 2010 ; 25% en 2012 et 25% en 2014, ces valeurs s'inscrivent dans la même gamme que celles calculées pour l'ensemble des hêtres.

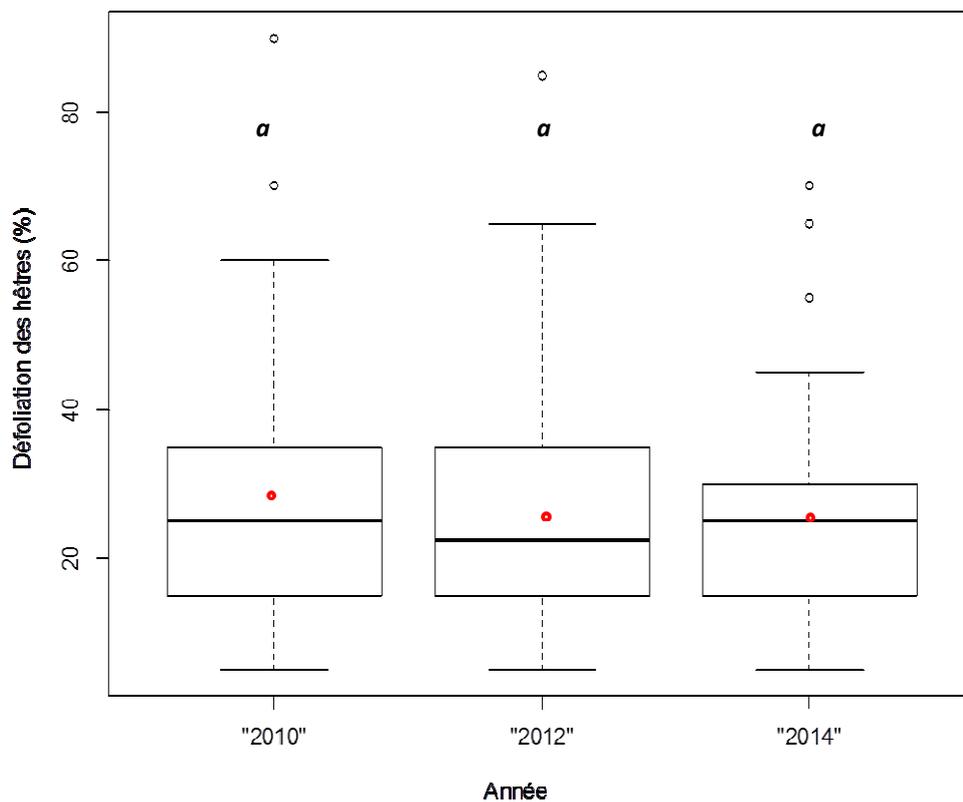


Figure 17: Evolution de la défoliation d'un même échantillon de 72 hêtres entre 2010, 2012 et 2014

6.2. 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).

Hormis pour 1 chêne pédonculé et 1 chêne sessile soit respectivement 2% et 10% des effectifs, aucune fructification n'a été observée en 2013 chez les chênes. 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 (voir Figure 18). On notera qu'en 2014, la fructification est plus abondante qu'en 2012.

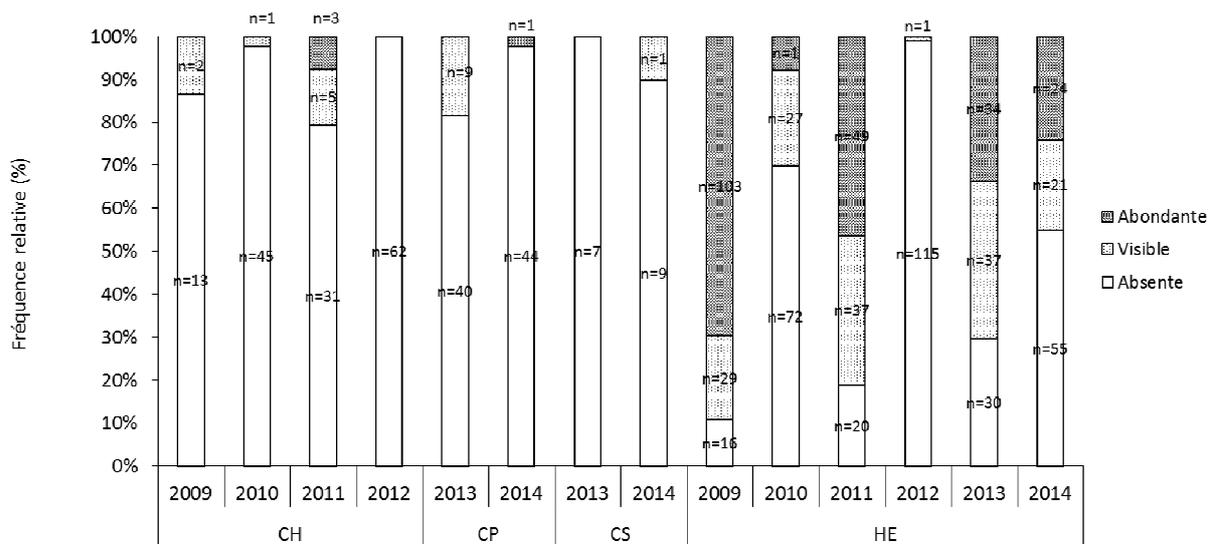


Figure 18: Evolution du degré de fructification de 2009 à 2014 pour les chênes et les hêtres

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

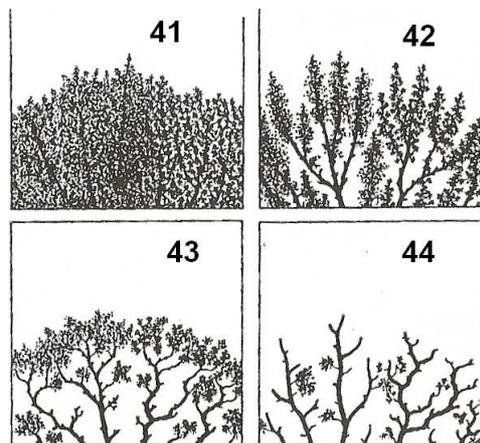


Figure 19: Les quatre formes de houppier des chênes, avec leurs codes (Eichhorn et al., 2010)
 41: ramification dense ; 42: simplification légère ; 43: simplification importante ; 44: déclin

Les années précédentes la forme du houppier du hêtre était notée selon 4 classes, de manière similaire à celle du chêne. En 2013, cette classification a évolué en 7 classes conformément au protocole *ICP Forests* afin d'analyser plus finement l'évolution de la ramification. La Figure 20 illustre une fiche de terrain utile aux observateurs pour différencier les formes sur base de critères et de photos prises en Belgique.

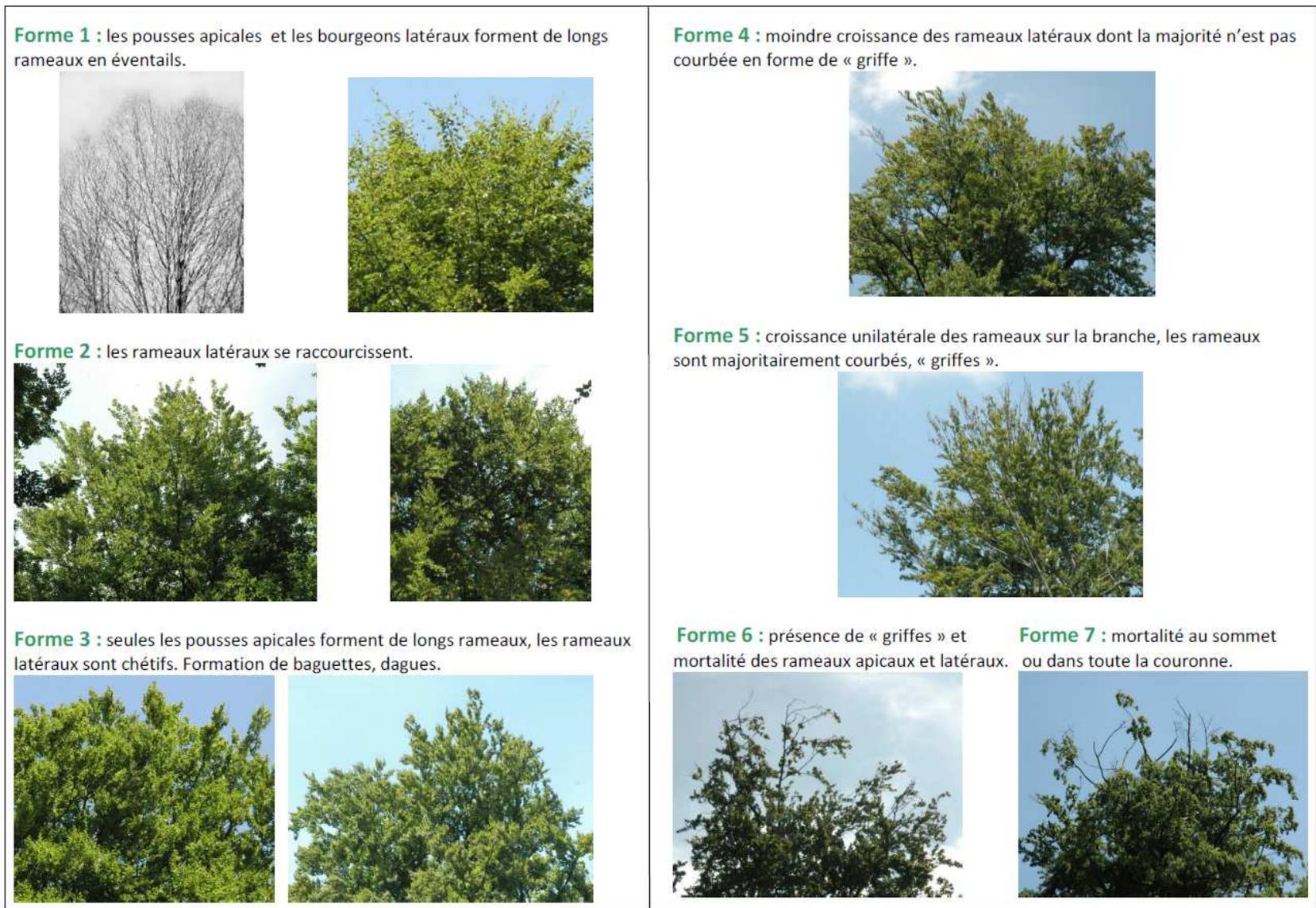


Figure 20: Fiche de terrain différenciant les 7 formes du houppier du hêtre

Depuis 2009, la structure de la couronne s’améliore nettement pour les chênes et les hêtres (voir Figure 21). Les chênes indigènes caractérisés par une ramification dense représentaient 0%, 7%, 21% et 62% chaque année de la période 2009-2012. Respectivement en 2013 et en 2014, ce niveau a atteint 64% et 67% pour les chênes pédonculés soit 30 individus pour les 2 années ainsi que 86% et 90% pour les chênes sessiles soit 6 et 9 arbres.

Concernant l’évolution de la ramification des hêtres, représentée à la Figure 21, la nouvelle méthodologie est appliquée à tous les hêtres d’intérêt pour la première fois cette année 2014. En 2013, seule une partie des hêtres furent noté selon la nouvelle méthodologie. En considérant que la forme 1 et 2 reflètent une ramification dense ; la forme 3 et 4, une simplification légère et la forme 5, 6 et 7, une simplification importante de la couronne, nous déduisons que 47% des hêtres ont une ramification dense, 46% sont soumis à une simplification légère et 6% à une simplification importante. Les pourcentages de 2014 reflètent une légère amélioration générale de la structure par rapport à 2013, où les hêtres avaient une ramification dense de 42%. Rappelons que de 2009 à 2012, les arbres portant un houppier densément ramifié représentaient respectivement 8%, 11%, 32% et 50%.

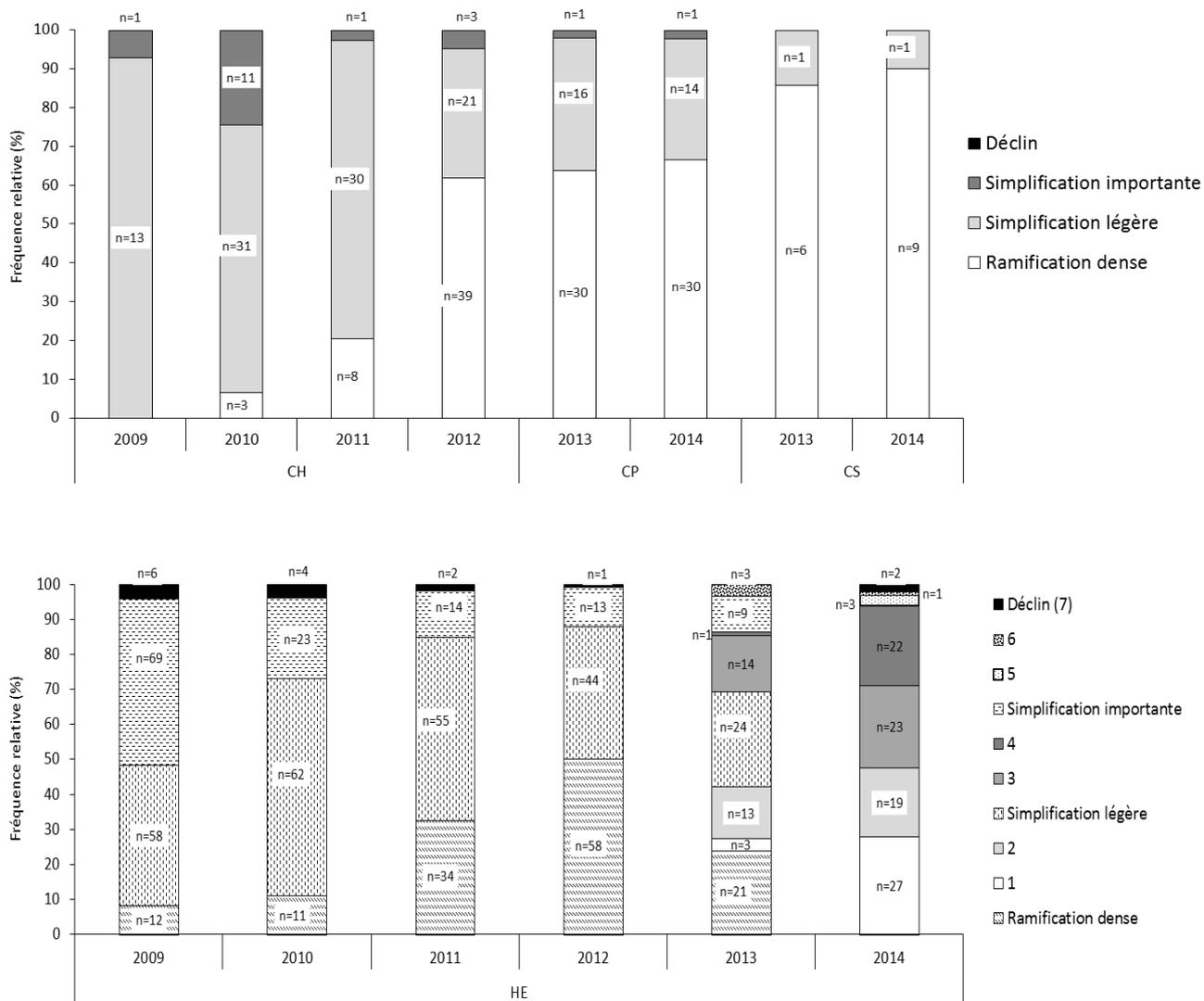


Figure 21: Distribution des arbres selon la structure de la couronne pour les chênes (au-dessus) pour les hêtres (en-dessous)

6.4. Pousses épicorniques

Les gourmands et les pousses épicorniques 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 gourmand avoisine les 50%, celle comportant des gourmands de manière abondante s'élevait à 17% en 2009, 2011 et 2012 et à 30% en 2010 (voir Figure 22). En 2013 et 2014, la même catégorie représente une proportion de 29% pour les chênes pédonculés et respectivement 14% et 10% pour les chênes sessiles.

Par ailleurs, nous observons de moins en moins de gourmands chez les hêtres car les arbres exempts de pousse épicornique représentent de 2009 à 2014 respectivement 72%, 74%, 79%, 91%, 89% et 92 %.

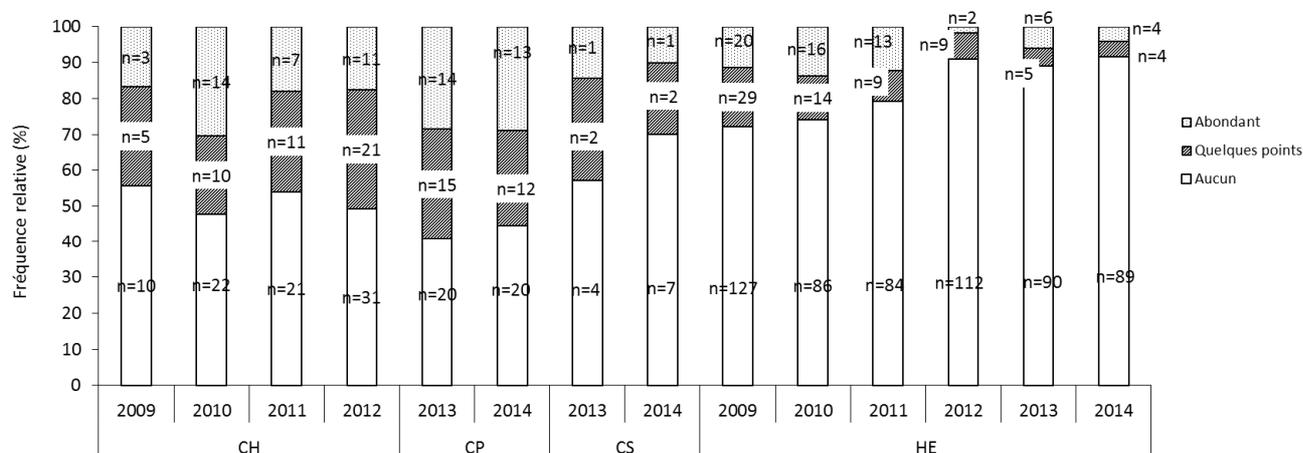


Figure 22: Distribution des arbres selon l'abondance des pousses épicorniques

6.5. 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...).

Entre 2009 et 2012, les chênes étaient plus largement soumis à la décoloration que les hêtres (voir Figure 23). En 2014, comme en 2013, on observe une nette diminution de la décoloration en chênaie. En effet, la majorité des chênes pédonculés (99%) et tous les chênes sessiles ont entre 0 et 10% de leur feuillage décoloré. Depuis 2013, aucun chêne indigène décoloré à plus de 60% n'a été observé.

De 2009 à 2011, des hêtres ayant entre 0% et 60% de leur couronne décolorée, voire même au-delà de 60% en 2009, ont été observés. En revanche depuis 2012, les hêtres sont moins soumis à la décoloration puisque 84% en 2012 et 100% des arbres en 2013 présentaient entre 0 et 10% de leur feuillage décoloré. La tendance en 2014 est identique à celle de 2012, puisque 87% des arbres présentent une décoloration entre 0 et 10%.

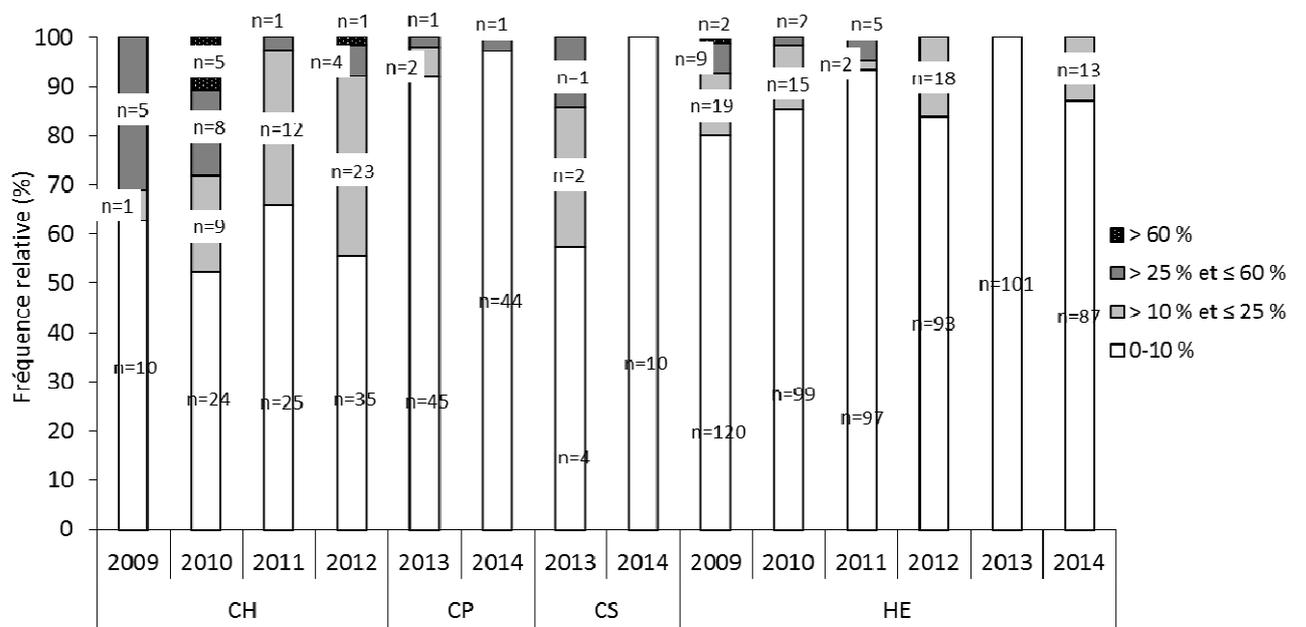


Figure 23: Distribution des arbres selon le pourcentage de décoloration du feuillage

6.6. Lien entre la défoliation et d'autres variables

6.6.1. 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 et 2014. 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. L'analyse de variance nécessite la normalité de la distribution, l'indépendance des résidus et l'homogénéité des variances.

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.

6.6.2. Défoliation et circonférence

Le Tableau 9 suivant reprend le niveau de corrélation existant entre la défoliation et la circonférence des chênes et des hêtres mesurée à 1m50 selon les années. 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 9: Corrélations entre la circonférence et la défoliation en fonction de l'essence et de l'année

Année	Corrélations entre la défoliation et C150		
	Chênes		Hêtres
2009	0,033 (n=14)		0,396* (n=143)
2010	0,1613 (n=45)		0,428* (n=107)
2011	-0,211 (n=39)		0,518* (n=102)
2012	0,2051 (n=63)		0,384* (n=112)
	Ch. pédonculé	Ch. sessiles	Hêtres
2013	0,150 (n=48)	0,620 (n=7)	0,314* (n=88)
2014	0,206 (n=45)	0,167 (n=10)	0,380* (n=100)

Les régressions linéaires (Tableau 10) 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 10: Résultats des régressions linéaires entre la circonférence et la défoliation par essence et par année

N° courbe	Année	Essence	n	équation	R ²	P valeur> t
y1	2009	Chênes	14	$y=0,0029x+27,74$	0,0009	0,9170
y2	2010	Chênes	45	$y=0,0299x+26,15$	0,0271	0,2801
y3	2011	Chênes	39	$y=-0,0313x+30,1$	0,0450	0,1946
y4	2012	Chênes	63	$y=0,0428x+17,72$	0,0421	0,1068
y5	2013	Ch. pédonculés	48	$y=0,0384x+16,55$	0,0227	0,3068
y6	2014	Ch. pédonculés	45	$y=0,04082x+14,50$	0,0426	0,1735
y7	2013	Ch. sessiles	7	$y=0,1056x-3,783$	0,3849	0,1372
y8	2014	Ch. sessiles	10	$y=0,1056x-3,783$	0,028	0,6438
Y9	2009	Hêtres	143	$y=0,0987x+17,24$	0,1397	<0,0001*
y10	2010	Hêtres	107	$y=0,1065x+7,35$	0,1693	<0,0001*
y11	2011	Hêtres	102	$y=0,1295x+7,05$	0,2683	<0,0001*
y12	2012	Hêtres	112	$y=0,1024x+3,01$	0,143	<0,0001*
y13	2013	Hêtres	88	$Y=0,0674x+14,7$	0,0902	0,0045*
y4	2014	Hêtres	100	$Y=0,0822x+7,61$	0,1444	<0,0001*

La

Figure 24 illustre la distribution des valeurs de défoliation des hêtres de 2014 en fonction de la circonférence à 1m50. Le coefficient de pente est de 0,0822, en d'autres termes, sur base des données de 2014, la relation linéaire est telle que lorsque la circonférence d'un hêtre augmente de 100 cm, la défoliation augmenterait de 8.22%. On observe que 4 arbres (provenant de placettes diverses) présentent une défoliation particulièrement élevée. Ces arbres sont atteints de nanisme, de mortalité centripète, de nécrose des rameaux latéraux et d'écoulement de sève.

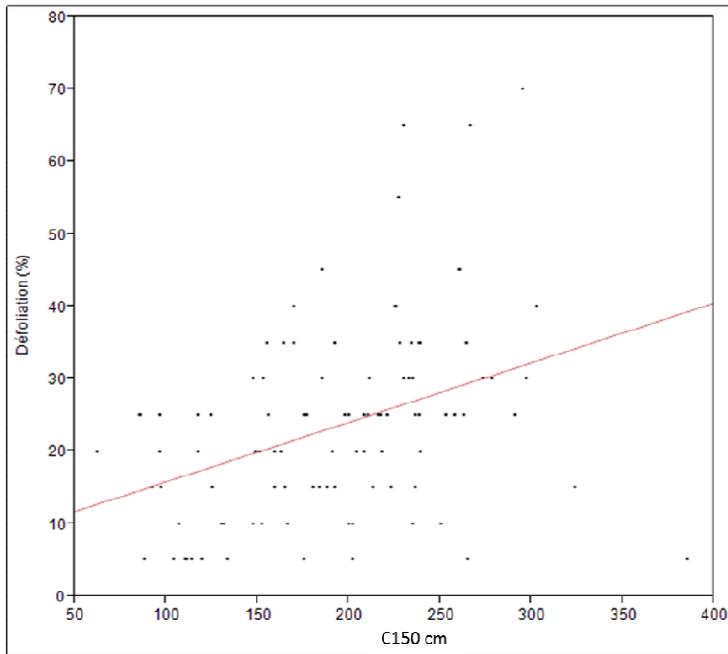


Figure 24 : Régression linéaire de la défoliation des hêtres en fonction de la circonférence en cm (C150) en 2014

6.6.3. 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 six classes allant de « couronne touchée par un côté » à « couronne touchée par quatre côtés » qui reflète un degré maximum de concurrence. A ces quatre niveaux de concurrence, on ajoute également deux autres classes : « houppier en croissance libre » pour les arbres isolés et « arbre dominé » pour les arbres présents en sous-étage bien que ces derniers sont écartés des analyses statistiques.

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 11 indiquent que les moyennes de défoliation, en 2014, ne sont pas significativement différentes pour les chênes sessiles observés contrairement aux chênes pédonculés et aux hêtres.

Tableau 11: 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
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*

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. Lorsque les effectifs sont réduits le test de Tukey ne peut être appliqué.

Comme illustré à la Figure 25, le degré de concurrence du houppier des chênes n'est pas en lien avec le déficit foliaire de 2009 à 2012. La Figure 26 illustre la distribution des moyennes de défoliation en dissociant le chêne sessile du chêne pédonculé. Pour l'année 2013, il s'avère que la défoliation des chênes indigènes n'est pas en lien avec le degré de concurrence. Alors que pour l'année 2014, on observe que la défoliation des chênes pédonculés varie selon le degré de concurrence. En effet, les arbres en croissance libre présentent une défoliation plus importante que les autres classes.

Il est à noter que l'indice d'ombrage est un critère difficile à évaluer et que d'année en année certains arbres changent de cotation uniquement en fonction de l'observateur.

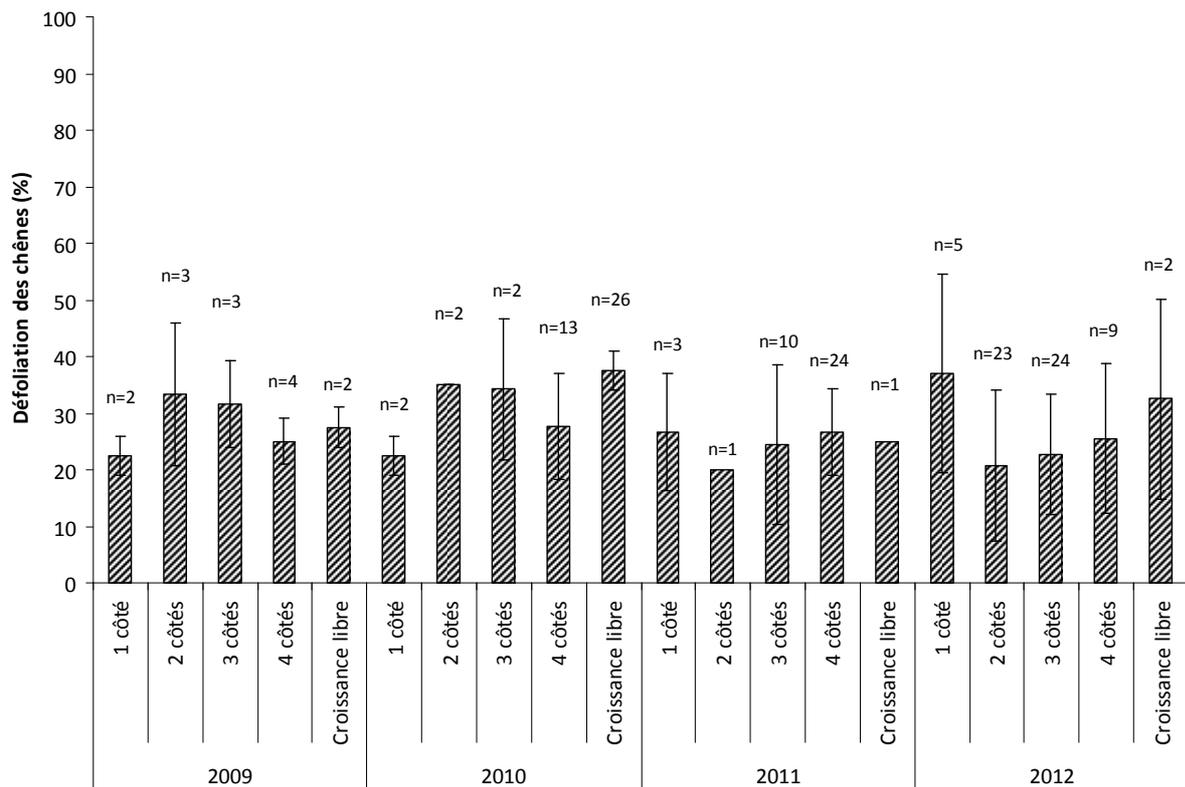


Figure 25: Evolution de la défoliation moyenne des chênes indigènes selon l'indice de concurrence et l'année

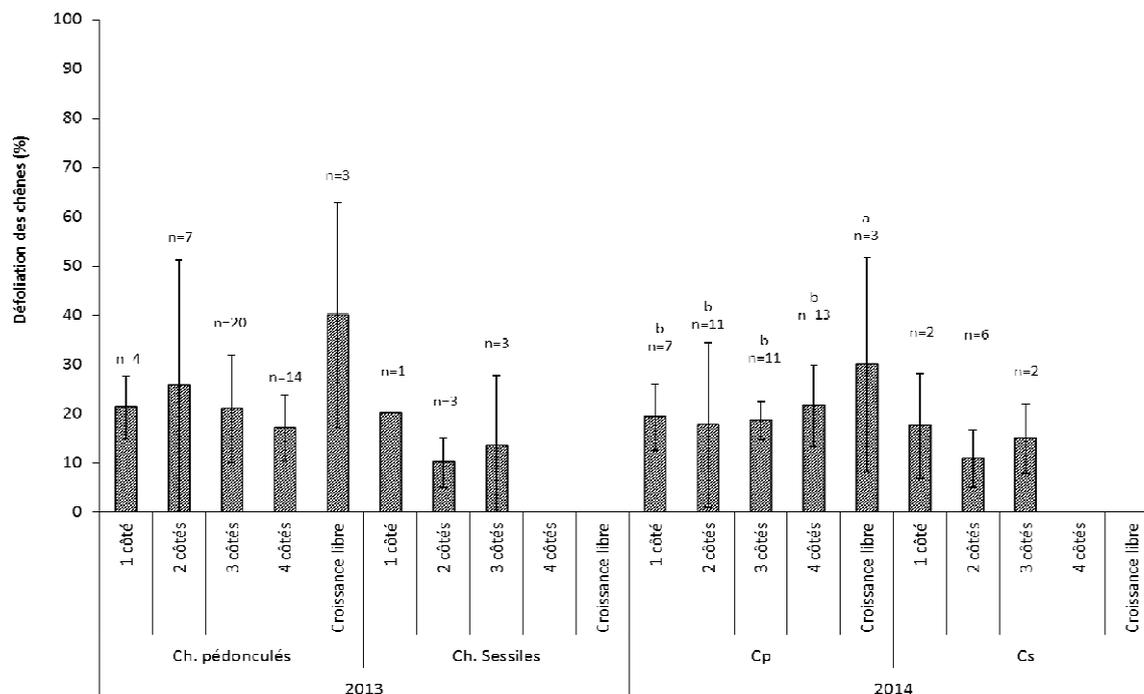


Figure 26: Evolution de la défoliation moyenne des chênes pédonculés et sessiles selon l'indice de concurrence en 2013 et 2014

Contrairement aux chênes, nous constatons qu'à mesure que la couronne des hêtres est concurrencée, la défoliation tend à diminuer. C'est pourquoi, les pourcentages de défoliation maximum sont atteints par les hêtres en croissance libre. Cet effet doit être en partie lié à l'âge du peuplement qui augmente parallèlement à l'ouverture du couvert.

D'après le test de Tukey, les groupes sont significativement différents entre eux hormis en 2009 et en 2013. En 2011 et 2012, le groupe d'arbres dont la cime est concurrencée sur 1 côté est significativement différent de celui dont la concurrence s'effectue sur les 4 côtés de la cime. En 2014, le groupe d'arbres dont la cime est concurrencée sur 2 côté est significativement différent de celui dont la concurrence s'effectue sur les 4 côtés de la cime.

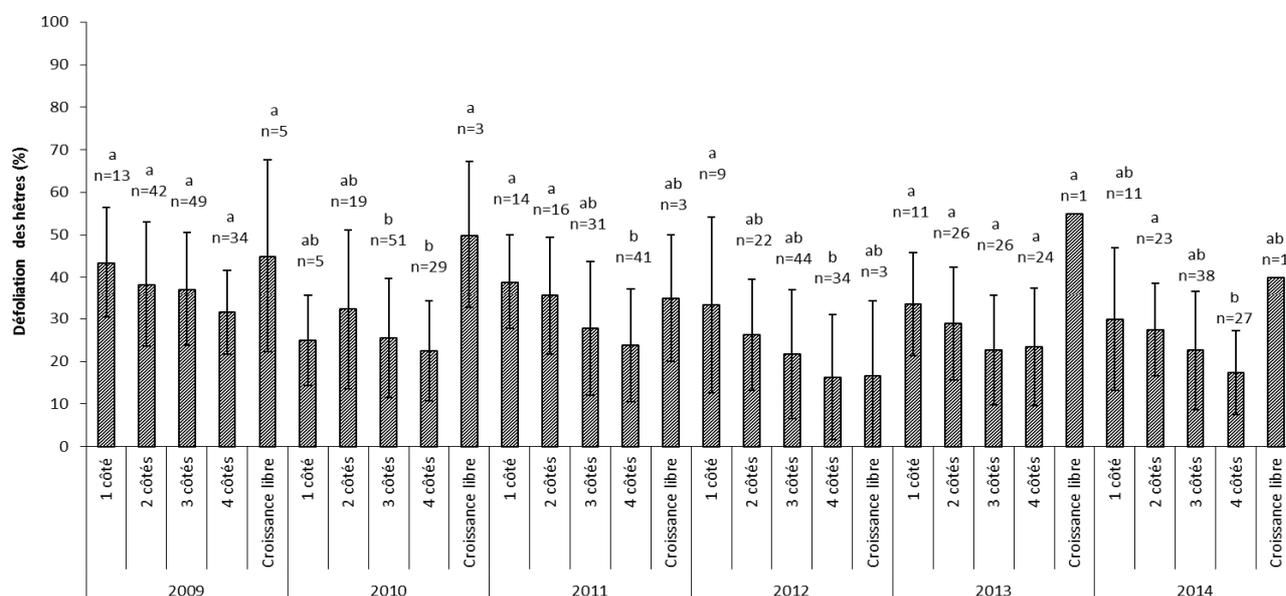


Figure 27: Evolution de la défoliation moyenne des hêtres selon l'indice de concurrence et l'année

6.6.4. 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 en lien. Le Tableau 12 indique qu'aucune moyenne de défoliation n'est significativement différente en fonction du pourcentage de décoloration, hormis les hêtres observés en 2009, 2010 et 2014.

Tableau 12: 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
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*

La Figure 28 et la Figure 29 illustrent la distribution des moyennes de défoliation en fonction des classes 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.

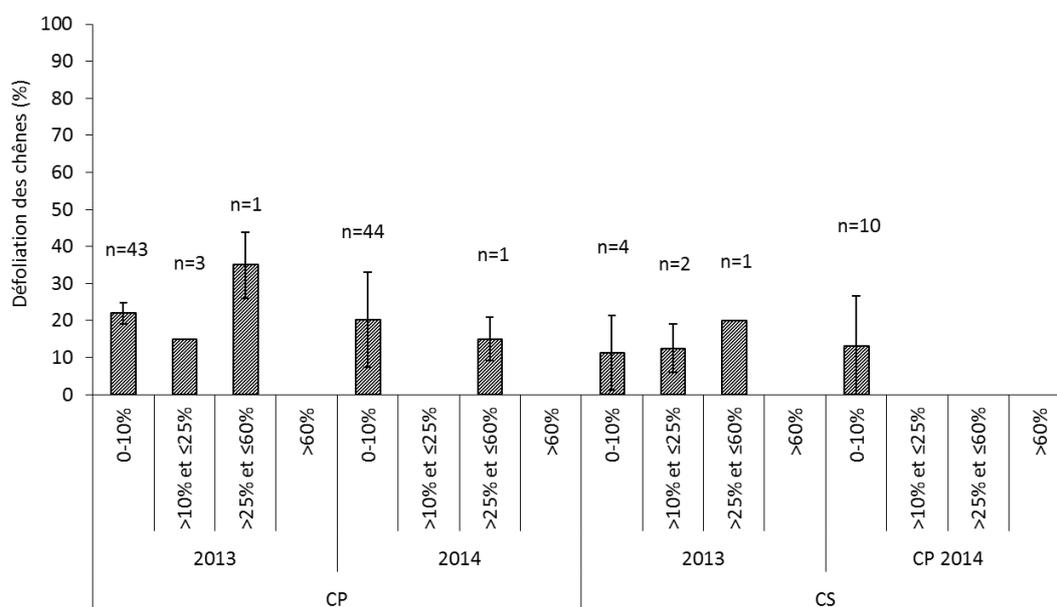
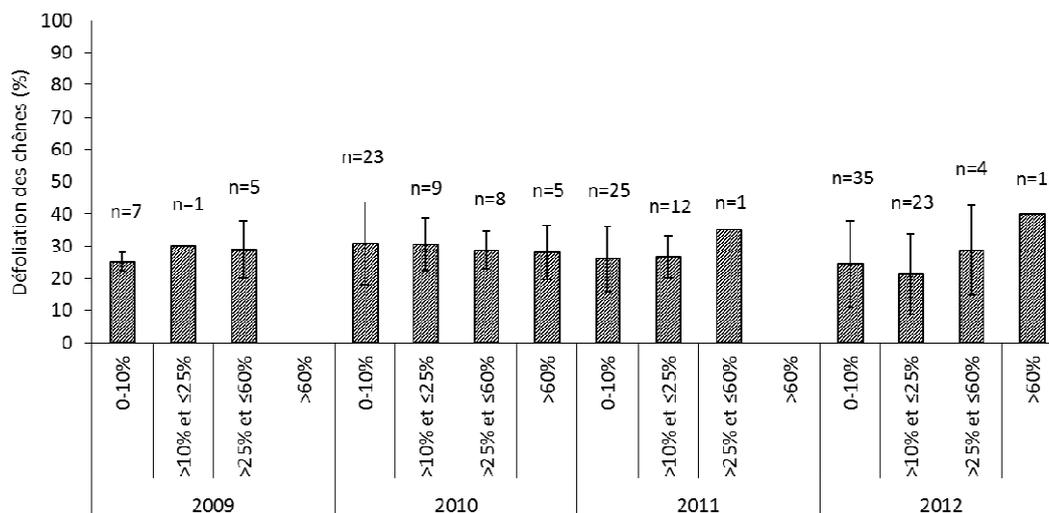


Figure 28: Evolution de la défoliation moyenne des chênes indigènes selon la classe de décoloration de 2009 à 2012 (au-dessus) et des chênes pédonculés et sessiles en 2013 et 2014 (en-dessous).

En revanche, pour les hêtres, on observe un lien entre la défoliation et la décoloration en 2009, 2010 et 2014. La figure 30 indique qu'en 2009 les arbres présentant une décoloration supérieure à 60% étaient significativement plus défoliés. En 2010, on observe que les arbres présentant une décoloration entre 10 et 25% ont une défoliation significativement plus importante que les arbres présentant une décoloration entre 0 et 10%. La défoliation semble augmenter avec le niveau de décoloration.

Cependant, l'inverse est observé en 2014, puisque les arbres présentant une décoloration entre 10 et 25% ont une défoliation significativement plus faible que les arbres présentant une décoloration entre 0 et 10%.

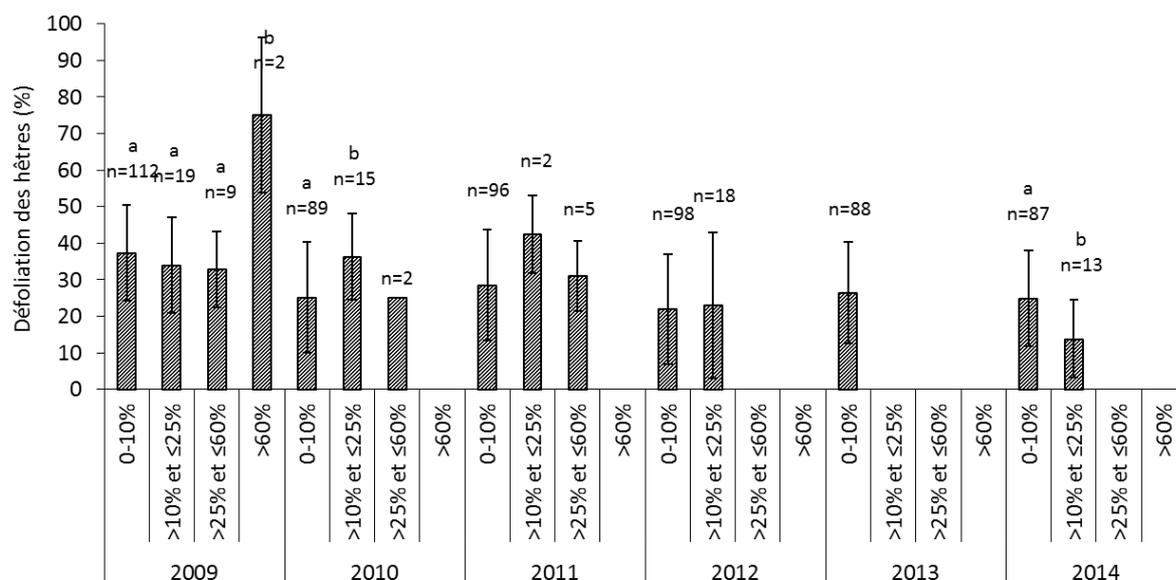


Figure 29: Evolution de la défoliation moyenne des hêtres selon la classe de décoloration et l'année

6.6.5. 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 (voir Tableau 13). Hormis en 2014 où on observe une relation entre la défoliation et la fructification pour les chênes sessiles. Cependant, le test de Tukey (Figure 31) indique qu'il n'y a pas de différence significative entre la moyenne de défoliation des arbres où la fructification est absente et celle des arbres où elle est visible.

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.

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, qui n'est plus disponible pour la feuillaison. Par ailleurs, l'allocation du carbone est modifiée pour promouvoir le développement des organes reproducteurs lorsque l'arbre subit des stress tels qu'un stress hydrique, une croissance racinaire limitée ou une restriction dans le transport du phloème (Campagna, 1996). 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 13: 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*
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*

En 2011, seuls 3 arbres sur les 42 chênes observés présentaient une fructification importante (voir Figure 30). En 2014, à l'exception de 1 chêne pédonculé et 1 chêne sessile, l'ensemble des chênes indigènes ne portent pas ou très peu de glands.

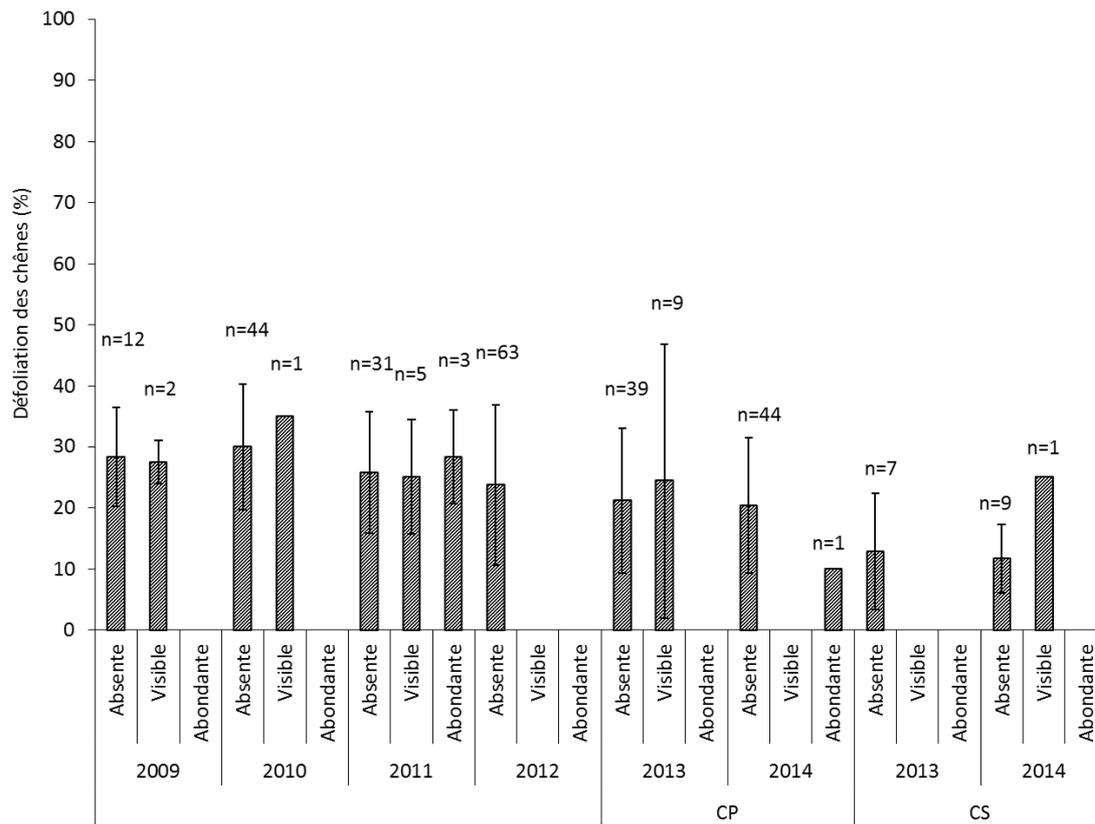


Figure 30: Evolution de la défoliation moyenne des chênes selon la fructification et l'année

A l'analyse de la Figure 31 et au vu des tests de Tukey, les arbres présentant des faînées importantes en 2009, 2011, 2013 et 2014 ont une défoliation moyenne significativement supérieure de l'ordre de 10% par rapport à ceux ne présentant aucun fruit ce qui est en accord avec les observations de Schmidt, 1991 ; Eichhorn *et al.*, 2005 ; Fischer *et al.*, 2010 pour cette même espèce.

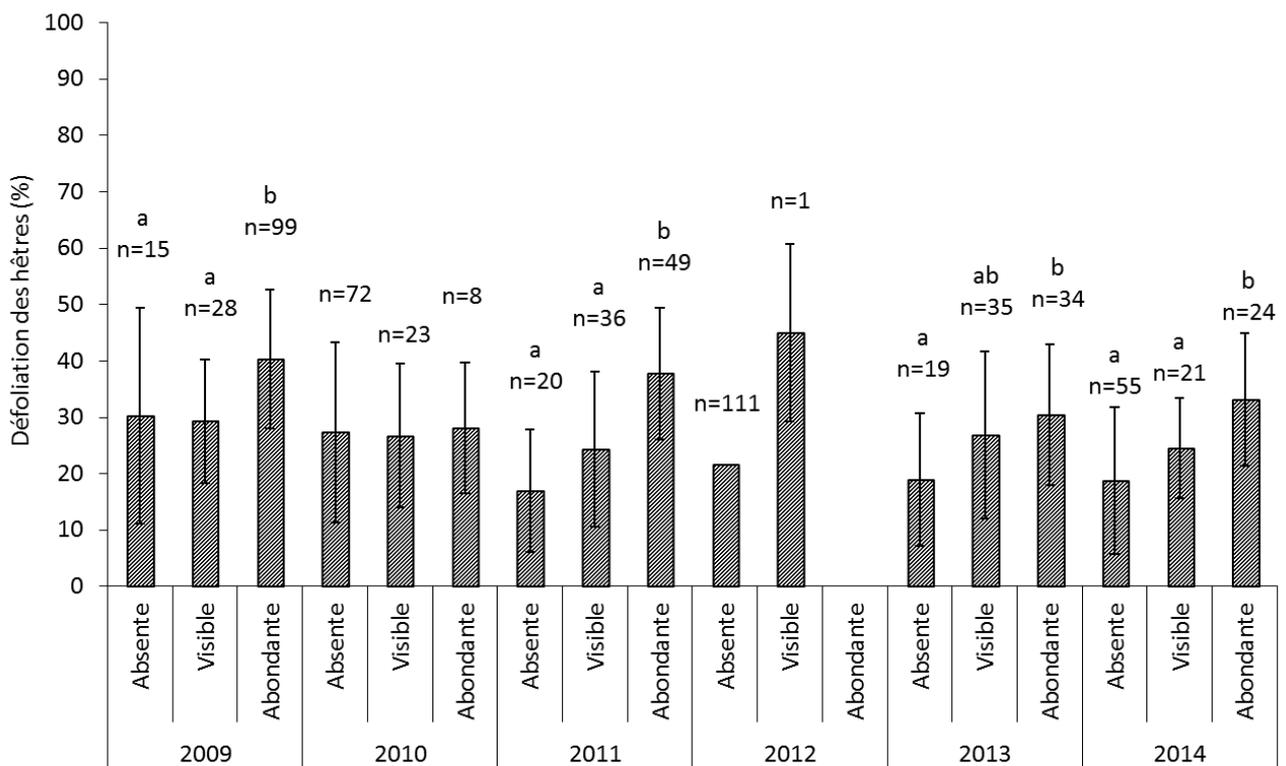


Figure 31: Evolution de la défoliation moyenne des hêtres selon la classe la fructification et l'année

6.6.6. Défoliation et forme du houppier

Une relation nette existe entre la défoliation des chênes et des hêtres et la forme du houppier (voir Tableau 14). 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 14: 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
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*

Pour toutes essences, hormis pour les chênes sessiles, la défoliation augmente de manière significative en fonction du degré de simplification du houppier et ce, à chacune des campagnes. Selon l'année d'observation, la défoliation moyenne des chênes varie entre 11 et 18% pour les arbres ayant une ramification dense ; entre 19 et 31% pour ceux marqués par une simplification légère et entre 40 et 80% pour les chênes au houppier fortement simplifié (voir Figure 32).

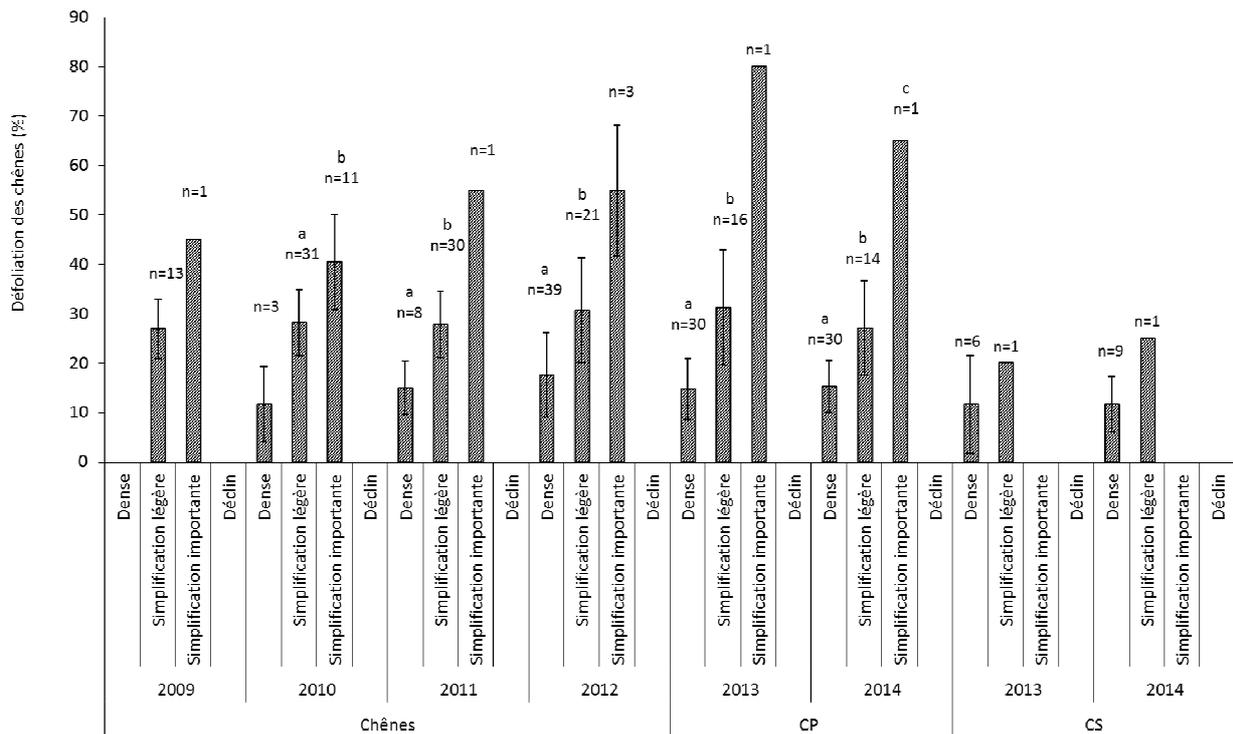


Figure 32: Evolution de la défoliation moyenne des chênes selon la forme du houppier et l'année

En considérant les 4 classes de forme du houppier, il apparaît que la défoliation moyenne oscille entre 10 et 20% pour les hêtres densément ramifiés; entre 23 et 33% pour ceux se simplifiant légèrement, entre 41 et 48% pour les arbres se simplifiant fortement et finalement, entre 45 et 85% pour les arbres en déclin. Par ailleurs, les arbres cotés d'après la nouvelle méthodologie ont également des déficits foliaires moyens significativement différents en fonction de la forme du houppier (voir Figure 33).

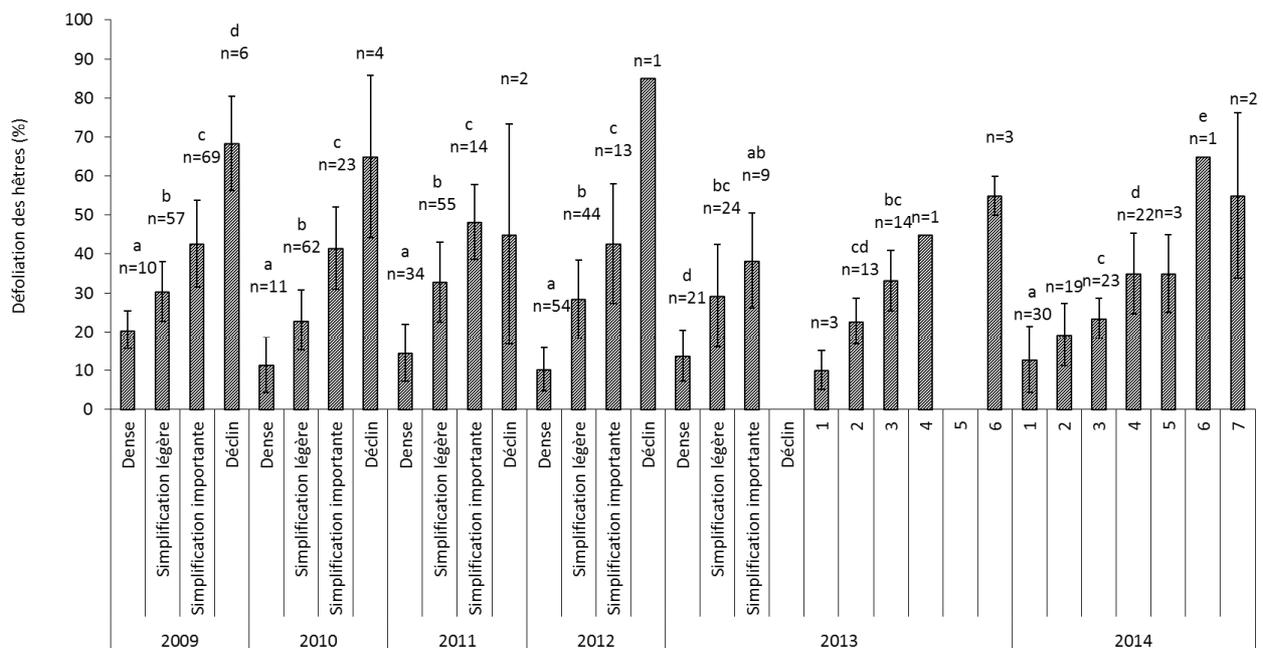


Figure 33: Evolution de la défoliation moyenne des hêtres selon la classe la forme du houppier et l'année

6.7. Dommages

6.7.1. 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 à chacun des symptômes une cote d'extension est attribuée. Cette cote reflète le pourcentage endommagé de l'organe considéré. Le Tableau 15 reprend l'ensemble des dommages observés en 2014, le nombre d'arbres touchés et la proportion d'arbres affectés. Le pourcentage d'arbres atteints est calculé par rapport aux effectifs totaux, hors arbres dominés, soit 45 chênes pédonculés, 10 chênes sessiles et 100 hêtres.

En 2014, 58% des chênes pédonculés et 10% chênes sessiles sont atteints par les défoliateurs. En 2013, on dénombrait 65% des chênes pédonculés et 86% chênes sessiles atteints par les défoliateurs. Par contre ce pourcentage n'atteignait que 29 % pour les chênes indigènes en 2012.

Les défoliateurs détruisent les jeunes feuilles et les premiers bourgeons, ce qui oblige l'arbre à produire de nouvelles feuilles en puisant dans ses réserves carbonées. La mobilisation des réserves peut être accrue par des défoliateurs plus tardifs (*Lymmantria dispar*) ou par le mildiou qui détériorent les nouvelles pousses. En 2014, la présence du mildiou poudreux a été notée sur seulement 1 chêne pédonculé. Seulement 4% des chênes pédonculés ont des branches de moins de 2 cm de diamètre mortes ou mourantes au sein de la cime contre un peu moins d'un quart (22%) en 2013 et 8% en 2012.

En 2012, 114 symptômes ont été observés sur un total de 144 hêtres ; en 2013, ce nombre est trois fois moindre puisqu'on compte 46 symptômes relevés sur un total de 101 arbres. En 2014, ce rapport est seulement de 37 symptômes pour 100 arbres. Comme en 2013, les défoliateurs ont été notés sur seulement 1% des hêtres observés.

Notons qu'un même individu peut être sujet à plusieurs symptômes. Le pourcentage de hêtres dont les rameaux ($\Phi < 2$ cm) sont morts ou mourants a chuté de 32 à 13% de 2012 à 2013. En 2014, ce pourcentage n'est que de 7%. Près de la moitié des rameaux morts seraient tombés entre 2012 et 2013, suite à de fortes rafales de vent. De fait, la vitesse moyenne du vent atteinte en août 2012, décembre 2012, avril 2013 et juin 2013 a atteint des records que l'on n'observe qu'une fois tous les 10 ans voire même une fois tous les 100 ans (juin 2013). Ces valeurs record enregistrées à Uccle ont été calculées sur base des données de l'IRM (1981-2010).

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 chez le hêtre et chez 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 15: Symptômes et dommages observés et proportion des arbres affectés

Chênes pédonculés				
Partie affectée		Symptômes	Nombre de cas	%arbres observés
Feuilles	Feuilles	Dévorés/ manquants	26	58
		vert clair à jaune	1	2
		Rouge à brun	3	7
Branches	Rameaux latéraux (diamètre<2cm)	Branche morte ou mourante	2	4
	Branches (diam.>10cm)	Bris de tronc	3	7
Tronc	Partie du tronc dans le houppier	Blessures (écorcement, cassures, etc,...)	1	2
		Blessures (écorcement, cassures, etc,...)	1	2
	Tronc sous le houppier	Blessures (écorcement, cassures, etc,...)	1	2
		Nécroses	1	2
	Collet (=racine et pied)	Manifestation de champignons	1	2
		Ecoulement de sève	1	2
		Blessures (écorcement, cassures, etc,...)	2	4
	Hauteur d'homme	Déformations	1	2
		Totalité du tronc	Blessures (écorcement, cassures, etc,...)	1
	Nombre total de cas			45
Chênes sessiles				
Partie affectée		Symptômes	Nombre de cas	%arbres observés
Feuilles	Feuilles	Dévorés/ manquants	1	10
		Rouge à brun	1	10
Nombre total de cas			2	
Hêtres				
Partie affectée		Symptômes	Nombre de cas	%arbres observés
Feuilles	Feuilles	Microphyllie (feuilles nanisées)	2	2
		Partiellement ou totalement dévorées/manquantes	1	1
		Bronze	1	1
		Déformations	1	1
Branches	Rameaux latéraux (diamètre<2cm)	Branche morte ou mourante	7	7
		Partiellement ou totalement dévorées/manquantes	2	2
		Nécroses	1	1
		Blessures (écorcement, cassures, etc,...)	1	1
		Ecoulement de sève	1	1
		Branches (diam.>2 et < 10cm)	Branche morte ou mourante	4
	Branches (diam.>10cm)	Branche morte ou mourante	1	1
		Bris de tronc	1	1
Diamètre variable	Branche morte ou mourante	1	1	
Tronc	Tronc sous le houppier	Blessures (écorcement, cassures, etc,...)	1	1
		Déformations	2	2
		Déformations	2	2
	Collet (=racine et pied)	Blessures (écorcement, cassures, etc,...)	1	1
		Manifestation de champignons	1	1
		Blessures (écorcement, cassures, etc,...)	1	1
		Totalité du tronc	Déformations	3
Hauteur d'homme	Déformations	1	1	
	Pourriture	1	1	
Nombre total de cas			37	

6.7.2. Extension des dommages par placette

Le Tableau 16 illustre le nombre d'arbres touchés par l'attaque de défoliateurs et le pourcentage d'arbres atteints selon la placette. Il apparaît que 3 des 5 placettes en chênaie ont entre 50 et 100% des individus touchés.

Tableau 16: Proportion des arbres touchés par l'attaque de défoliateurs selon les placettes

Placette	Typologie	Triage	Nombre d'arbres touchés	% d'arbres touchés par placette
4151	Chênaies pures	Trois -Fontaines	1	13
4449	Chênaies pures	Rouge-Cloître	10	67
4529	Chênaies pures	Rouge-Cloître	12	100
4781	Hêtraies - Chênaies	Trois-Fontaines	2	50
2791	Hêtraies- Chênaies	Saint-Hubert	1	6

La proportion d'arbres touchés par la mortalité des rameaux au sein d'une placette varie entre 10 et 50% (Tableau 17).

Tableau 17: Proportion des arbres touchés par la mortalité des rameaux ($\Phi < 2$ cm) selon les placettes

Placette	Typologie	Triage	Nombre d'arbres touchés	% d'arbres touchés par placette
4469	Hêtraies pures	Bonne Odeur	2	50
4778	Hêtraies pures	Trois-Fontaines	1	13
4783	Hêtraies pures	Trois-Fontaines	3	43
5022	Hêtraies pures	Trois-Fontaines	1	14

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 échantillon sera complété avec les placettes de contrôle en hêtraies visitées en 2015 pour atteindre environ 40 arbres. En chênaie, toutes les placettes du plan d'échantillonnage seront visitées en 2015 pour sélectionner et photographier les arbres. Les caractéristiques techniques pour la prise des photos ont été définies par comparaison de la qualité des photos en laboratoire et pour faciliter la reproductibilité bisannuelle de la photographie.

7.1. Sélection des arbres

Le critère principal intervenant pour la sélection des arbres pour le suivi de la structure est la visibilité complète de la cime sur au moins un côté (Dobbertin et al., 2005 ; Eichhorn et al., 2010a ; Mizoue et al., 2002). Les 21 arbres de contrôle utilisés cette année, rencontrent cette condition et ont tous été photographiés. Le tableau 18, présente la distribution des arbres sélectionnés selon les placettes visitées cette année par l'équipe de contrôle.

Tableau 18: Nombre d'arbres sélectionnés selon les placettes de contrôle 2014

Placette	Typologie	Triage	Nombre d'arbres sélectionnés
2877	Hêtraies pures	Saint-Hubert	4
2879	Hêtraies pures	Saint-Hubert	1
3197	Hêtraies - Chênaies	Saint-Hubert	2
4145	Hêtraies pures	Bonne Odeur	6
4147	Hêtraies pures	Bonne Odeur	3
4469	Hêtraies pures	Bonne Odeur	3
5022	Hêtraies pures	Trois-Fontaine	2
Total			21

Quatre arbres sont visibles sur 2 côtés, la cime des autres arbres n'était visible que sur un côté. Néanmoins vu l'intérêt d'étudier les modifications de la structure liées à l'ouverture du couvert, quelques cimes photographiées ne sont pas entièrement visibles sur la photo. La figure 35 présente un de ces cas de figure.



Figure 34 : Photographie d'un arbre de la placette 3197 (appareil photo : Olympus Stylus 1).

Un maximum de classes de structure et de défoliation, doit être représenté dans l'échantillon. On observe sur les figures 35 et 36 que les classes de défoliation et de structure ne sont pas représentées de manière équitable dans notre échantillon. Nous essayerons, dans la mesure du possible, d'annuler ces inégalités lors de la deuxième campagne en 2015.

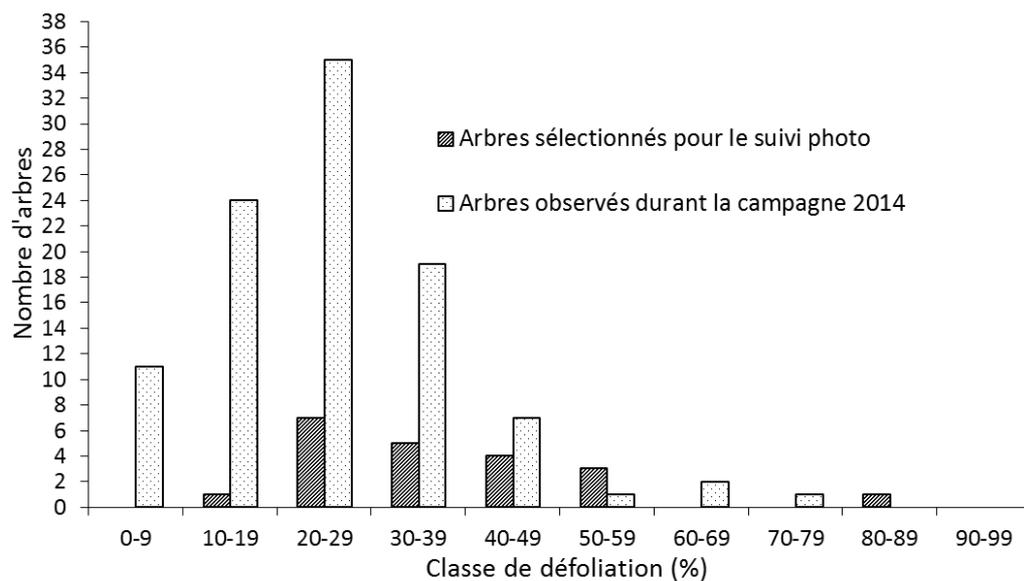


Figure 35 : Distribution des arbres provenant de l'ensemble de la campagne 2014 et de ceux sélectionnés pour le suivi photo selon les classes de défoliation.

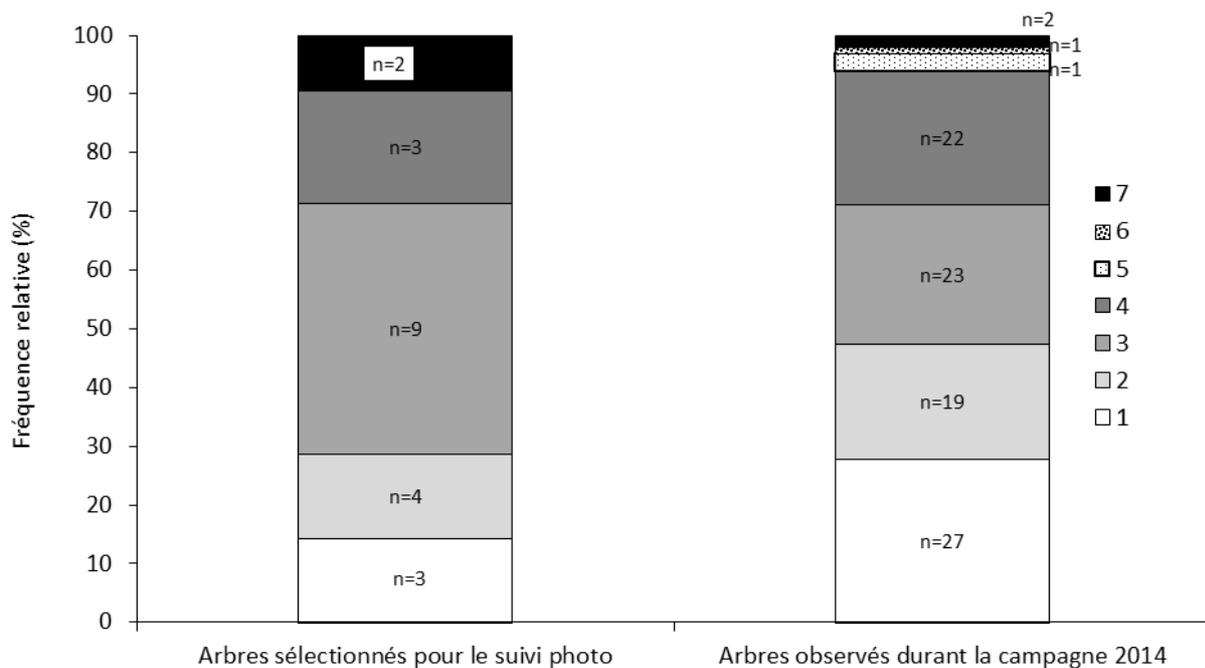


Figure 36 : Distribution des arbres provenant de l'ensemble de la campagne 2014 et de ceux sélectionnés pour le suivi photo selon les classes de structure du houppier.

On observe à figure 37 que les arbres échantillonnés balayent relativement bien les différentes classes de circonférence.

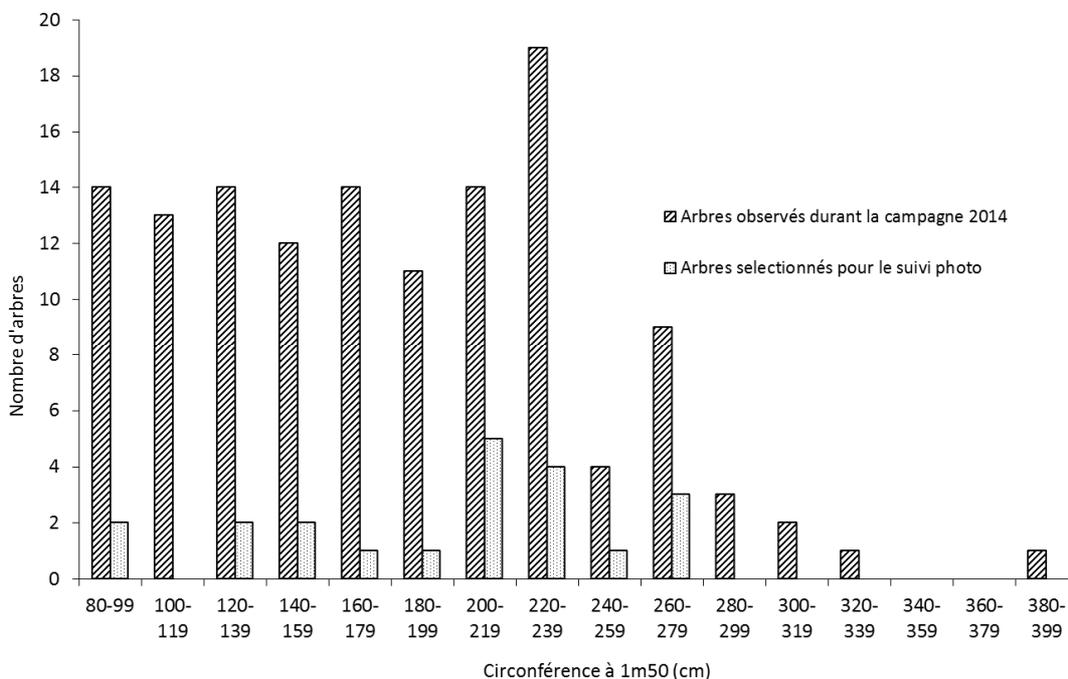


Figure 37 : Distribution des arbres provenant de l'ensemble de la campagne 2014 et de ceux sélectionnés pour le suivi photo selon les classes de circonférence.

On observe à figure 38 une relation étroite entre la défoliation et la structure du houppier pour les arbres sélectionnés.

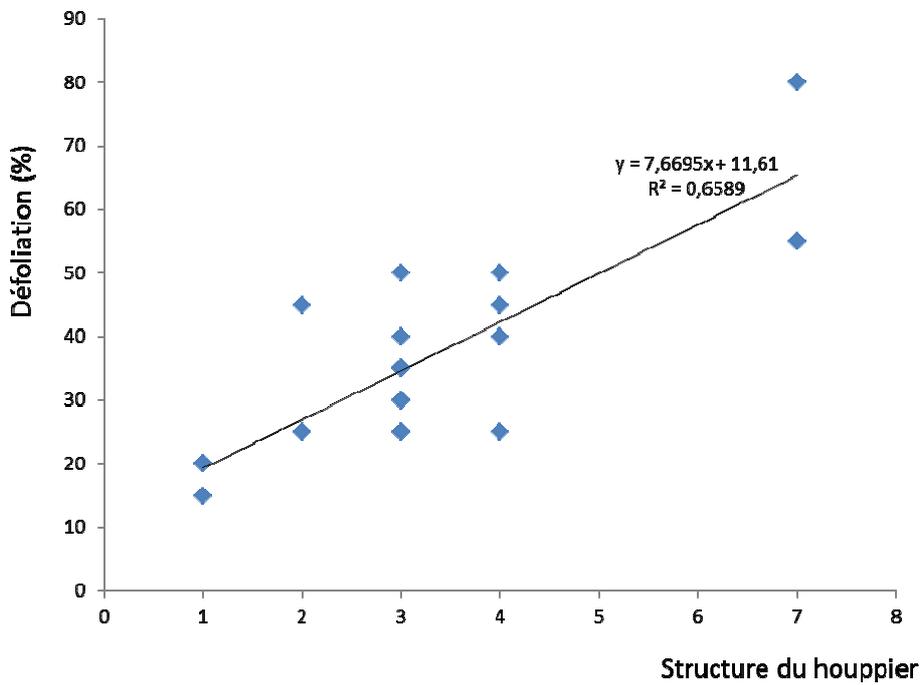


Figure 38 : Relation entre la défoliation et la structure du houppier pour les arbres sélectionnés.

7.2. Caractéristiques techniques des photographies

Une ou deux photographies seront prises par arbre d'intérêt. La(les) position(s) de prise de vue est (sont) localisée(s) grâce à la distance et à l'azimut par rapport à l'arbre photographié afin que celle(s)-ci soi(en)t identique(s) d'une année à l'autre quel que soit l'observateur (Tableau 19).

Tableau 19 : Distance et azimut de chaque prise de vue par rapport à l'arbre sélectionné.

	<i>N°_Arbre de référence</i>	<i>N°_Prise de vue</i>	<i>Distance</i>	<i>Azimut</i>
2877		1	1	25 60
		2	1	29 1
		7	1	24 255
		9	1	23 75
2879		1	1	37 165
3197		2	1	24 145
		8	1	32 91
4145		1	1	30 125
			2	33 290
		2	1	31 50
			2	42 310
		3	1	31 135
			2	38 32
		4	1	41 95
		7	1	32 47
2	30 340			
4147		2	1	20 2
		12	1	26 220
		18	1	21 122
4469		2	1	40 230
		3	1	35 240
		4	1	43 220
5022		3	1	30 155
		104	1	38 265

Tenant compte des conditions de terrain, nous avons défini le point de vue d'intérêt comme étant « *le point situé à la plus grande distance possible de l'arbre pour que le houppier reste visible, cette distance devant rester toujours inférieure à la hauteur de l'arbre* ». La lentille de l'appareil sera systématiquement positionnée à 1m50 du sol sur un trépied et dans la mesure du possible avec un angle de 45° par rapport à l'horizontale.

L'appareil photo utilisé est l'**Olympus Stylus 1** avec un objectif i.ZUIKO DIGITAL avec un zoom 10,7x et un capteur CMOS rétroéclairé (1/1.7"). Une série de tests ont été réalisés en laboratoire pour garantir des photographies de qualité constante. Dans ce but différentes compensations d'exposition ont été testées. De manière générale, il apparait que réaliser la photo en mode de sous-exposition de -0.7EV, avec une longueur focale de 84mm et une vitesse d'obturation de 1/250 secondes, améliorerait nettement la qualité et la netteté de celle-ci. On choisira donc ce mode photographique pour le suivi.

Une photographie hémisphérique (appareil photo numérique D300s, lentille SIGMA 4.5mm, f 2.8) est également effectuée pour illustrer la description de l'observateur en termes de concurrence par arbre d'intérêt (Figure 39). L'espace disponible pour le développement de la couronne pourra être visible uniquement si les branches basses du houppier et le sous-étage ne sont pas trop développés (Talbot et

al., 2010). Cette photographie sera prise systématiquement à 1 m du tronc et à 1m30 du sol sur la ligne fictive entre l'arbre et le point de vue principale.



Figure 39 : Photo hémisphérique .

7.3. Spatialisation des arbres et des prises de vues

Les arbres sont localisés grâce au n° de la placette à laquelle ils appartiennent, ainsi que grâce à la distance et à l'azimut par rapport au centre de la placette. De par leur position géographique (coordonnées Lambert), une spatialisation de la localisation de l'ensemble des arbres et des prises de vue peut être réalisée à l'aide du programme ArcGis. Ce travail a été réalisé par placette pour les arbres photographiés en 2014. En guise d'exemple, la cartographie des arbres et des prises de vues de la placette 4145 est présentée ci-dessous (figure 40).

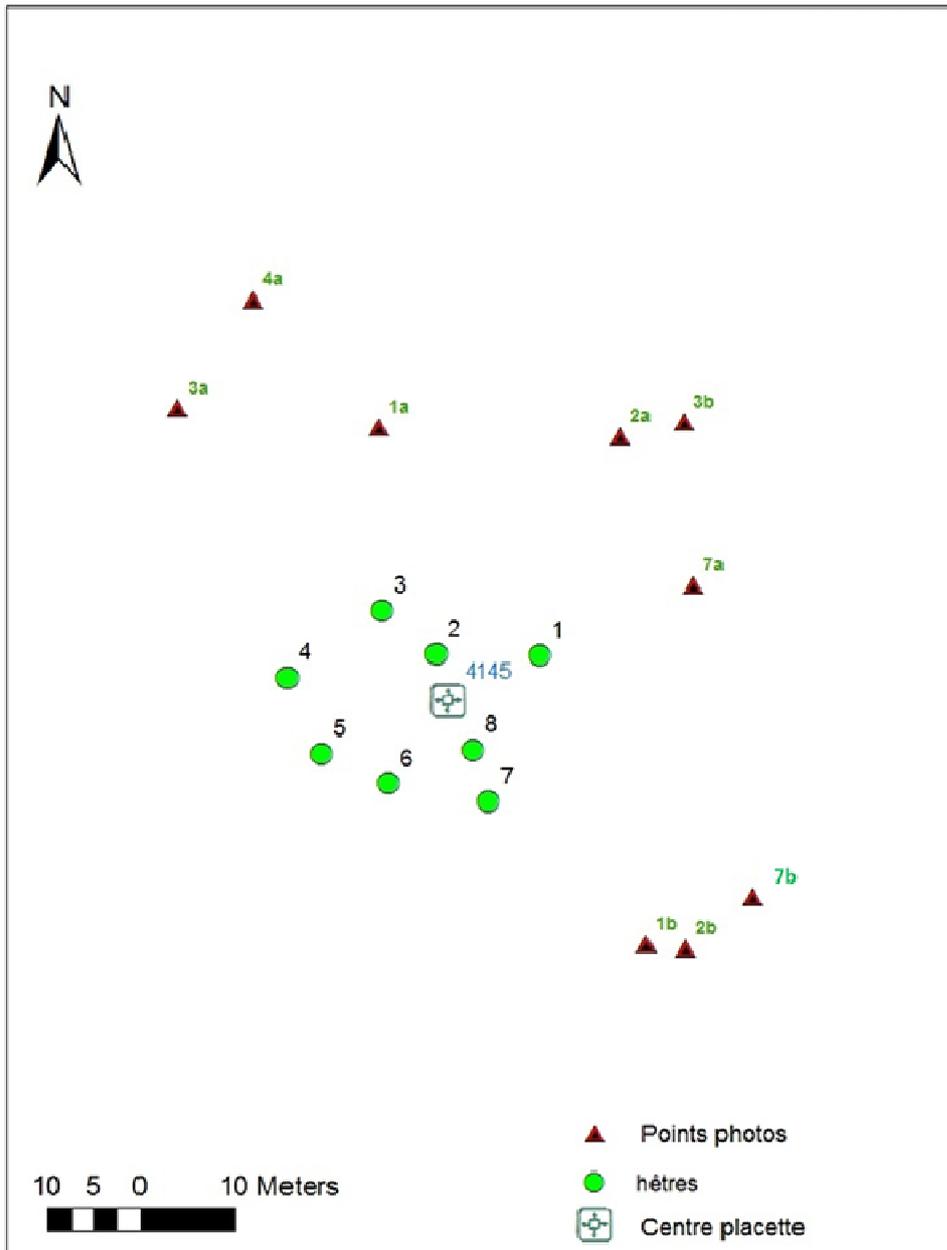


Figure 40 : Localisation des arbres et des points de vue photographiques pour la placette 4145.

7.4. Méthodologie

Une première étape consistera à décrire le milieu environnant des arbres sélectionnés (nombre de côtés du houppier concurrencés par des cimes voisines) et dans un deuxième temps, d'évaluer l'évolution de la forme du houppier et de la défoliation. La description de la ramification du houppier se réfère au protocole ICP Forests. La structure du hêtre évolue en 7 classes et celle des chênes sessiles et pédonculés en 4 classes. L'observation s'effectue sur l'extrémité supérieure de la couronne avec des jumelles (Eichhorn, 2010b). La densité de la ramification peut être évaluée en été durant les mois de juillet et août (période d'observation pour le suivi sanitaire en forêt de Soignes) et/ou en hiver. En été,

les ramilles mortes sont plus facilement visibles et en hiver, la forme des rameaux s'observe plus finement, d'où l'intérêt d'effectuer deux campagnes par année d'observation

Les campagnes photographiques seront réalisées annuellement au stade feuillé (juillet- août) ainsi qu'au stade non-feuillé (décembre, janvier, février et mars) pour tous les arbres faisant partie de l'échantillon. Ces campagnes seront menées exclusivement par l'UCL.

Les différents critères observés seront la perte de ramille morte, la descente de cime, la redéfinition du houppier observable due à des éclaircies ou autre. Ces analyse permettra entre autre d'évaluer comment la structure du houppier influence la note de défoliation.

8. Conclusion

En 2014, 15 placettes en hêtraie visitées une année sur deux et 6 placettes en chênaie ont été observées par les adjoints forestiers de BE-IBGE. Dix chênes sessiles, 45 chênes pédonculés et 100 hêtres soit un total de 155 arbres non dominés ont été notés pour une large panoplie de critères dont la défoliation.

D'après les observations de 2014, la défoliation moyenne est de 20.1% ($\pm 11\%$ (\pm écart-type) pour les chênes pédonculés, 13% ($\pm 7\%$) pour les chênes sessiles et de 23.4% ($\pm 13\%$) pour les hêtres.

En considérant l'ensemble des campagnes, on constate que la défoliation moyenne des chênes a évolué entre un minimum de 19% en 2014 et un maximum de 30% en 2010. Par ailleurs, la défoliation moyenne des chênes indigènes en 2014 est significativement plus faible que celle de 2010 et 2011 et non significativement plus faible que celle des autres années de mesures. La défoliation des chênes indigènes en forêt de Soignes diminue depuis 2010. La défoliation moyenne des hêtres a varié entre 22% en 2012 et 37% en 2009. Statistiquement la moyenne de 2009 est significativement différente des autres années. Il en est de même entre les moyennes de 2012 et 2014 avec celle de 2011.

L'évolution de la défoliation a également été analysée pour un échantillonnage identique de chênes et de hêtres évalués à la fois en 2009, 2010, 2012, 2013 et 2014. Il apparaît qu'individuellement, la variation interannuelle des chênes indigènes est importante car elle oscille entre 0 et 25% et ce, aussi bien négativement que positivement. Par ailleurs, sur cet échantillon restreint, aucune tendance ne peut être dégagée. Néanmoins, la défoliation moyenne des 6 chênes est constante. De plus, le niveau moyen de défoliation de cet échantillon commun diffère de maximum 5% par année par rapport à l'échantillon total. La défoliation moyenne de l'échantillon de 72 hêtres est de 29% en 2010 ; 25% en 2012 et 25% en 2014, ces valeurs s'inscrivent dans la même gamme que celles calculées pour l'ensemble des hêtres.

De manière générale, la structure des chênes indigènes et des hêtres s'améliore nettement depuis 2009. Pour la structure du houppier, les chênes indigènes caractérisés par une ramification dense représentaient 0%, 7%, 21% et 62% chaque année de la période 2009-2012. Respectivement en 2013 et en 2014, ce niveau a atteint 64% et 67% pour les chênes pédonculés soit 30 individus pour les 2 années ainsi que 86% et 90% pour les chênes sessiles soit 6 et 9 arbres. Avant 2013, la forme du houppier des hêtres était notée de manière similaire à celle du chêne selon 4 classes. Depuis 2013, cette classification a évolué en 7 classes conformément au protocole *ICP Forests* afin d'analyser plus finement l'évolution de la ramification. De 2009 à 2012, les arbres portant un houppier densément ramifié représentaient respectivement 8%, 11%, 32% et 50%. Après avoir établi une correspondance entre l'ancienne et la nouvelle classification, nous estimons qu'en 2013 et 2014, 42% et 47% des hêtres sont caractérisés par une ramification dense du houppier.

Concernant la fructification, aucune glandaie massive n'a été observée depuis 2009. Depuis l'initiation du suivi, la fructification des hêtres semble plus abondante les années impaires. Néanmoins en 2014, la proportion de hêtres ayant une fructification abondante a augmenté par rapport à 2012 en passant de 0.009% à 24%. La présence de pousses épïcormiques est plus généralement observée chez les chênes et ceci de manière constante puisque depuis 2009, la proportion de chênes avec gourmands avoisine les 50%. Entre 2009 et 2012, les chênes étaient plus largement soumis à la décoloration que les hêtres. En 2014, comme en 2013, on observe une nette diminution de la décoloration en chênaie. Cette année, la majorité des chênes pédonculés (99%) et tous les chênes sessiles ont entre 0 et 10% de leur feuillage décoloré. Les chênes indigènes n'ont jamais été aussi peu touchés par la décoloration depuis 2009. Pour les hêtres, la tendance est identique puisque seulement 87% des arbres ont une coloration entre 0 et 10%.

Concernant les proportions d'arbres présentant des dommages par rapport à l'ensemble des arbres évalués, en 2014, 58% des chênes pédonculés et 10% chênes sessiles sont atteints par les défoliateurs. En 2013, on dénombrait 65% des chênes pédonculés et 86% chênes sessiles atteints par les défoliateurs alors que ce pourcentage n'atteignait que 29 % pour les chênes indigènes en 2012.

Par ailleurs, le pourcentage de hêtres dont les rameaux ($\Phi < 2$ cm) sont morts ou mourants a chuté de 32 à 13% de 2012 à 2013. En 2014, ce pourcentage n'est que de 7%. Près de la moitié des rameaux morts des hêtres seraient tombés entre 2012 et 2013. Entre août 2012 et juin 2013, quatre mois sont caractérisés par une vitesse moyenne du vent ayant atteint des records.

Les pertes de vitalité observées en forêt de Soignes peuvent être attribuées à un certain nombre de facteurs. La défoliation des chênes semble être en partie de nature accidentelle (attaque de défoliateurs, etc.). Dans le but de mettre en évidence certains facteurs explicatifs de la défoliation, la relation entre la défoliation et divers critères sont analysés statistiquement. Selon les années, entre 9 et 27% de la variabilité de la défoliation du hêtre s'explique par la circonférence du tronc. Il apparaît également que les défoliations moyennes du hêtre de 2009 à 2014 et du chêne pédonculé en 2014 sont significativement différentes selon l'indice d'ombrage qui reflète le degré de concurrence du houppier. De même, les hêtres observés lors de la campagne en 2009, 2011, 2013 et 2014 ont des moyennes de défoliation significativement différentes en fonction de l'abondance de la fructification. Finalement, une relation nette existe entre la défoliation des chênes et des hêtres en fonction de la forme du houppier. 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. On notera également, que cette année, les conditions climatiques ont été particulièrement favorables avec de fortes précipitations de juin à août.

Vingt et un arbres ont été sélectionnés en 2014 sur les placettes de contrôle visitées cette même année (Tableaux). Cet échantillon sera complété avec les placettes de contrôle en hêtraies visitées en 2015 pour atteindre environ 40 arbres. En chênaie, toutes les placettes du plan d'échantillonnage seront visitées en 2015 pour sélectionner et photographier les arbres. Ce suivi photographique des houppiers permettra à terme (i) d'analyser l'évolution de la ramification du houppier et (ii) d'expliquer le lien entre défoliation et simplification de la ramification.

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., Vanwijnsberghe 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.