

Université catholique
de Louvain



Bruxelles-Environnement
BE-IBGE



Earth and Life Institute
Environmental
Sciences



Suivi de l'état sanitaire en forêt de Soignes bruxelloise 2013

Réalisation

Ir. Alexandra Delente

Novembre 2013

Technicien

Frédéric Hardy

Promoteur

Prof. Quentin Ponette

Appui scientifique

Dr. Mathieu Jonard

Convention UCL – Bruxelles Environnement 2013

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 observés chaque année en juillet et août.

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 2013, 13 placettes en hêtraie visitées les années impaires et 6 placettes en chênaie ont été observées par les adjoints forestiers de BE-IBGE. Sept chênes sessiles, 48 chênes pédonculés et 88 hêtres soit un total de 143 arbres non dominés ont été notés pour les critères repris ci-dessus dont la défoliation.

D'après les observations de 2013, la défoliation moyenne est de 22% \pm 14% (\pm écart-type) pour les chênes pédonculés, 13% (\pm 10%) pour les chênes sessiles et 27% (\pm 14%) 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. En 2009, 2011 et 2013, la proportion de hêtres ayant une fructification abondante a fluctué entre 70%, 46% et 37%. La structure de la couronne est définie comme l'architecture des organes aériens de l'arbre. De manière générale, la structure des chênes indigènes et des hêtres s'améliore nettement depuis 2009. Les chênes indigènes caractérisés par une ramification dense représentaient 0%, 7%, 21% et 62% chaque année de la période 2009-2012. En 2013, ce niveau a atteint 64% pour les chênes pédonculés et 86% pour les chênes sessiles. Concernant le hêtre, les années précédentes la forme du houppier était notée de manière similaire à celle du chêne selon 4 classes. En 2013, cette classification a évolué en 7 classes conformément au protocole *ICP Forests*. 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, 42%

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 sans gourmands avoisine les 50%. Depuis 2009, les chênes sont plus largement soumis à la décoloration que les hêtres. Cette année, la majorité des chênes pédonculés (91%) et sessiles (57%) ont entre 0 et 10% de leur feuillage décoloré. Les chênes indigènes n'ont jamais été aussi peu touchés par la décoloration depuis 2009. De plus, en 2013, aucun chêne indigène décoloré à plus de 60% n'a été observé. Pour les hêtres, la tendance est identique puisque la totalité 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, on dénombre 65% des chênes pédonculés et 86% chênes sessiles atteints par les défoliateurs alors qu'en 2012, ce pourcentage atteignait 29% pour les chênes indigènes. Par ailleurs, le pourcentage de hêtres dont les rameaux latéraux ($\Phi < 2$ cm) sont morts ou mourants a chuté de 32 à 13% de 2012 à 2013. Par contre, la mortalité des rameaux latéraux des chênes indigènes a augmenté de 8 à 22%. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de cette évolution dont les rafales de vents enregistrées entre août 2012 et juin 2013. Le suivi photographique des couronnes, à mettre en place en 2014, permettra d'appréhender les facteurs affectant l'évolution de la structure.

En considérant l'ensemble des campagnes de 2009 à 2013, on constate que la défoliation moyenne des chênes indigènes est passée de 28% à 30% de 2009 à 2010 et de 26% à 24% puis 21% de 2011 à 2013. Le 1^{er} et le 3^e quartiles, qui mesurent la dispersion des données autour de la médiane, atteignent 25% et 30% en 2009 ; 25% et 35% en 2010 ; 20% et 35% en 2011 ; 15% et 30% en 2012 et 10% et 25% en 2013. 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 2010 est significativement différente de celle de 2013. La défoliation moyenne des hêtres diminue de 37% à 27% de 2009 à 2010 et de 29% à 22% de 2011 à 2012 pour atteindre 27% en 2013. La distribution des valeurs est plus large comparativement à celle des chênes. En effet, le 1^{er} et le 3^e quartiles atteignent 27% et 45% en 2009 ; 15% et 35% en 2010 ; 15% et 40% en 2011 ; 10% et 30% en 2012 et 15 et 35% en 2013. Statistiquement, la moyenne de 2009 est significativement différente des autres années. Il en est de même entre la moyenne de 2012 et celle de 2011. Rappelons que les séries d'arbres observés les années paires et impaires sont différentes pour cette essence.

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 de la campagne en 2009, 2011 et 2013 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.

Date de fin : Novembre 2013.

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 2013..... | 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 |
| 5.3.3. Statut social..... | 18 |
| 5.3.4. Visibilité..... | 18 |
| 5.4. Encodage et traitement des données | 19 |
| 5.5. Contrôle-qualité | 19 |
| 6. Résultats..... | 23 |
| 6.1. Défoliation..... | 24 |
| 6.1.1. La défoliation, indicateur de vitalité des arbres..... | 24 |
| 6.1.2. Défoliation moyenne des arbres de la campagne 2013..... | 24 |
| 6.1.3. Evolution de la défoliation moyenne de 2009 à 2013..... | 28 |
| 6.1.4. Evolution de la défoliation moyenne d'un même échantillon d'arbres..... | 31 |
| 6.2. Fructification | 33 |
| 6.3. Structure de la couronne | 34 |
| 6.4. Pousses épïcormiques..... | 36 |
| 6.5. Décoloration des feuilles..... | 37 |
| 6.6. Lien entre la défoliation et d'autres variables | 38 |
| 6.6.1. Analyses statistiques | 38 |
| 6.6.2. Défoliation et circonférence | 38 |
| 6.6.3. Défoliation et concurrence..... | 40 |
| 6.6.4. Défoliation et décoloration | 42 |
| 6.6.5. Défoliation et fructification..... | 44 |
| 6.6.6. Défoliation et forme du houppier | 46 |
| 6.7. Dommages | 48 |
| 6.7.1. Distribution des dommages | 48 |
| 6.7.2. Extension des dommages par placette | 50 |
| 7. Conclusion | 51 |
| Références bibliographiques | 53 |

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: Climatogramme de la station météorologique d'Uccle, 1961-1990 (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 (2013)..... | 17 |
| Figure 8: Proportion des statuts sociaux en fonction des essences (2013) | 18 |
| Figure 9: Distribution des arbres en fonction de la visibilité et de l'essence (2013)..... | 19 |
| Figure 10: Test apparié portant sur les écarts de cotation des chênes indigènes | 21 |
| Figure 11: Test apparié portant sur les écarts de cotation des hêtres..... | 21 |
| Figure 12: 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) | 22 |
| Figure 13: 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) | 23 |
| Figure 14: Légende d'un boxplot..... | 25 |
| Figure 15: boxplot de la défoliation des chênes pédonculé (CP), sessiles (CS) et des hêtres (HE) en 2013 | 25 |
| Figure 16: Distribution des arbres selon les classes de défoliation (2013) | 26 |
| Figure 17: Boxplot de la défoliation des arbres dont la couronne est entièrement visible en fonction de l'essence en 2013 | 26 |
| Figure 18: Distribution des valeurs de défoliation des chênes de 2009 à 2013..... | 29 |
| Figure 19: Distribution des valeurs de défoliation des hêtres de 2009 à 2013..... | 30 |
| Figure 20: Evolution individuelle de la défoliation de 6 chênes..... | 31 |
| Figure 21: Evolution de la défoliation d'un même échantillon de 6 chênes entre 2009, 2010, 2012 et 2013 | 32 |
| Figure 22: Evolution de la défoliation d'un même échantillonnage de 64 hêtres entre 2009, 2011 et 2013..... | 33 |
| Figure 23: Evolution du degré de fructification de 2009 à 2012 pour les chênes et les hêtres | 34 |
| Figure 24: Les quatre formes de houppier des chênes, avec leurs codes (Eichhorn et al., 2010) 41: ramification dense ; 42: simplification légère ; 43: simplification importante ; 44: déclin | 34 |
| Figure 25: Fiche de terrain différenciant les 7 formes du houppier du hêtre..... | 35 |
| Figure 26: Distribution des arbres selon la structure de la couronne..... | 36 |
| Figure 27: Distribution des arbres selon l'abondance des pousses épicromiques..... | 37 |
| Figure 28: Distribution des arbres selon le pourcentage de décoloration du feuillage | 37 |
| Figure 29 : Régression linéaire de la défoliation des chênes par année en fonction de la circonférence | 39 |
| Figure 30: Evolution de la défoliation moyenne des chênes indigènes selon l'indice de concurrence et l'année..... | 41 |
| Figure 31: Evolution de la défoliation moyenne des chênes pédonculés et sessiles selon l'indice de concurrence en 2013 | 41 |
| Figure 32: Evolution de la défoliation moyenne des hêtres selon l'indice de concurrence et l'année | 42 |
| Figure 33: Evolution de la défoliation moyenne des chênes selon la classe de décoloration et l'année | 43 |
| Figure 34: Evolution de la défoliation moyenne des hêtres selon la classe de décoloration et l'année | 44 |
| Figure 35: Evolution de la défoliation moyenne des chênes selon la fructification et l'année..... | 45 |
| Figure 36: Evolution de la défoliation moyenne des hêtres selon la classe la fructification et l'année | 46 |
| Figure 37: Evolution de la défoliation moyenne des chênes selon la classe la forme du houppier et l'année..... | 47 |
| Figure 38: Evolution de la défoliation moyenne des hêtres selon la classe la forme du houppier et l'année..... | 48 |

Table des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1: Valeurs climatiques mesurées en avril, mai, juin, juillet et août 2012 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) observés lors des campagnes de 2009 à 2013 | 15 |
| Tableau 5: Effectifs des arbres observés durant la campagne 2013 et des arbres non dominés dont la défoliation est connue | 15 |
| Tableau 6: Moyenne des écarts de défoliation par essence observée en 2013 et résultats des tests t de Student | 20 |
| Tableau 7: Moyenne et écarts-types des défoliations et des circonférences par essence et par placette (2013) | 27 |
| Tableau 8: Moyenne de défoliation par année et essence | 30 |
| Tableau 9: Défoliation moyenne des arbres martelés selon l'année et l'essence | 31 |
| Tableau 10: Corrélation entre la circonférence et la défoliation en fonction de l'essence et de l'année | 38 |
| Tableau 11: Résultats des régressions linéaires entre la circonférence et la défoliation par essence et par année | 39 |
| Tableau 12: Résultats des ANOVA testant l'impact de l'indice d'ombrage sur la défoliation | 40 |
| Tableau 13: Résultats des ANOVA testant l'impact de la décoloration sur la défoliation | 42 |
| Tableau 14: Résultats des ANOVA testant l'impact de l'indice d'ombrage sur la défoliation | 44 |
| Tableau 15: Résultats des ANOVA testant l'effet de la forme du houppier sur le pourcentage de défoliation ... | 46 |
| Tableau 16: Symptômes et dommages observés et proportion des arbres affectés..... | 49 |
| Tableau 17: Proportion des arbres touchés par l'attaque de défoliateurs selon les placettes..... | 50 |
| Tableau 18: Proportion des arbres touchés par une décoloration rouge/brune des feuilles selon les placettes | 50 |
| Tableau 19: Proportion des arbres touchés par la mortalité des rameaux ($\Phi < 2$ cm) selon les placettes | 50 |

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 chêne (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 du 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'évènements 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.

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. Pour la campagne 2013, les observateurs ont sollicité une formation de terrain axée principalement sur l'estimation de la défoliation des essences suivies. De plus, la consigne a été donnée aux agents de faire la distinction entre les chênes pédonculés et sessiles, jusqu'alors considérés globalement comme chênes indigènes.

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.

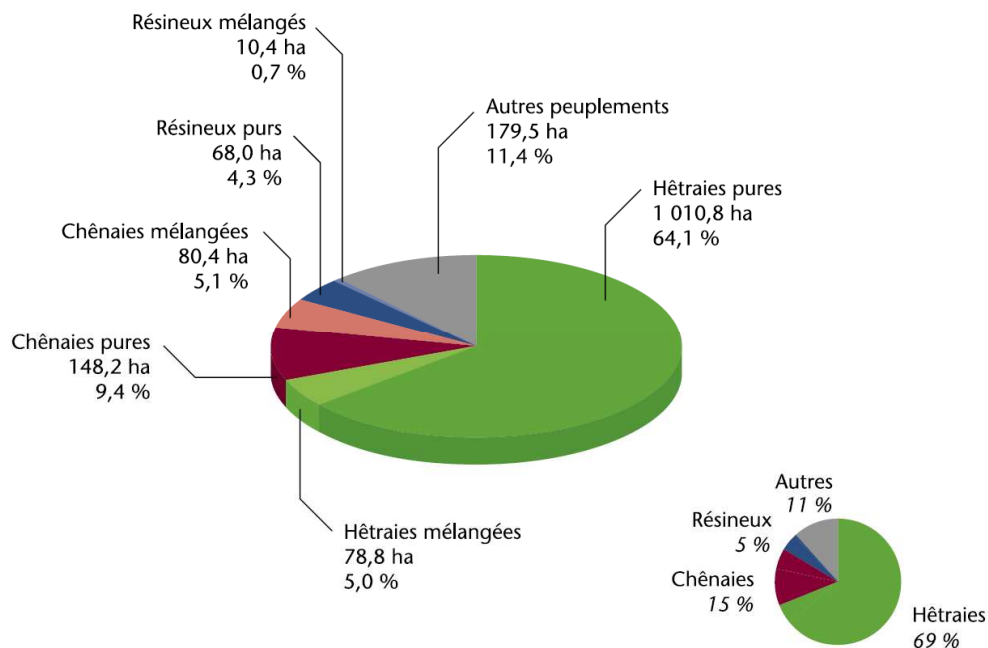


Figure 1: Proportion des types de peuplements en forêt de Soignes bruxelloise (Braem *et al.*, 2010)

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 Soignes (Vanwijnsberghe, 2003).

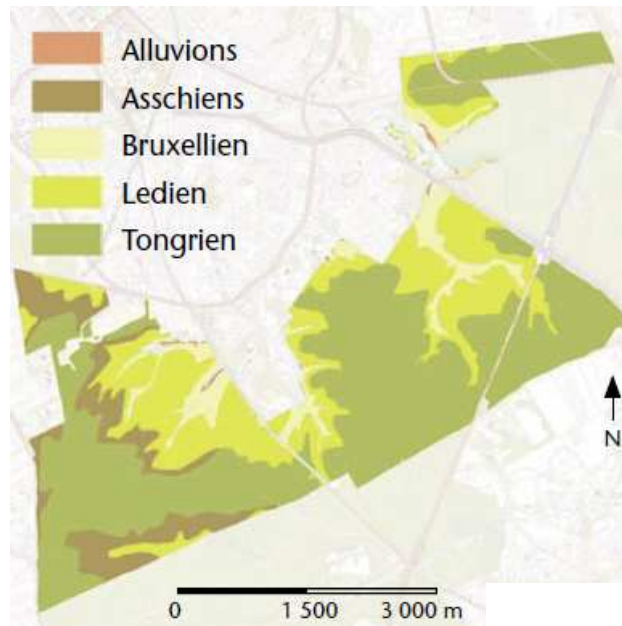


Figure 2: Roche-mère géologique présente sous le limon éolien. Les teintes jaunes présentent les assises à dominance sableuse (source: carte géologique de la Belgique, numérisation: BE-IBGE)

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.

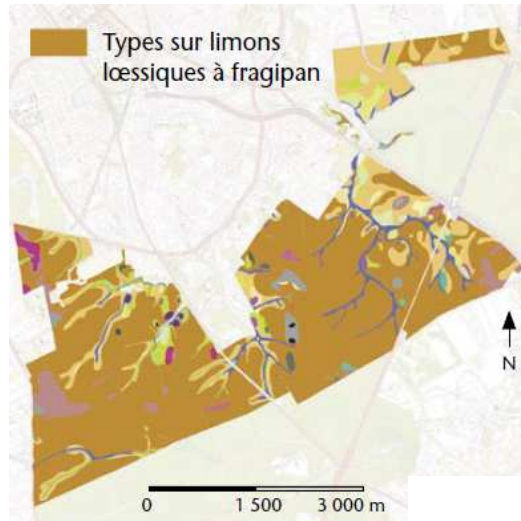


Figure 3: Les sols de la Forêt de Soignes sont dominés par le type Abc interprété comme étant un sol limoneux à fragipan (source: cartes des sols de Belgique; numérisation BE-IBGE)

3.3. Climat

Le climat belge est de type tempéré atlantique. A Uccle, la température moyenne annuelle est de 9°C et les précipitations annuelles s'élèvent à 821 mm. Les températures du mois le plus chaud et le plus froid atteignent respectivement une moyenne de 17,2°C en juillet et de 2,5°C en janvier. Les précipitations mensuelles oscillent entre 54 mm et 78 mm comme illustré à la Figure 4.

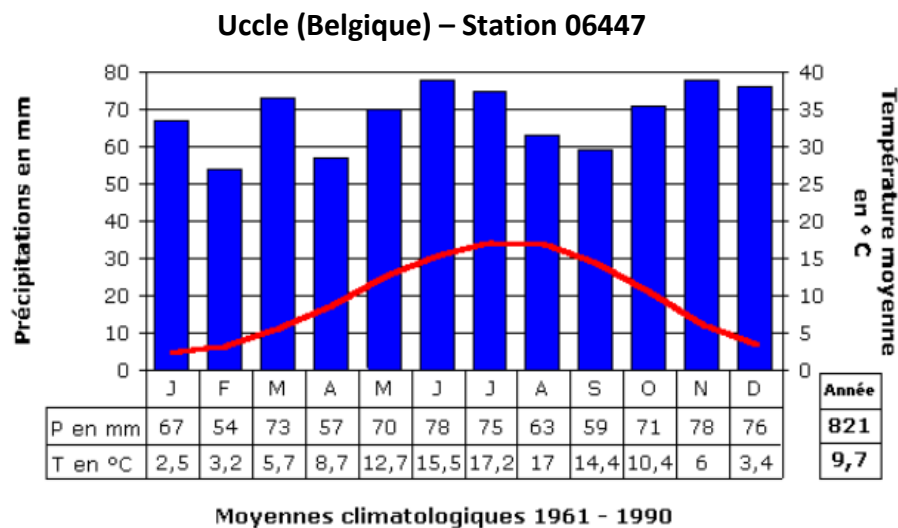


Figure 4: Climatogramme de la station météorologique d'Uccle, 1961-1990 (IRM, 2011).

Les valeurs météorologiques mesurées à Uccle sont présentées au Tableau 1. Par rapport aux normales mensuelles observées de 1981 à 2010, les précipitations totales du mois de mai sont exceptionnelles car de telles valeurs sont atteintes en moyenne tous les 10 ans. La quantité maximale enregistrée depuis 1981 est de 133 mm. Les températures moyennes et la durée d'ensoleillement s'écartent des normales mensuelles en mai et juillet 2013 puisque de tels

phénomènes sont égalés ou dépassés en moyenne une fois tous les 6 voire 10 ans selon la variable considérée (IRM, 2013).

Tableau 1: Valeurs climatiques mesurées en avril, mai, juin, juillet et août 2012 comparées aux normales mensuelles calculées sur la période 1981-2010 (IRM, Uccle)

| | P (mm) | P normale (mm) | T moy (°C) | T normale (°C) | Ensoleillement (h) | Ensoleillement normal (h) |
|--------------|--------------|----------------|-------------|----------------|--------------------|---------------------------|
| Avril 2013 | 28,5 | 51,3 | 9,0 | 9,8 | 167 | 159 |
| Mai 2013 | 132,5 | 66,5 | 11,1 | 13,6 | 136 | 191 |
| Juin 2013 | 55,3 | 71,8 | 15,8 | 16,2 | 172 | 188 |
| Juillet 2013 | 65,6 | 73,5 | 22,2 | 18,4 | 268 | 201 |
| Août 2013 | 48,3 | 79,3 | 18,6 | 18 | 213 | 190 |

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 2013

Les activités suivantes ont été réalisées en 2013 :

- (i) Le suivi de l'état sanitaire de 19 placettes de la forêt de Soignes, incluant :
 - a. L'adaptation du plan d'échantillonnage
 - b. Les observations réalisées conformément au protocole *ICP Forests*
- (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

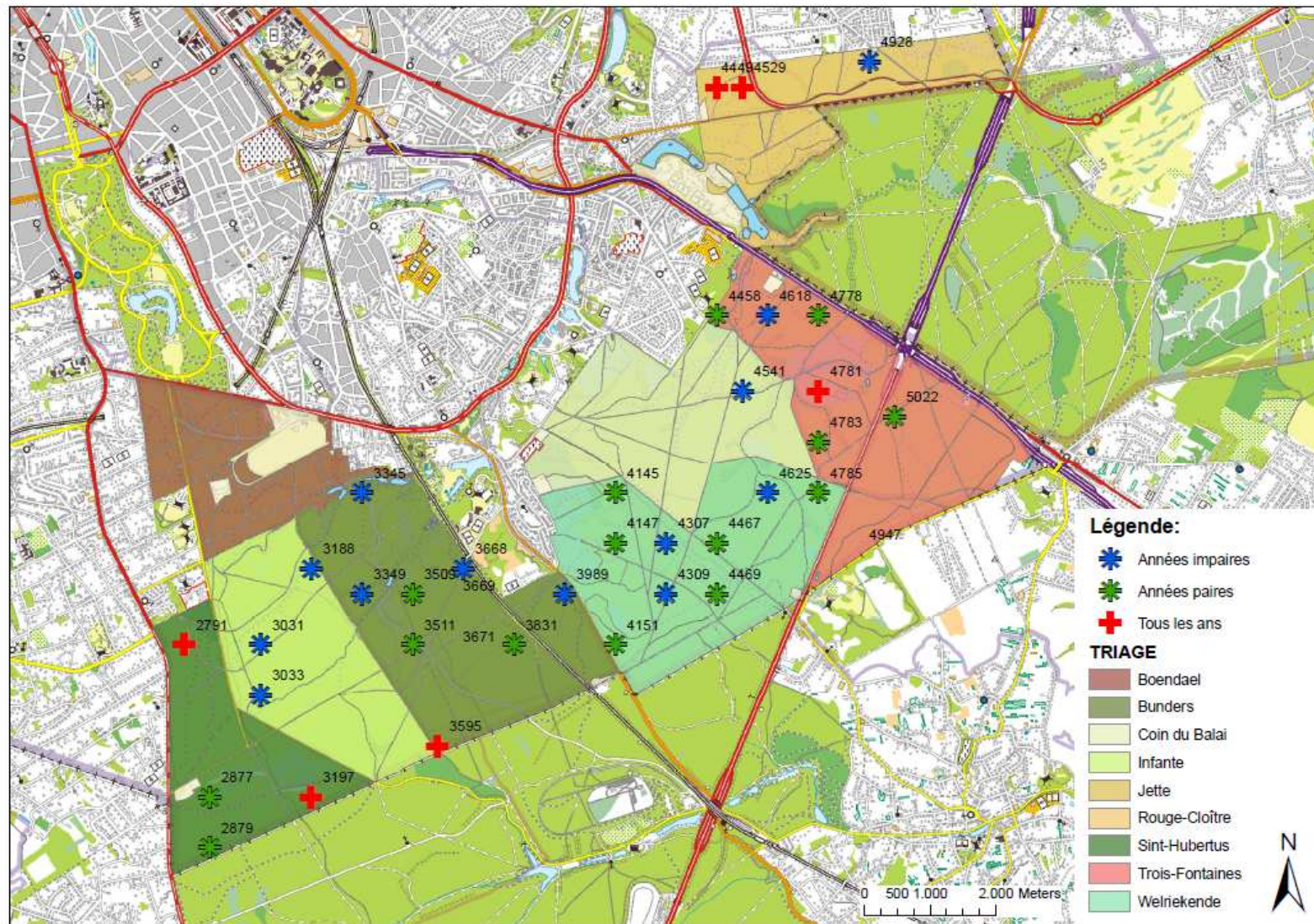
5.1. Plan d'échantillonnage

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 n°3669, 3671 et 4947 situées en hêtraie et observées en 2011 ont été remplacées par les placettes n°3188, 3668 et 4541 suite à des coupes. Etant donné la répartition des placettes en hêtraie par classe d'âge, la sélection des placettes devait répondre aux critères suivants : moyenne d'âge des arbres entre 90 et 119 ans en premier choix, ou bien entre 60-89 ans en second choix ou alors entre 120 et 149 ans en troisième choix. Finalement, les placettes sélectionnées ont 68 ans et comportent une majorité d'arbres ayant leur couronne visible, de statut social codominant ou dominant (voir paragraphe suivant).

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 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 2013, 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

Le nombre de placettes diffère entre années paires et impaires du fait que les placettes en hêtraie sont visitées une année sur deux. Durant la campagne 2013, au sein de 19 placettes, 59 chênes indigènes et 114 hêtres ont été observés soit un total de 173 arbres (voir Tableau 4). Les effectifs de 2013 sont supérieurs à ceux de l'année 2011 ce qui assure une bonne représentativité de l'échantillonnage au niveau de la forêt de Soignes bruxelloise et augmente la confiance à accorder aux résultats statistiques. L'augmentation des effectifs s'explique par différents phénomènes : (i) des arbres oubliés en 2011 ont été notés en 2013, (ii) des arbres ont été exploités entre 2011 et 2013, (iii) des individus ont atteint les 80 cm de circonférence et sont inclus dans le suivi, (iv) des placettes mises à blanc ont été remplacées par de nouvelles placettes comprenant plus d'individus.

Tableau 4: Effectifs (placettes, arbres) observés lors des campagnes de 2009 à 2013

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

Les effectifs considérés pour caractériser les arbres observés lors de la campagne 2013 incluent l'ensemble des arbres soumis à au moins une observation. Par contre, les résultats du contrôle-qualité et ceux 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. L'analyse des dommages a été effectuée sur base des effectifs totaux hors arbres dominés (voir Tableau 5).

Tableau 5: Effectifs des arbres observés durant la campagne 2013 et des arbres non dominés dont la défoliation est connue

| Effectifs | Hêtres | Chênes pédonculés | Chênes sessiles |
|------------------------------|--------|-------------------|-----------------|
| Caractérisation | 114 | 51 | 8 |
| Contrôle et résultats | 88 | 48 | 7 |
| Dommages | 101 | 49 | 7 |

Les effectifs observés sont illustrés selon les classes de circonférence à la Figure 6. Tout d’abord, le nombre de chênes pédonculés décroît selon une allure proche de l’exponentielle décroissante avec la circonférence. L’effectif maximum comporte 15 chênes pédonculés ayant une circonférence entre 100 et 119 cm. Les chênes sessiles, quant-à-eux, sont faiblement représentés puisque seuls un ou deux arbres sont compris dans cinq 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 et l’identification de critères de reconnaissance.

La distribution des hêtres s’apparente approximativement à deux fonctions gaussiennes ; l’une centrée autour de la classe des circonférences comprises entre 100 et 119 cm et l’autre centrée sur la classe des circonférences allant de 220 à 239 cm. Par ailleurs, 68% des hêtres ont une circonférence comprise entre 80 et 199 cm.

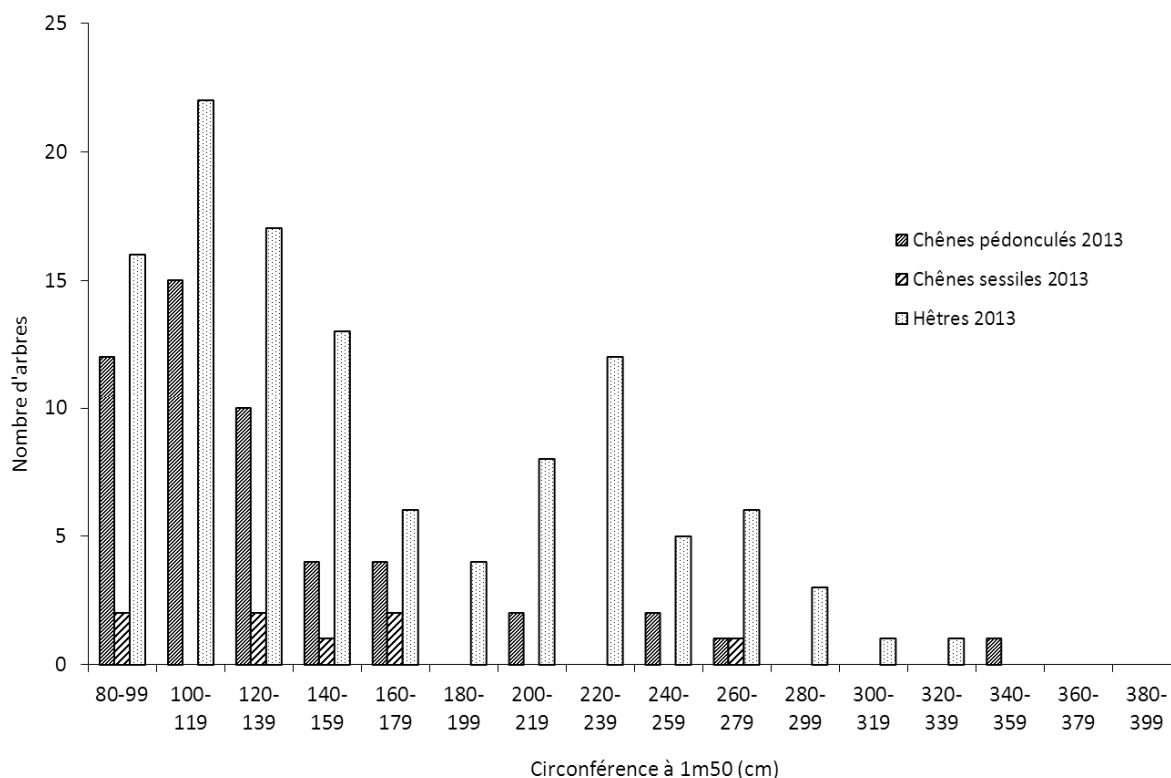


Figure 6: Distribution des arbres observés selon les classes de circonférence

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 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 majorité des chênes pédonculés ont trois ou quatre côtés de leur cime en contact avec d'autres couronnes soit respectivement 39% et 33% des effectifs (voir Figure 7). A l'inverse, les houppiers des chênes sessiles sont moins concurrencés puisque 6 arbres sur 8 ont leur couronne touchée sur un ou deux côtés. Les hêtres quant-à-eux ont leur couronne concurrencée sur 4 côtés dans 40% des cas.

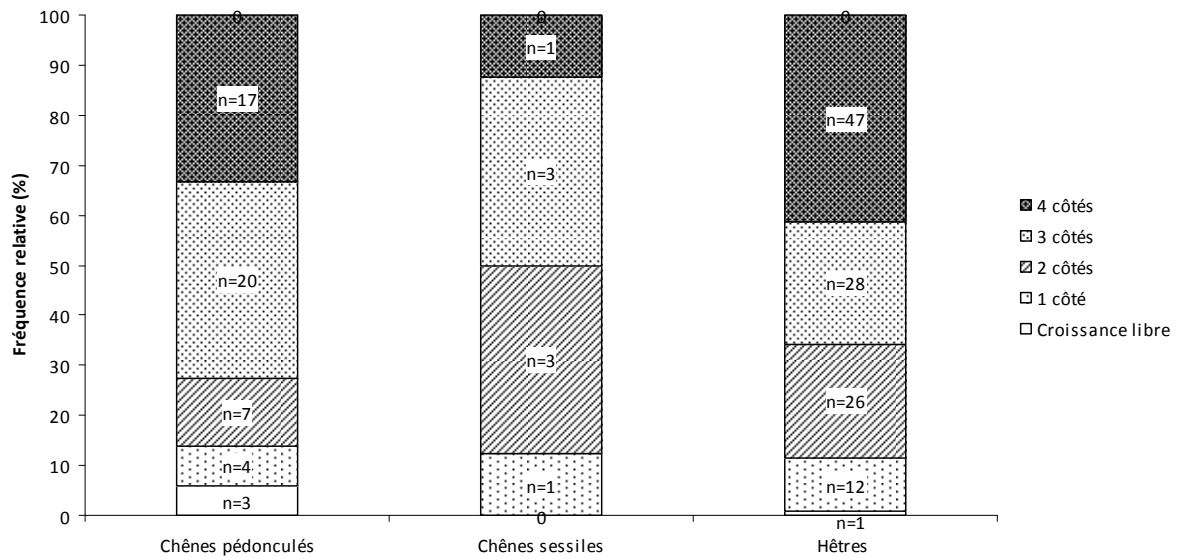


Figure 7: Distribution des arbres observés selon le degré de concurrence (2013)

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, trois quart des chênes pédonculés sont codominants contre 38% pour les chênes sessiles et 60% pour les hêtres. La proportion des hêtres aux mêmes statuts sociaux est similaire en 2012 et 2013 bien qu'il s'agisse d'individus distincts.

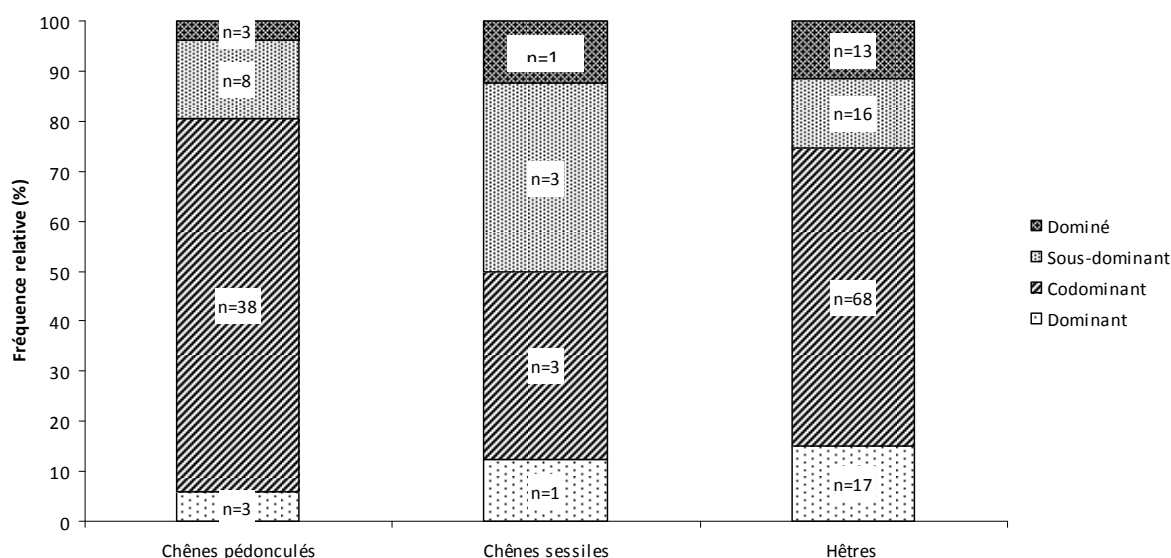


Figure 8: Proportion des statuts sociaux en fonction des essences (2013)

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 ;
- iv. Couronne non visible due à la concurrence des houppiers voisins ; le houppier est observable uniquement par le dessous.

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.

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, la décoloration et la fructification observable.

Le graphique ci-dessous indique que 25% des chênes indigènes et 35% des hêtres présentent une couronne non visible. Les houppiers sont entièrement visibles pour 31% des chênes pédonculés, 25% des chênes sessiles et 22% des hêtres.

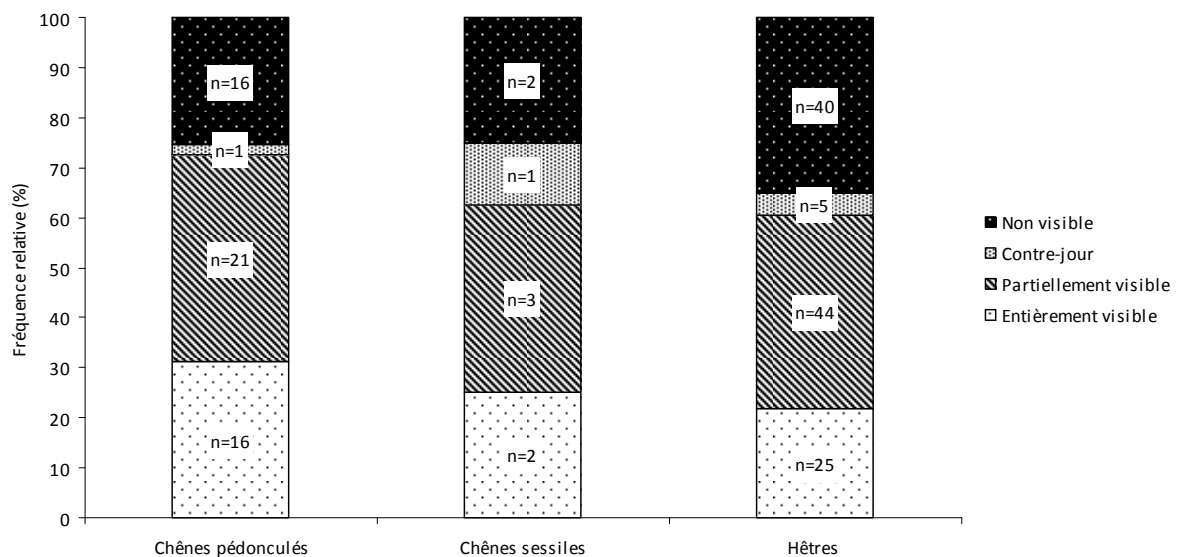


Figure 9: Distribution des arbres en fonction de la visibilité et de l'essence (2013)

5.4. Encodage et traitement des données

L'ensemble des données recueillies durant la campagne 2013 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 grâce aux 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 28 juin 2013 étaient de (i) revoir les critères morphologiques des chênes pédonculés et sessiles et de s'exercer à la reconnaissance des deux essences (ii) former les

observateurs à la nouvelle classification des formes du houppier du hêtre (voir point 6.3.), (iii) affiner les critères permettant l'évaluation de la défoliation des chênes indigènes et du hêtre. Contrairement aux années antérieures, cette année 2013, les arbres d'entraînement ont été préalablement sélectionnés sur l'ensemble de la 2^e brigade et non plus observés aléatoirement au sein de deux ou trois placettes du réseau. 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.

Pour assurer le contrôle-qualité des données, l'équipe de référence de l'UCL a revisité cinq placettes en hêtraie (n° 3031, 3345, 4309, 4618, 4625) ainsi que trois placettes en chênaie (n° 3595, 4449, 4781) durant le mois de juillet. Au sein de ces huit placettes de contrôle, l'ensemble des observations se rapportant aux conditions d'observation, à l'état du houppier et à l'évaluation des dommages et symptômes a été relevé.

Le protocole prévoit qu'au moins 5% des arbres échantillonnés pour le suivi de l'état sanitaire soient observés une première fois par les observateurs (ici, BE-IBGE) et une deuxième fois par une équipe de référence (ici, l'UCL). L'objectif est que 70% des arbres observés deux fois aient la même cotation de défoliation à 10% près (Eichhorn *et al.*, 2010).

Un total de 46 arbres a été contrôlé, cet échantillon comprend 18 chênes pédonculés et 28 hêtres soit respectivement 37% et 32% des effectifs notés en défoliation (voir Tableau 6). La proportion de cotes de défoliation ne variant pas de plus de 10% près entre les deux équipes atteint 82% pour les chênes pédonculés et 94% pour les hêtres. Toutes essences confondues, 87% des arbres observés deux fois ont la même cotation à 10% près. ; le critère de qualité exigé par le protocole est donc respecté.

Néanmoins, la moyenne des écarts de défoliation entre BE-IBGE et l'UCL est de 6 % pour les chênes pédonculés et de 3% pour les hêtres. De plus, les tests des grandeurs appariées indiquent que, pour les chênes pédonculés, 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 (voir dernière colonne Tableau 6). Nous pouvons donc conclure que bien que les données sont fiables au sens du protocole *ICP Forests*, les observateurs surestiment de manière significative la défoliation des chênes pédonculés. Par conséquent, un des objectifs de la formation de 2014 sera de rectifier ce biais.

Tableau 6: Moyenne des écarts de défoliation par essence observée en 2013 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 | 18 | 37 | 19 | 25 | 6 | Prob.> t = 0,0014* |
| Hêtres | 28 | 32 | 30 | 33 | 3 | Prob.> t = 0,0758 |

La Figure 10 et la Figure 11 illustrent les résultats des tests appariés. Au vu des graphiques, il apparaît que les observateurs ont tendance à surestimer la défoliation étant donné la distribution des valeurs au-delà d'une différence des cotations égale à 0. Ce biais est significatif pour les chênes pédonculés mais pas pour les hêtres.

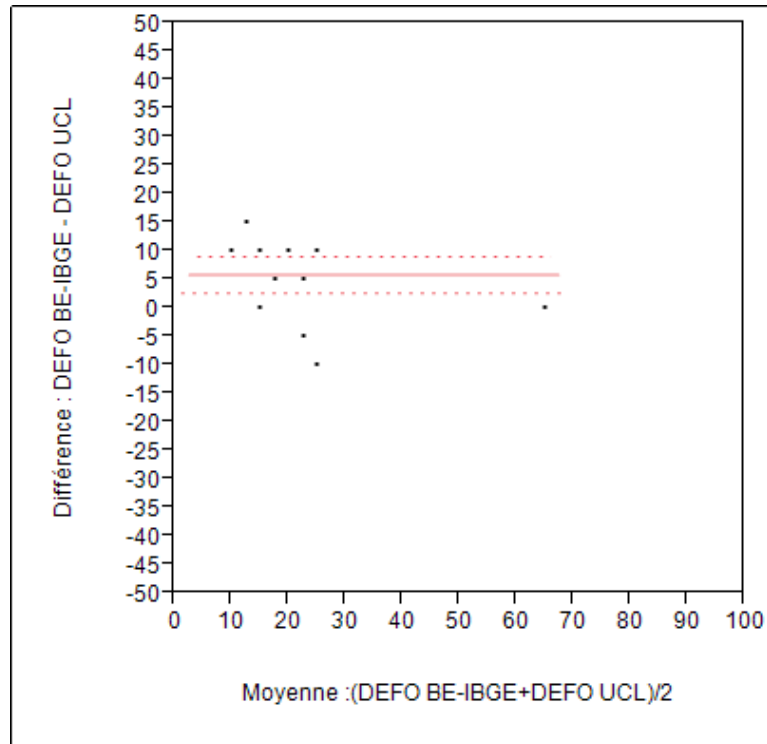


Figure 10: Test apparié portant sur les écarts de cotation des chênes indigènes

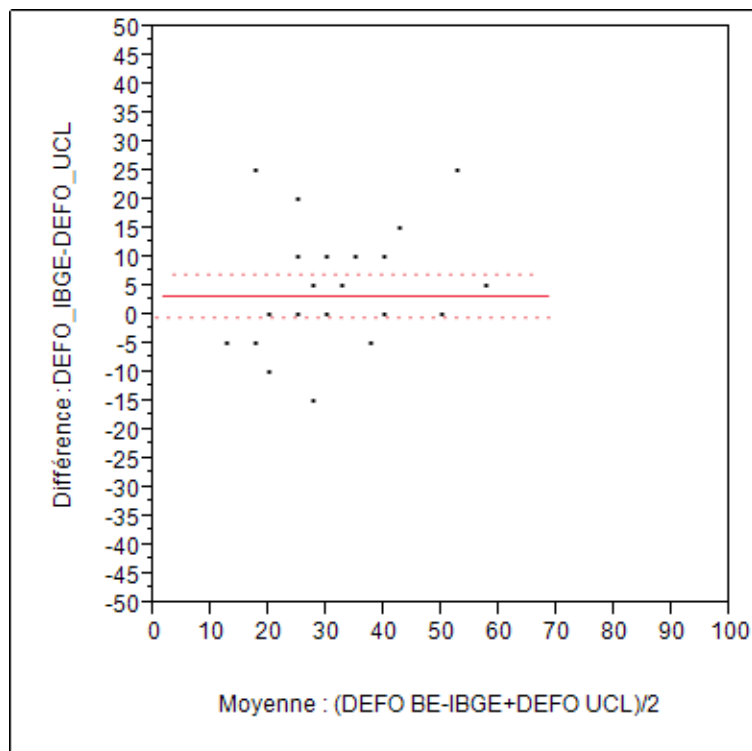


Figure 11: Test apparié portant sur les écarts de cotation des hêtres

Les figures ci-dessous illustrent les écarts de cotation entre BE-IBGE et l'UCL selon les conditions de visibilité. Il apparaît que l'estimation de la défoliation des chênes indigènes n'est pas influencée par ces conditions contrairement aux hêtres. De fait, pour cette essence les écarts de cotation entre les deux équipes est moindre lorsque la cime est entièrement visible. Parmi les cinq hêtres en dehors de l'intervalle de cotation de 10 %, 4 ont leur couronne partiellement visible voire invisible. Notons également que les différences de cotations ne sont pas expliquées par le statut social des arbres.

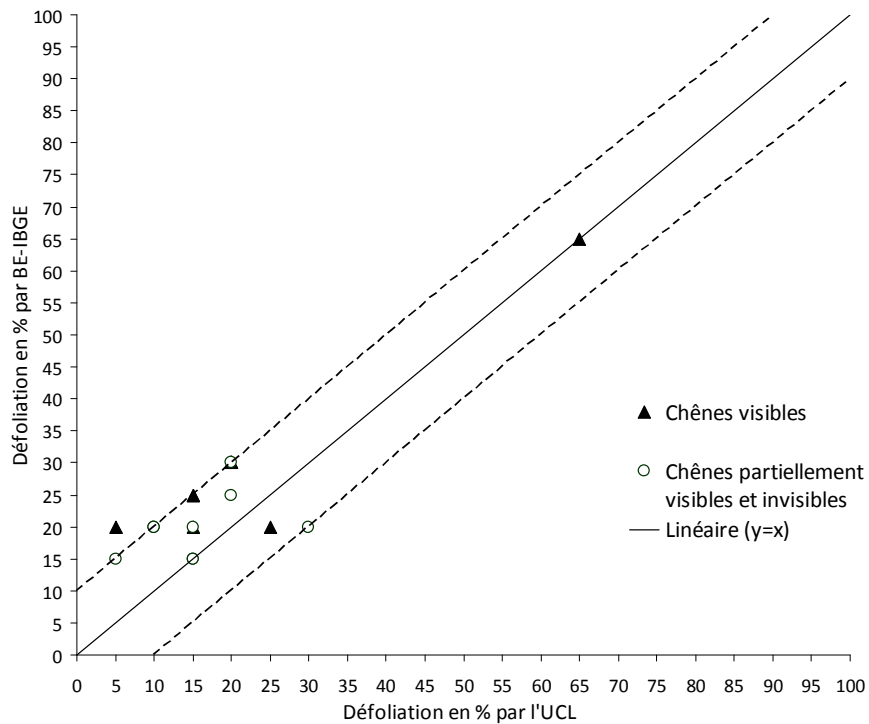


Figure 12: Comparaison des observations de défoliation des chênes entre BE-IBGE et l'UCL. Les droites en pointillés délimitent un intervalle de 10% de part et d'autre de la droite $y=x$ (correspondance parfaite)

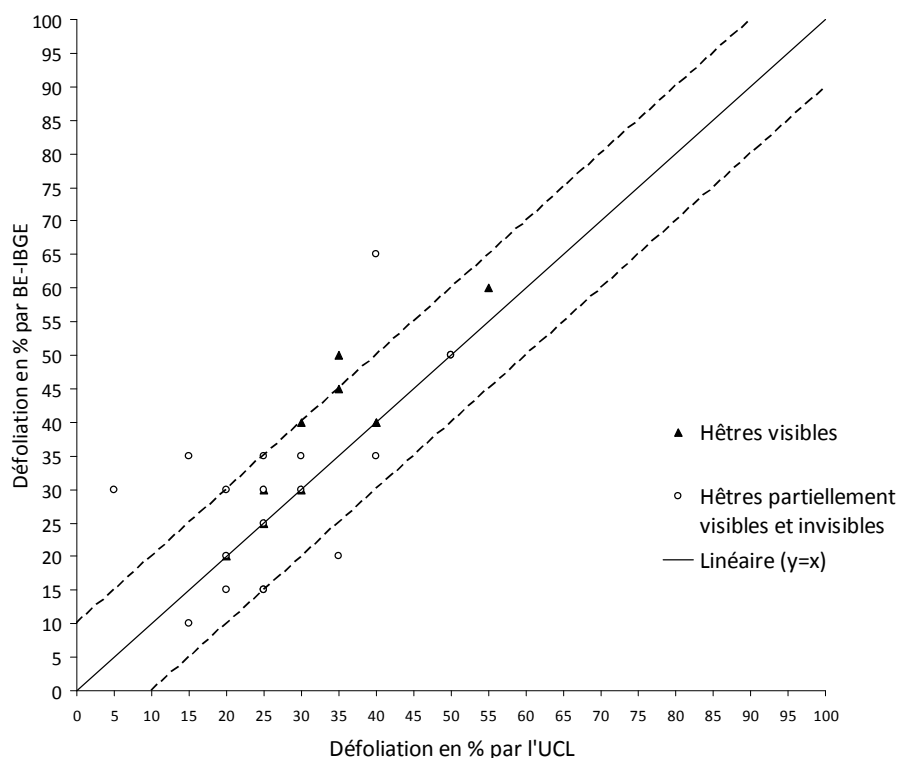


Figure 13: Comparaison des observations de défoliation des hêtres entre BE-IBGE et l'UCL. Les droites en pointillés délimitent un intervalle de 10% de part et d'autre de la droite $y=x$ (correspondance parfaite)

6. Résultats

Cette section examine successivement :

- les pourcentages de défoliation des arbres de la campagne 2013 ;
- la comparaison des valeurs de 2013 par rapport à celles enregistrées depuis 2009 ;
- l'évolution graphique de 2009 à 2013 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 induire un biais dans l'analyse de l'évolution de l'état sanitaire. De fait, les arbres d'intérêt diffèrent d'une année à l'autre suite notamment au remplacement des placettes mises à blanc. De plus, une diminution du déficit foliaire moyen pourrait être due à l'enlèvement préférentiel d'arbres dépérissants lors des éclaircies.

6.1.2. Défoliation moyenne des arbres de la campagne 2013

Les boxplot suivants permettent de visualiser la distribution des données et les statistiques élémentaires ; la Figure 14 en illustre la légende.

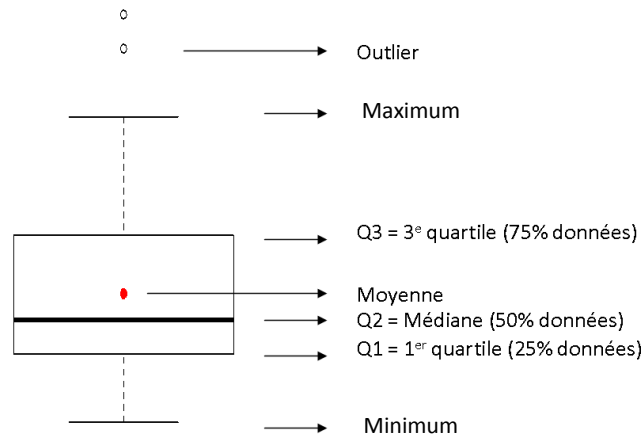


Figure 14: Légende d'un boxplot

La Figure 15 présente la distribution des valeurs de défoliation pour les 48 chênes pédonculés, les 7 chênes sessiles et les 88 hêtres repartis au sein des 19 placettes et dont la défoliation a été notée. La défoliation moyenne est de 22% pour les chênes pédonculés, 13% pour les chênes sessiles et de 27% 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 5 et 17% pour les chênes sessiles et entre 15 et 35% pour les hêtres. En conclusion, les degrés de défoliation sont plus variables pour les hêtres.

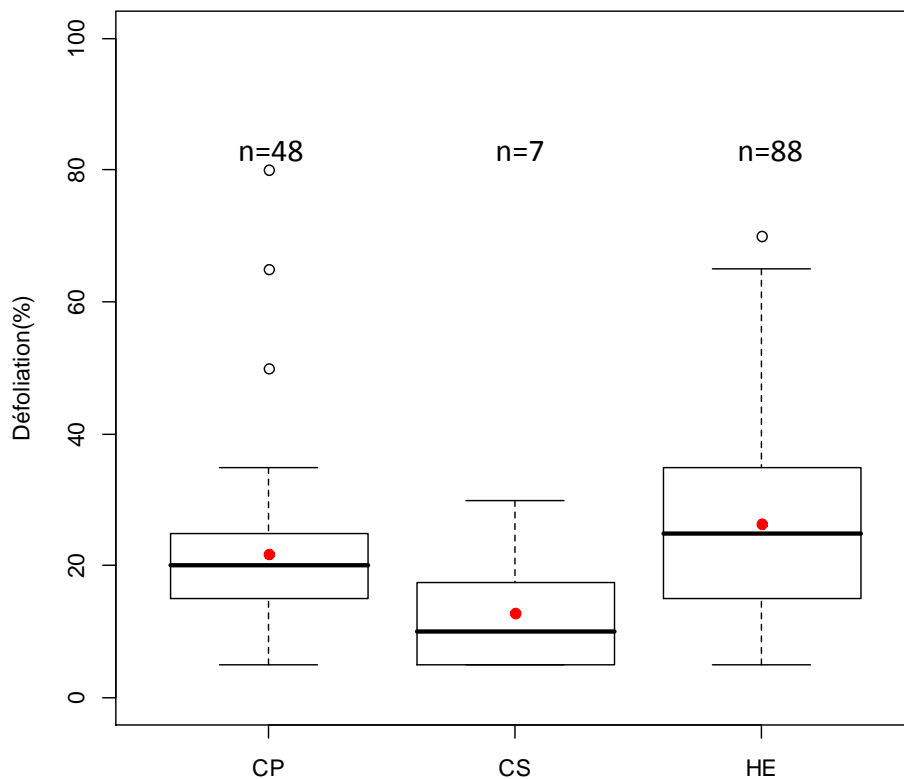


Figure 15: boxplot de la défoliation des chênes pédonculé (CP), sessiles (CS) et des hêtres (HE) en 2013

La Figure 16 complète la Figure 15 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, observés les années impaires, est similaire à celle observée en 2011.

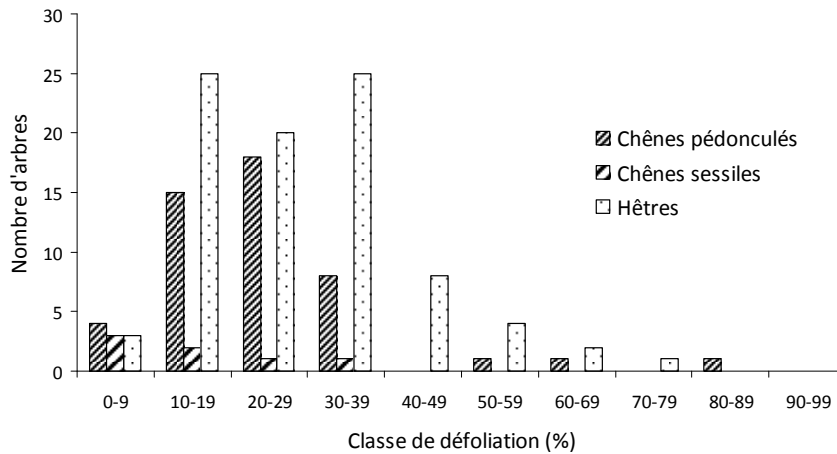


Figure 16: Distribution des arbres selon les classes de défoliation (2013)

La Figure 17 reprend 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, 37 chênes pédonculés, 4 chênes sessiles et 65 hêtres ont été retenus. La défoliation moyenne des arbres visibles est similaire à celle de l'ensemble des arbres puisque le déficit foliaire moyen est supérieure de 2% pour les chênes indigènes et de 1% pour les hêtres soit respectivement 24% pour les chênes pédonculés, 15% pour les chênes sessiles et 28% pour les hêtres.

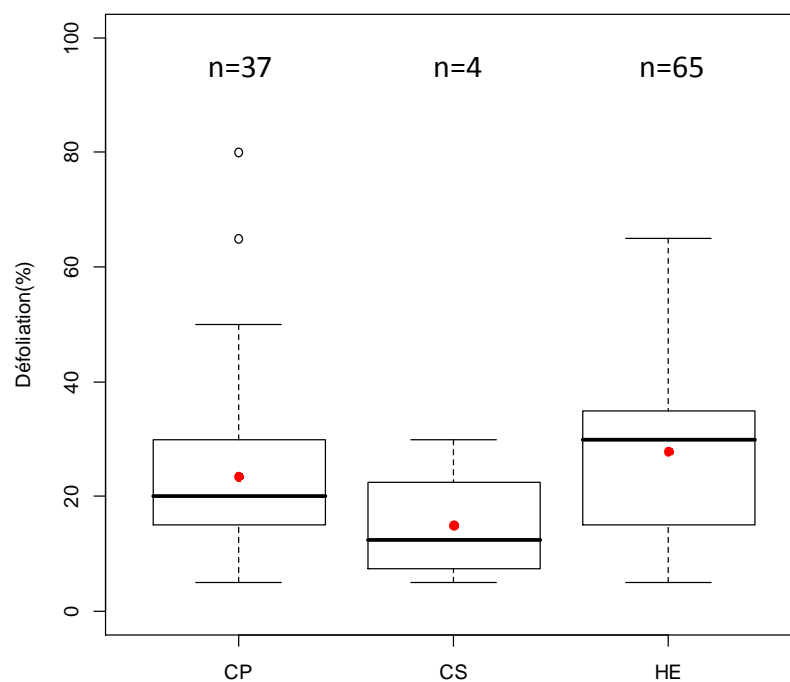


Figure 17: Boxplot de la défoliation des arbres dont la couronne est entièrement visible en fonction de l'essence en 2013

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 (2013)

| Chênes pédonculés | | | | | | |
|--------------------------|---------------------|-----------------|------------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | | | Défoliation (%) | | C150 (cm) | |
| Placette | Typologie | Effectif | Moyenne | Ecart-type | C150 | Ecart-type |
| 2791 | Hêtraies- Chênaies | 5 | 11 | 4 | 117 | 13 |
| 3033 | Hêtraies pures | 1 | 35 | x | 173 | x |
| 3197 | Hêtraies- Chênaies | 4 | 12 | 6 | 191 | 44 |
| 3595 | Hêtraies- Chênaies | 3 | 35 | 26 | 246 | 26 |
| 3668 | Hêtraies- Chênaies | 1 | 5 | x | 85 | x |
| 4449 | Chênaies pures | 15 | 21 | 7 | 123 | 67 |
| 4529 | Chênaies pures | 13 | 25 | 20 | 114 | 13 |
| 4541 | Hêtraies pures | 1 | 30 | x | 84 | x |
| 4625 | Hêtraies pures | 1 | 35 | x | 209 | x |
| 4781 | Hêtraies - Chênaies | 4 | 22 | 6 | 118 | 134 |
| Total | | 48 | 22 | 14 | 135 | 55 |
| Chênes sessile | | | | | | |
| | | | Défoliation (%) | | C150 (cm) | |
| Placette | Typologie | Effectif | Moyenne | Ecart-type | C150 | Ecart-type |
| 2791 | Hêtraies - Chênaies | 6 | 10 | 6 | 140 | 34 |
| 4529 | Chênaies pures | 1 | 30 | x | 263 | x |
| Total | | 7 | 13 | 10 | 158 | 56 |
| Hêtres | | | | | | |
| | | | Défoliation (%) | | C150 (cm) | |
| Placette | Typologie | Effectif | Moyenne | Ecart-type | C150 | Ecart-type |
| 2791 | Hêtraies - Chênaies | 6 | 12 | 3 | 155 | 19 |
| 3031 | Hêtraies pures | 7 | 43 | 13 | 192 | 25 |
| 3033 | Hêtraies pures | 6 | 25 | 12 | 173 | 60 |
| 3188 | Hêtraies pures | 6 | 21 | 24 | 110 | 12 |
| 3197 | Hêtraies - Chênaies | 7 | 19 | 11 | 217 | 48 |
| 3345 | Hêtraies pures | 7 | 24 | 9 | 217 | 33 |
| 3349 | Hêtraies pures | 4 | 34 | 9 | 258 | 28 |
| 3595 | Hêtraies - Chênaies | 1 | 30 | x | 290 | x |
| 3668 | Hêtraies- Chênaies | 5 | 16 | 7 | 131 | 71 |
| 3989 | Hêtraies pures | 5 | 28 | 8 | 269 | 36 |
| 4307 | Hêtraies pures | 1 | 55 | x | 284 | x |
| 4309 | Hêtraies pures | 5 | 42 | 15 | 221 | 11 |
| 4541 | Hêtraies pures | 5 | 35 | 6 | 116 | 15 |
| 4618 | Hêtraies pures | 12 | 26 | 10 | 134 | 15 |
| 4625 | Hêtraies pures | 2 | 27 | 4 | 238 | 49 |
| 4928 | Hêtraies pures | 9 | 21 | 11 | 118 | 26 |
| Total | | 88 | 27 | 14 | 168 | 35 |

6.1.3. Evolution de la défoliation moyenne de 2009 à 2013

Les données des campagnes de 2009, 2010, 2011 et 2012 ont été extraites de la base de données MS Access. L'ensemble de ces données ont été traitées une nouvelle fois en 2013. A l'issue des analyses statistiques, certains effectifs sont différents de ceux calculés dans les rapports antérieurs. Les différences entre les effectifs rapportés dans le rapport de 2012 et de 2013 sont dues au retrait des valeurs provenant des arbres dominés afin de respecter scrupuleusement le protocole *ICP Forests*. Toutefois, ces variations ne modifient pas les ordres de grandeur observés.

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 sont des moyennes qui ne sont pas significativement différentes entre elles au seuil de 0,05.

La Figure 18 reflète l'évolution des valeurs de défoliation des chênes de 2009 à 2013. 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% puis 21% de 2011 à 2013. 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 et 10% et 25% en 2013. 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 2010 est significativement différente de celle de 2013.

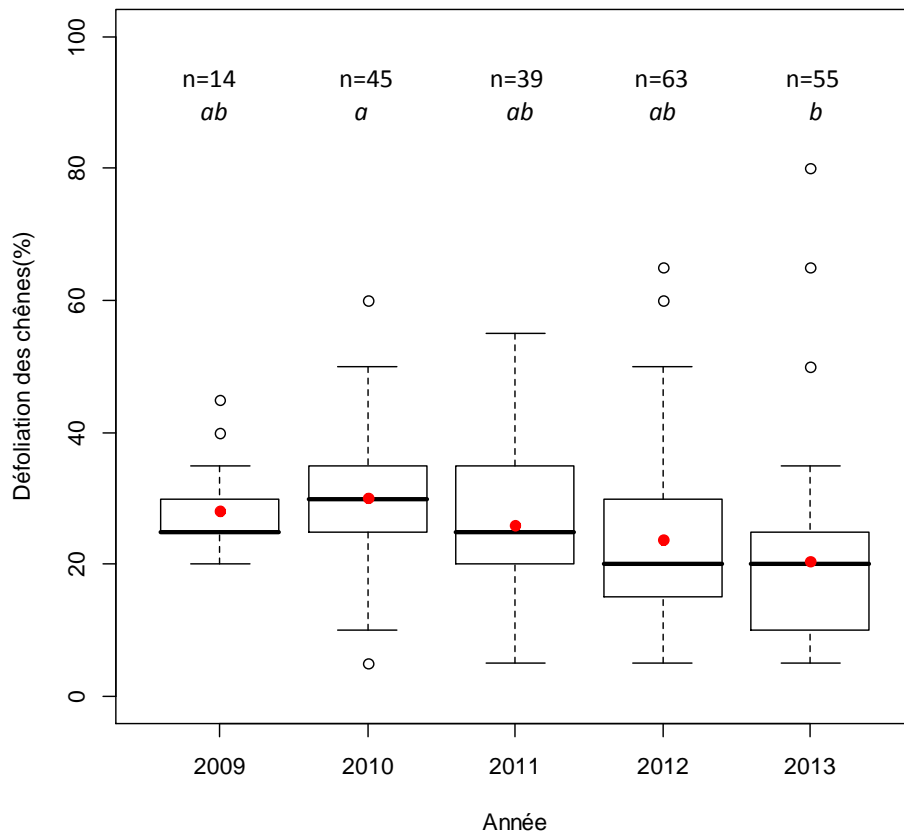


Figure 18: Distribution des valeurs de défoliation des chênes de 2009 à 2013

La défoliation moyenne des hêtres diminue de 37% à 27% de 2009 à 2010 et de 29% à 22% de 2011 à 2012 pour atteindre 27% en 2013. 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, qui mesurent la dispersion des données autour de la médiane, atteignent 27% et 45% en 2009 ; 15% et 35% en 2010 ; 15% et 40% en 2011 ; 10% et 30% en 2012 et 15 et 35% en 2013. Statistiquement la moyenne de 2009 est significativement différente des autres années. Il en est de même entre la moyenne de 2012 et celle de 2011. Rappelons que les séries d'arbres observés les années paires et impaires sont différentes.

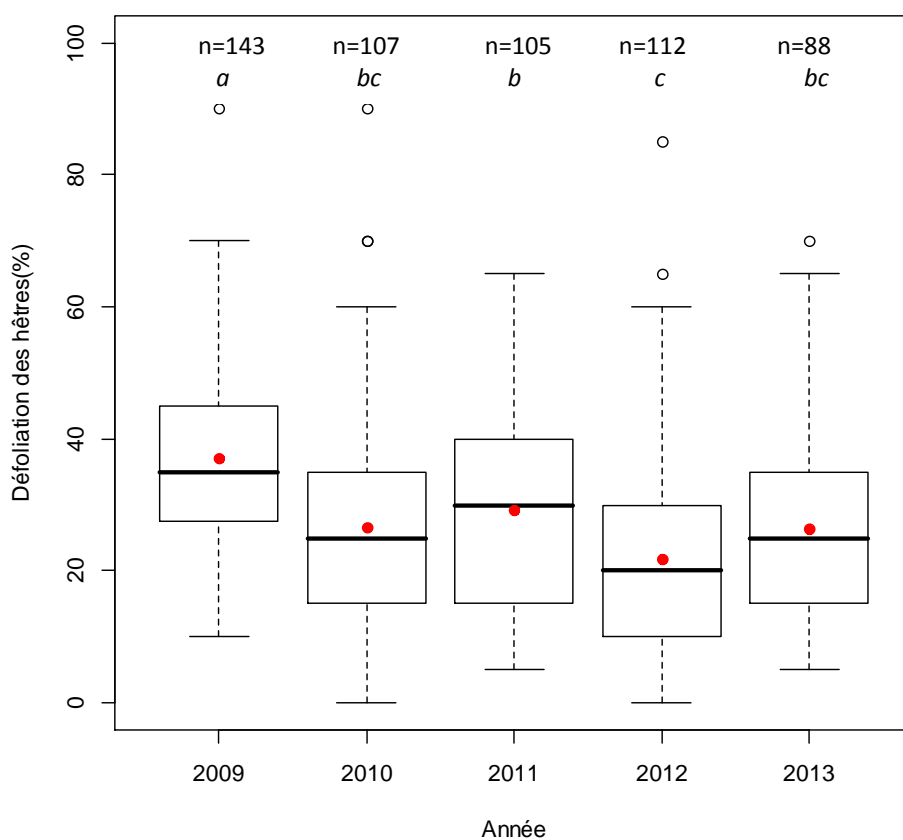


Figure 19: Distribution des valeurs de défoliation des hêtres de 2009 à 2013

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

Tableau 8: Moyenne de défoliation par année et essence

| | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|---------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Chênes | 28% (n=14) <i>ab</i> | 30% (n=45) <i>a</i> | 26% (n=39) <i>ab</i> | 24% (n=63) <i>ab</i> | 21% (n=55) <i>b</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> |

Par ailleurs, afin de déterminer si la diminution du déficit foliaire moyen pourrait être due à l'enlèvement préférentiel d'arbres dépérissants lors des éclaircies, la défoliation moyenne des arbres martelés a été calculée au Tableau 9. Cette hypothèse ne semble pas vérifiée car des individus sains partent en éclaircies.

Tableau 9: Défoliation moyenne des arbres martelés selon l'année et l'essence

| | | Chênes | | | Hêtres | | |
|-------|-------------|--------|-------------------------|-------------------|--------|-------------------------|-------------------|
| Année | | n | Défoliation moyenne (%) | Ecartype standard | n | Défoliation moyenne (%) | Ecartype standard |
| 2009 | Echantillon | 14 | 28 | 7 | 143 | 37 | 14 |
| | Martelé | / | / | / | 6 | 38 | 11 |
| 2011 | Echantillon | 39 | 26 | 10 | 105 | 29 | 15 |
| | Martelé | 1 | 25 | / | 6 | 31 | 9 |
| 2013 | Echantillon | 55 | 21 | 14 | 88 | 27 | 14 |
| | Martelé | 4 | 10 | 4 | 2 | 25 | 14 |

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

La Figure 20 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.

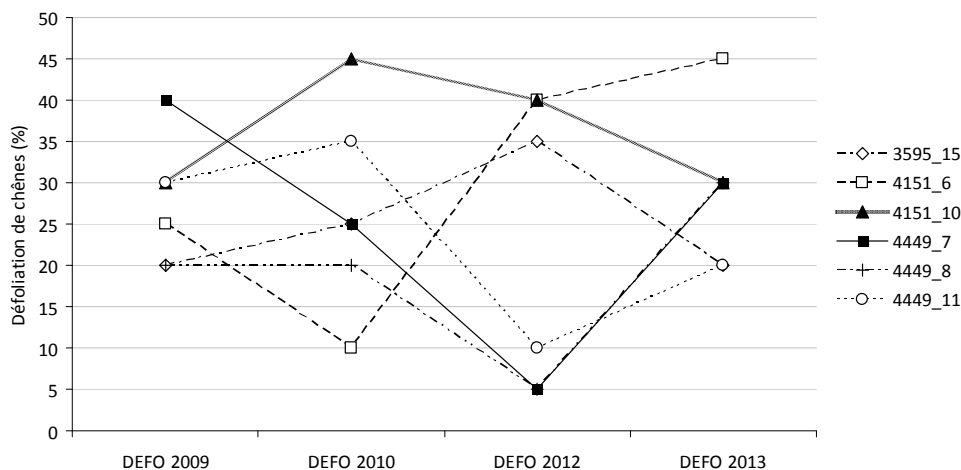


Figure 20: Evolution individuelle de la défoliation de 6 chênes

Au vu de la Figure 21, 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 et 29% en 2013. Notons également que la variabilité des données est plus large en 2012 puisque 50% des données sont distribuées entre 5 et 40% de défoliation. 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.

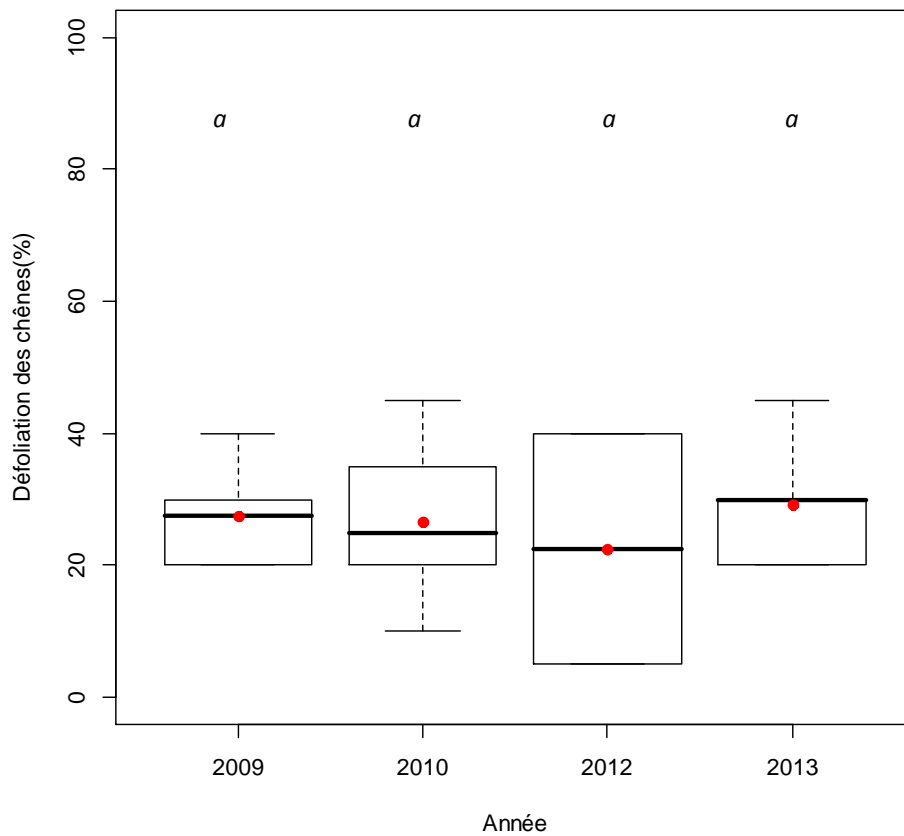


Figure 21: Evolution de la défoliation d'un même échantillon de 6 chênes entre 2009, 2010, 2012 et 2013

Les hêtres observés les années impaires relèvent d'un échantillonnage différent. C'est pourquoi, les données de la campagne 2010 et 2012 n'ont pas été considérées dans l'analyse. La défoliation moyenne de l'échantillon de 64 hêtres est de 36% en 2009 ; 33% en 2011 et 29% en 2013, ces valeurs s'inscrivent dans la même gamme que celles calculées pour l'ensemble des hêtres. Par ailleurs, tout comme pour l'échantillon total, le déficit foliaire moyen de l'échantillon commun de 2009 est significativement différent de celui de 2013 (voir Figure 22).

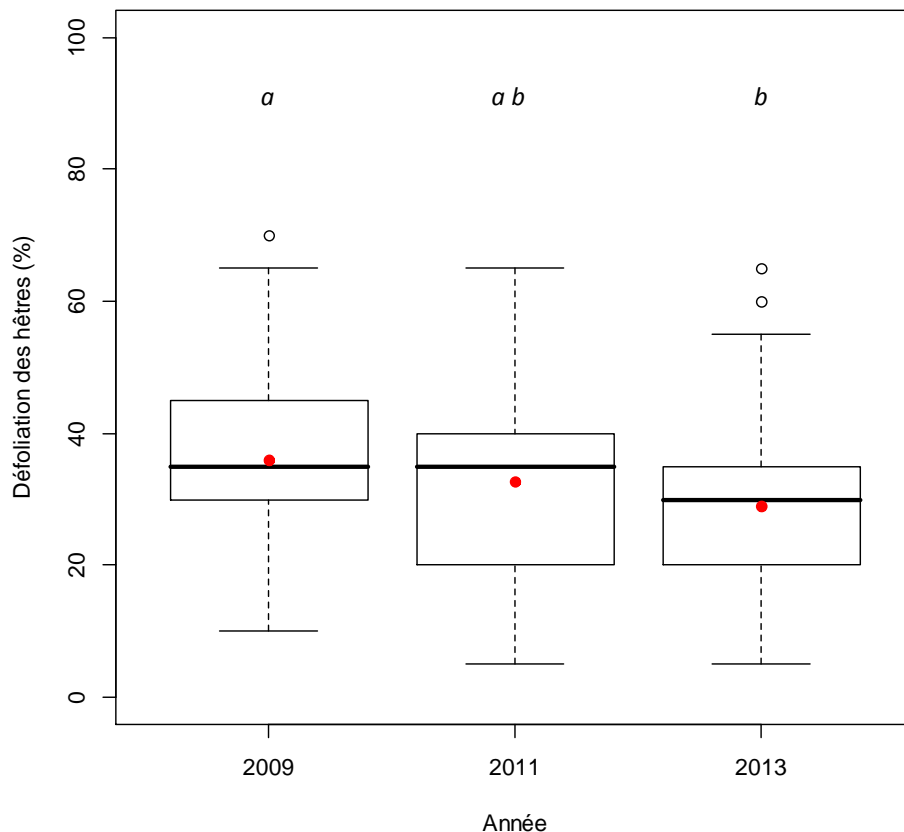


Figure 22: Evolution de la défoliation d'un même échantillonnage de 64 hêtres entre 2009, 2011 et 2013

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 9 chênes pédonculés soit 18% 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 23). En 2009, 2011 et 2013, la proportion de hêtres ayant une fructification abondante diminue de 70% à 46% et 37%.

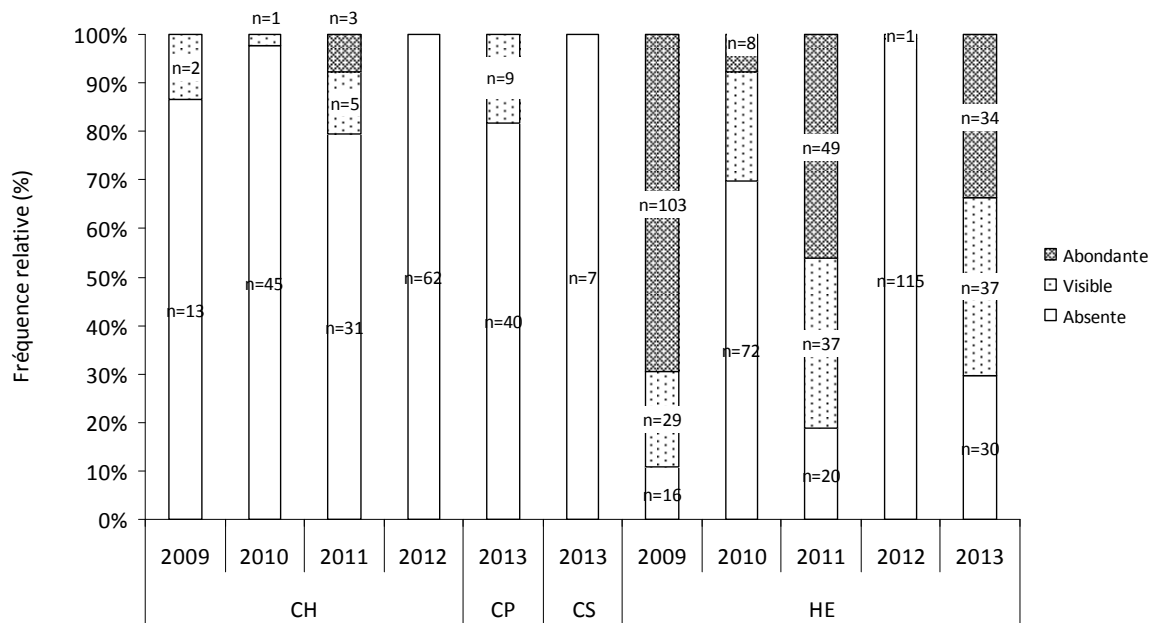


Figure 23: Evolution du degré de fructification de 2009 à 2012 pour les chênes et les hêtres

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 des stades de développement atteints par l'arbre et des stress subis au cours du temps. Afin d'évaluer la vitalité du houppier des chênes quatre formes du houppier ont été définies (voir Figure 24) en fonction de la forme de la partie supérieure de la couronne et du développement de ces rameaux.

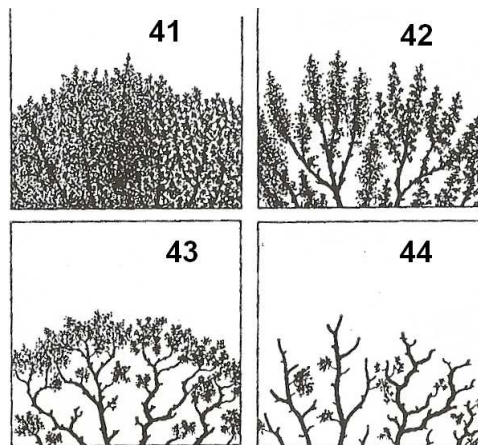


Figure 24: Les quatre formes de houppier des chênes, avec leurs codes (Eichhorn et al., 2010)
 41: ramification dense ; 42: simplification légère ; 43: simplification importante ; 44: déclin

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 25 illustre une fiche de terrain utile aux observateurs pour différencier les formes sur base de critères et de photos prises en Belgique.

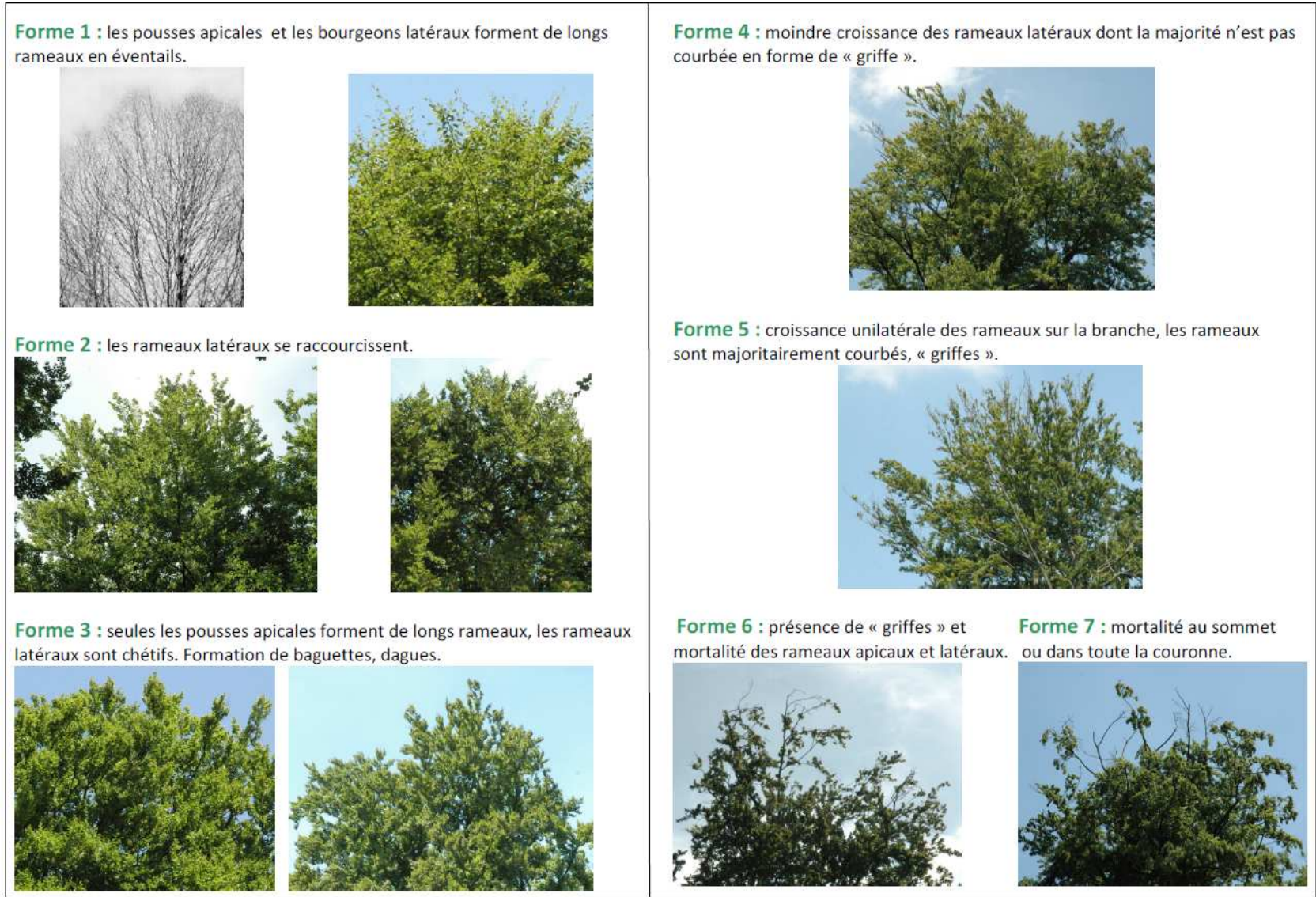


Figure 25: Fiche de terrain différenciant les 7 formes du houppier du hêtre

Depuis 2009, la structure de la couronne s’améliore nettement pour les chênes et les hêtres (voir Figure 26). Les chênes indigènes caractérisés par une ramification dense représentaient 0%, 7%, 21% et 62% chaque année de la période 2009-2012. En 2013, ce niveau a atteint 64% pour les chênes pédonculés soit 30 individus et 86% pour les chênes sessiles soit 6 arbres.

Concernant l’évolution de la ramification des hêtres, représentée à la Figure 26, l’analyse sera plus aisée une fois que la nouvelle méthodologie sera appliquée à tous les hêtres d’intérêt. Néanmoins, en considérant que la forme 1 et 2 reflètent une ramification dense ; la forme 3 et 4, une simplification légère et la forme 5 et 6, une simplification importante de la couronne, nous déduisons que 42% des hêtres ont une ramification dense, 44% sont soumis à une simplification légère et 14% à une simplification importante. Bien que les pourcentages de 2013 reflètent une légère régression dans l’amélioration générale de la structure par rapport aux années antérieures, aucune conclusion ne peut être tirée puisque ces résultats sont issus d’une approximation. Rappelons que de 2009 à 2012, les arbres portant un houppier densément ramifié représentaient respectivement 8%, 11%, 32% et 50%.

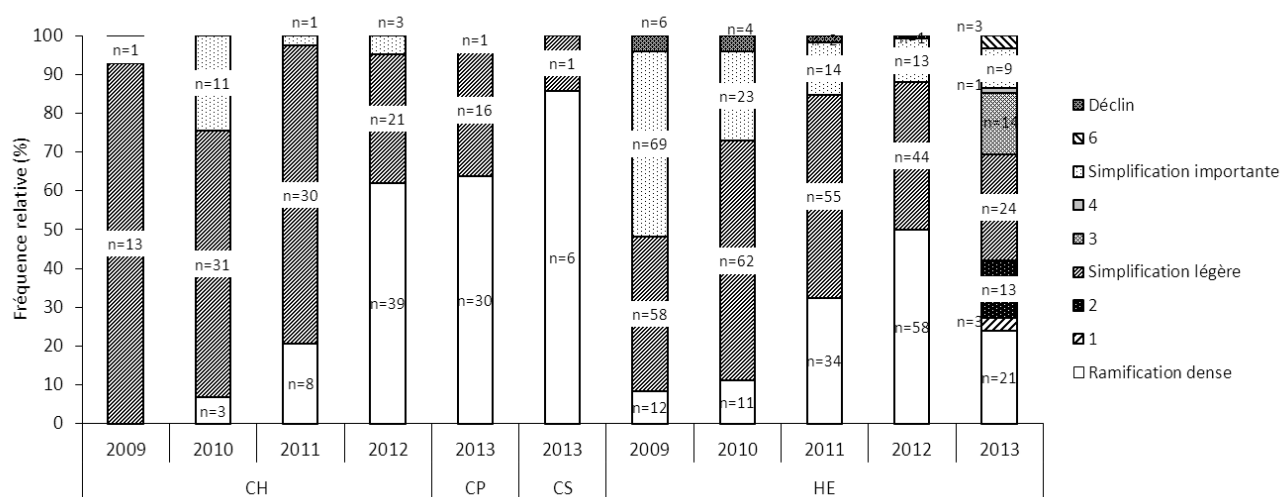


Figure 26: Distribution des arbres selon la structure de la couronne

6.4. Pousses épïcormiques

Les gourmands et les pousses épïcormiques 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 épïcormiques est plus généralement observée chez les chênes et ceci de manière constante puisque la proportion de chênes sans 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 27). En 2013, la même catégorie représente une proportion de 29% pour les chênes pédonculés et 14% pour les chênes sessiles.

Par ailleurs, nous observons de moins en moins de gourmands chez les hêtres car les arbres exempts de pousse épïcormique représentent de 2009 à 2013 respectivement 72%, 74%, 79% 91% et 89%.

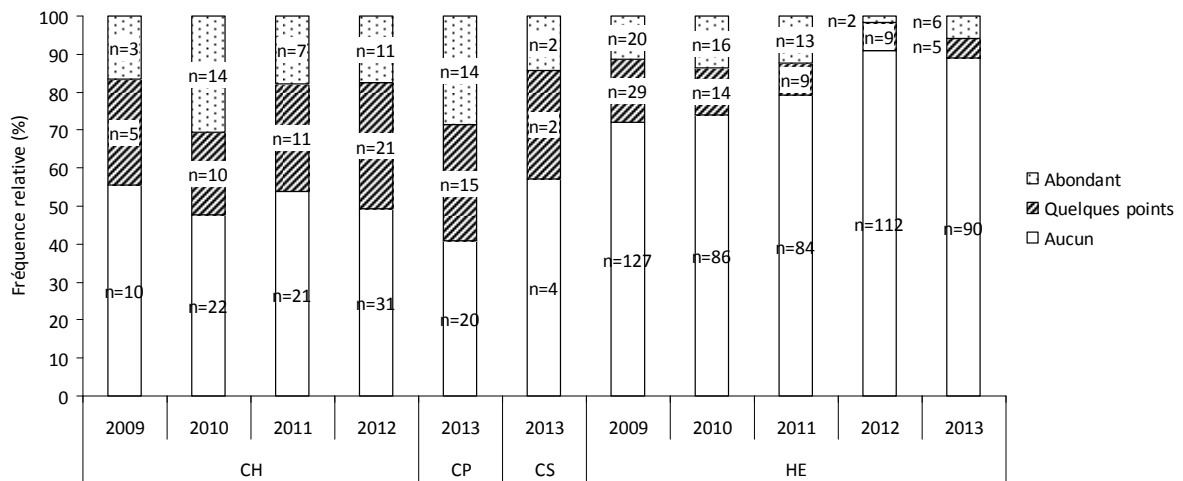


Figure 27: Distribution des arbres selon l'abondance des pousses épicorniques

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

Depuis 2009, les chênes sont plus largement soumis à la décoloration que les hêtres (voir Figure 28). Cette année, la majorité des chênes pédonculés (91%) et sessiles (57%) ont entre 0 et 10% de leur feuillage décoloré. Les chênes indigènes n'ont jamais été aussi peu touchés par la décoloration depuis 2009. De plus en 2013, aucun chêne indigène décoloré à plus de 60% n'a été observé. Pour les hêtres, la tendance est identique puisque la totalité des arbres ont une coloration entre 0 et 10%.

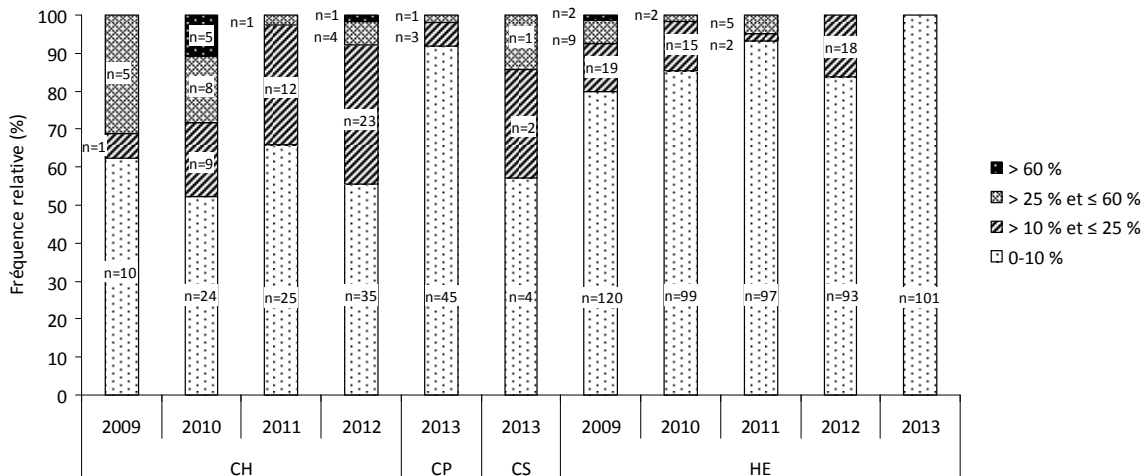


Figure 28: Distribution des arbres selon le pourcentage de décoloration du feuillage

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 et 2013. 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 10 suivant reprend le niveau de corrélation existant entre la défoliation et la circonférence des chênes et des hêtres mesurée à 1m50 en fonction des années. Les coefficients en gras marqués d'un astérisque indiquent que la corrélation est significative. 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 considérés lors des campagnes de 2009 à 2013.

Tableau 10: Corrélation entre la circonférence et la défoliation en fonction de l'essence et de l'année

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

Les régressions linéaires (Tableau 11) 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 11: 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 | 2013 | Ch. sessiles | 7 | $y=0,1056x-3,783$ | 0,3849 | 0,1372 |
| y7 | 2009 | Hêtres | 143 | $y=0,0987x+17,24$ | 0,1397 | <0,0001* |
| y8 | 2010 | Hêtres | 107 | $y=0,1065x+7,35$ | 0,1693 | <0,0001* |
| y9 | 2011 | Hêtres | 102 | $y=0,1295x+7,05$ | 0,2683 | <0,0001* |
| y10 | 2012 | Hêtres | 112 | $y=0,1024x+3,01$ | 0,143 | <0,0001* |
| y11 | 2013 | Hêtres | 88 | $Y=0,0674x+14,7$ | 0,0902 | 0,0045* |

La Figure 29 illustre la distribution des valeurs de défoliation des hêtres de 2013 en fonction de la circonférence à 1m50. Le coefficient de pente est de 0,0674, en d'autres termes, sur base des données de 2013, la relation linéaire est telle que lorsque la circonférence d'un hêtre augmente de 100 cm, la défoliation augmenterait de 6,74%.

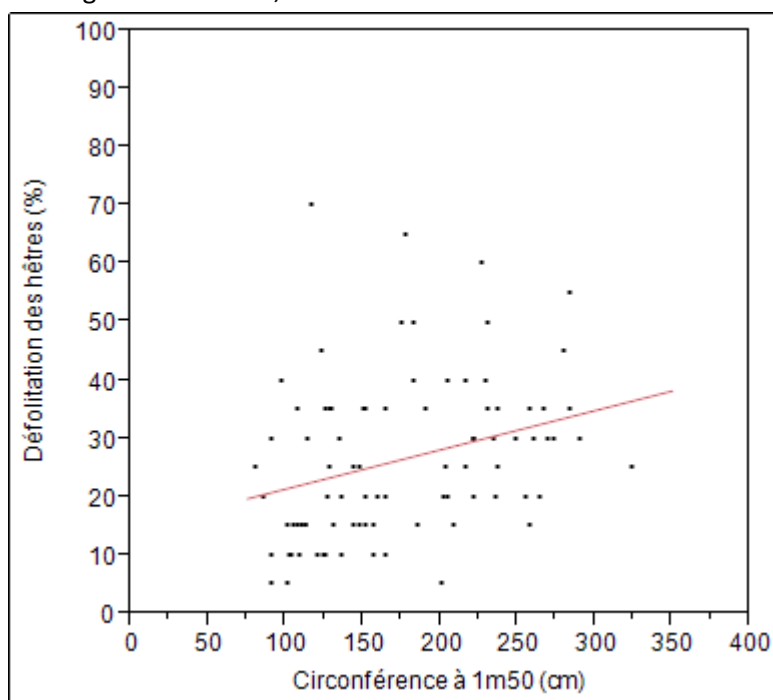


Figure 29 : Régression linéaire de la défoliation des hêtres par année en fonction de la circonférence

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 12 indiquent que les moyennes de défoliation ne sont pas significativement différentes pour les chênes observés contrairement aux hêtres.

Tableau 12: 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. sessiles 2013 | 2 | 76,19 | 38,09 | 0,3265 | 0,7390 |
| 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* |

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 30, le degré de concurrence du houppier des chênes n'est pas en lien avec le déficit foliaire de 2009 à 2012. La Figure 31 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

indigènes n'est pas en lien avec le degré de concurrence. 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.

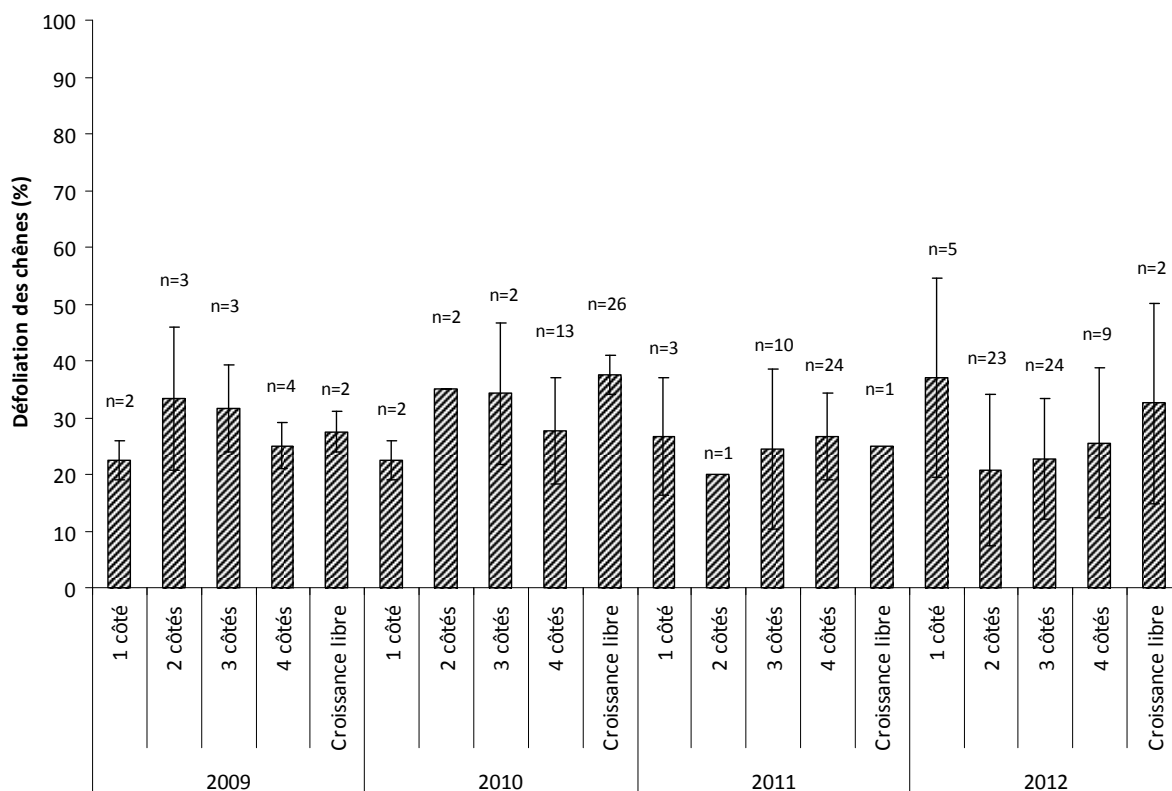


Figure 30: Evolution de la défoliation moyenne des chênes indigènes selon l'indice de concurrence et l'année

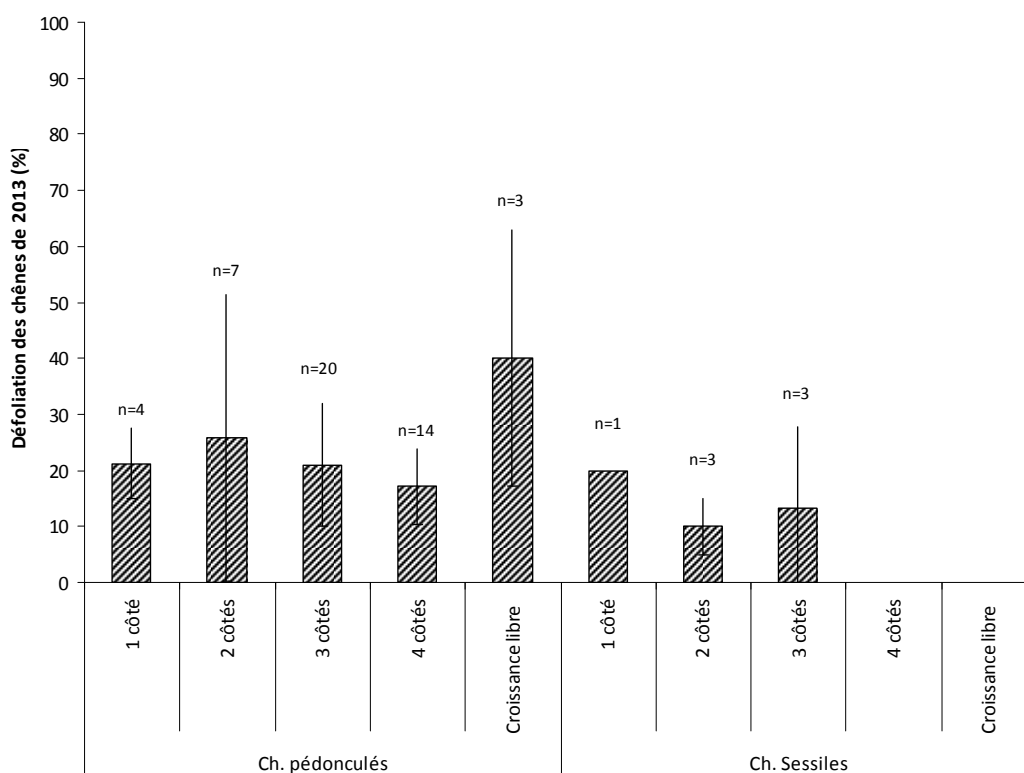


Figure 31: Evolution de la défoliation moyenne des chênes pédonculés et sessiles selon l'indice de concurrence en 2013

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. Toutefois, d'après le test de Tukey les groupes ne sont pas significativement différents entre eux. Hormis 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.

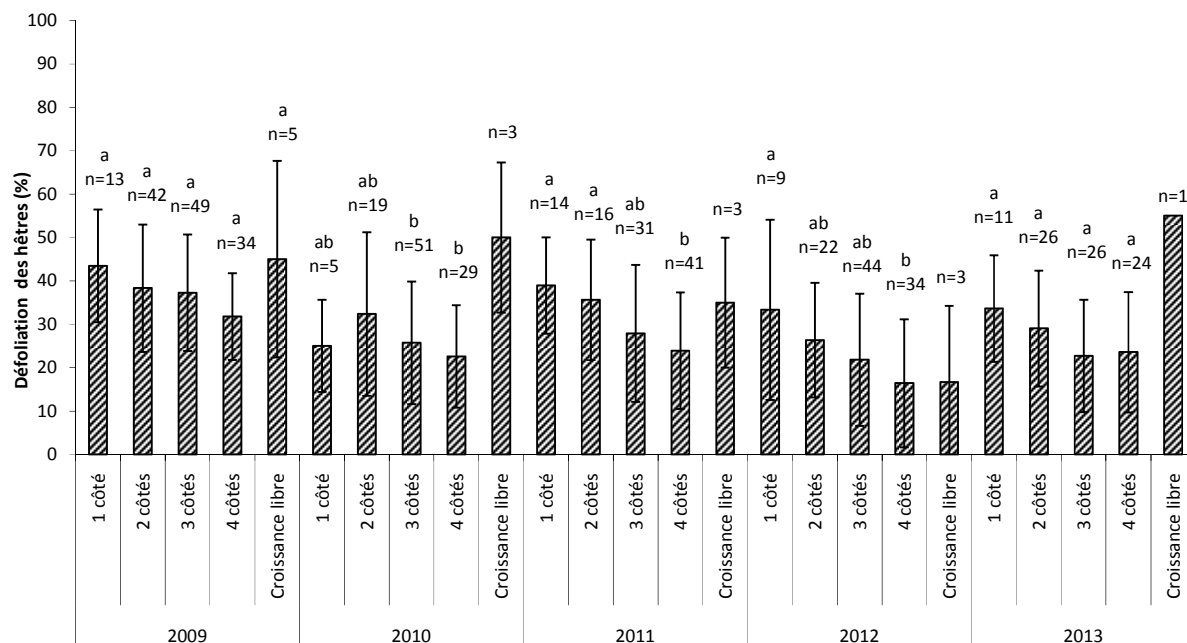


Figure 32: Evolution de la défoliation moyenne des hêtres selon l'indice de concurrence et l'année

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 au vue des observations recueillies sur le terrain. Le Tableau 13 indique qu'aucune moyenne de défoliation n'est significativement différente en fonction du pourcentage de décoloration, hormis les hêtres observés en 2009 et 2010.

Tableau 13: 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. sessiles 2013 | 2 | 61,61 | 30,80 | 0,26 | 0,7859 |

| | | | | | |
|--------------------|---|---------|---------|--------|----------------|
| 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 |

La Figure 33 et la Figure 34 illustrent la distribution des moyennes de défoliation en fonction des classes de décoloration pour les chênes et les hêtres. 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.

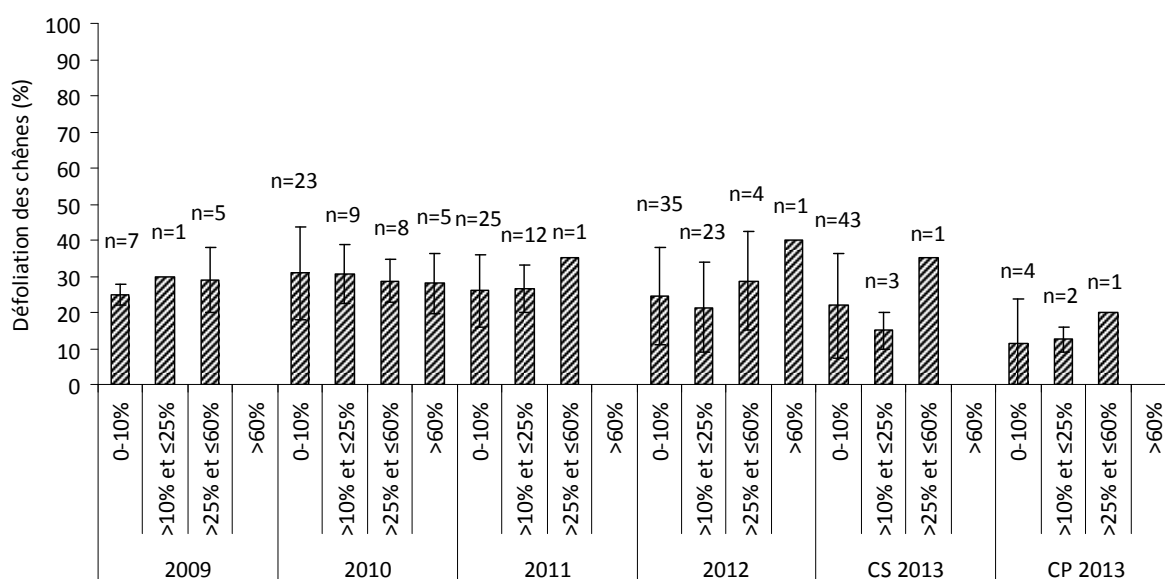


Figure 33: Evolution de la défoliation moyenne des chênes selon la classe de décoloration et l'année

De 2009 à 2011, des hêtres ayant entre 0% et 60% de leur couronne décolorée, voir 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.

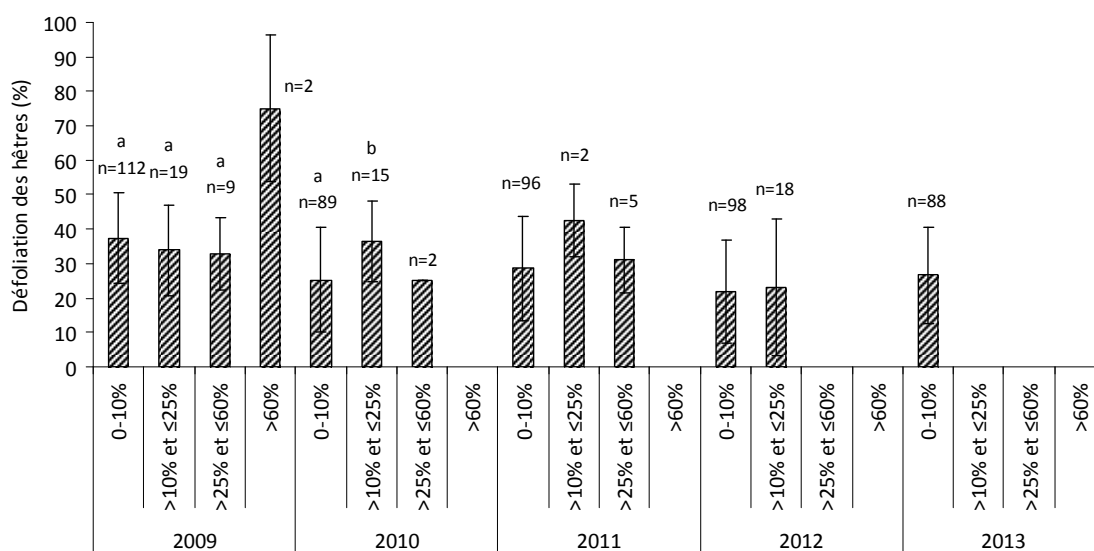


Figure 34: Evolution de la défoliation moyenne des hêtres selon la classe de décoloration et l'année

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 14). Les hêtres observés lors des campagnes de 2009, 2011 et 2013 ont des défoliations moyennes significativement différentes en fonction de l'abondance de la fructification. Rappelons que ces années sont caractérisées par de bonnes faînées.

La relation entre la défoliation et la fructification s'explique, entre autres, par le fait que les fortes faînées 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 défoliation par l'observateur (Braem, 2011).

Tableau 14: 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 | 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. sessiles 2013 | 0 | 0 | x | x | x |
| 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* |

En 2011, seuls 3 arbres sur les 42 chênes observés présentaient une fructification importante (voir Figure 35). En 2013, à l'exception de 9 chênes pédonculés l'ensemble des chênes indigènes ne portent pas ou très peu de glands.

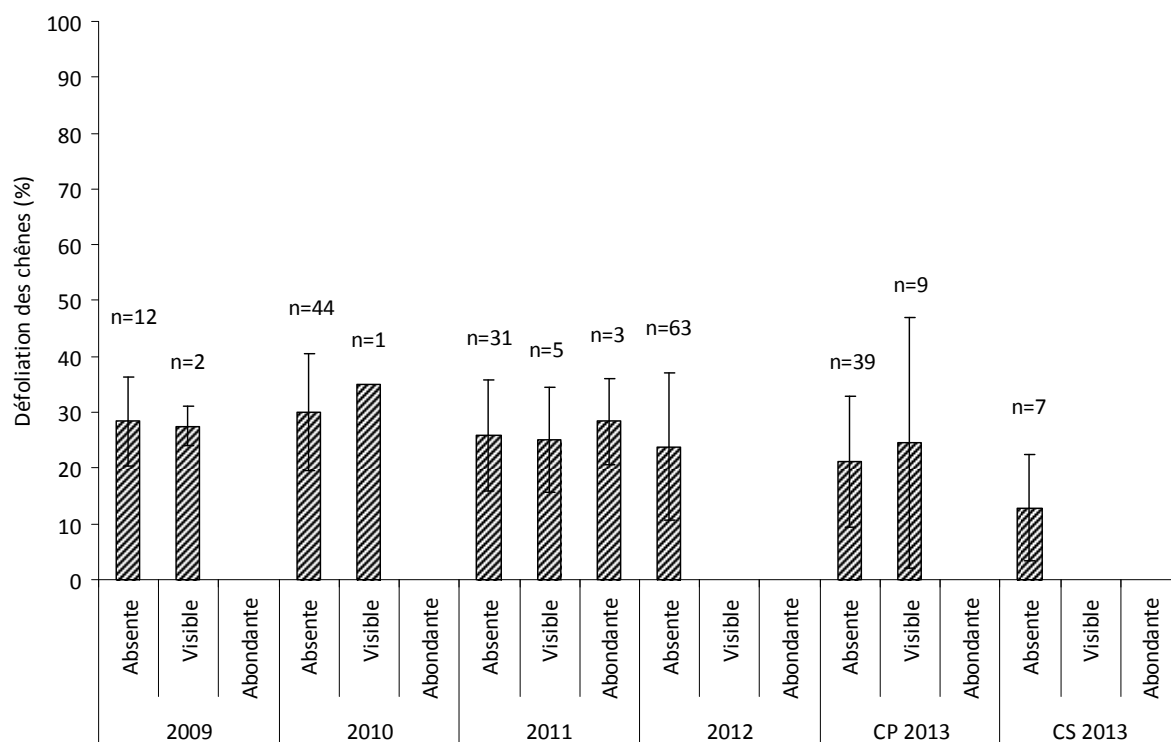


Figure 35: Evolution de la défoliation moyenne des chênes selon la fructification et l'année

A l'analyse de la Figure 36 et au vu des tests de Tukey, les arbres présentant des faînées importantes en 2009, 2011 et 2013 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.

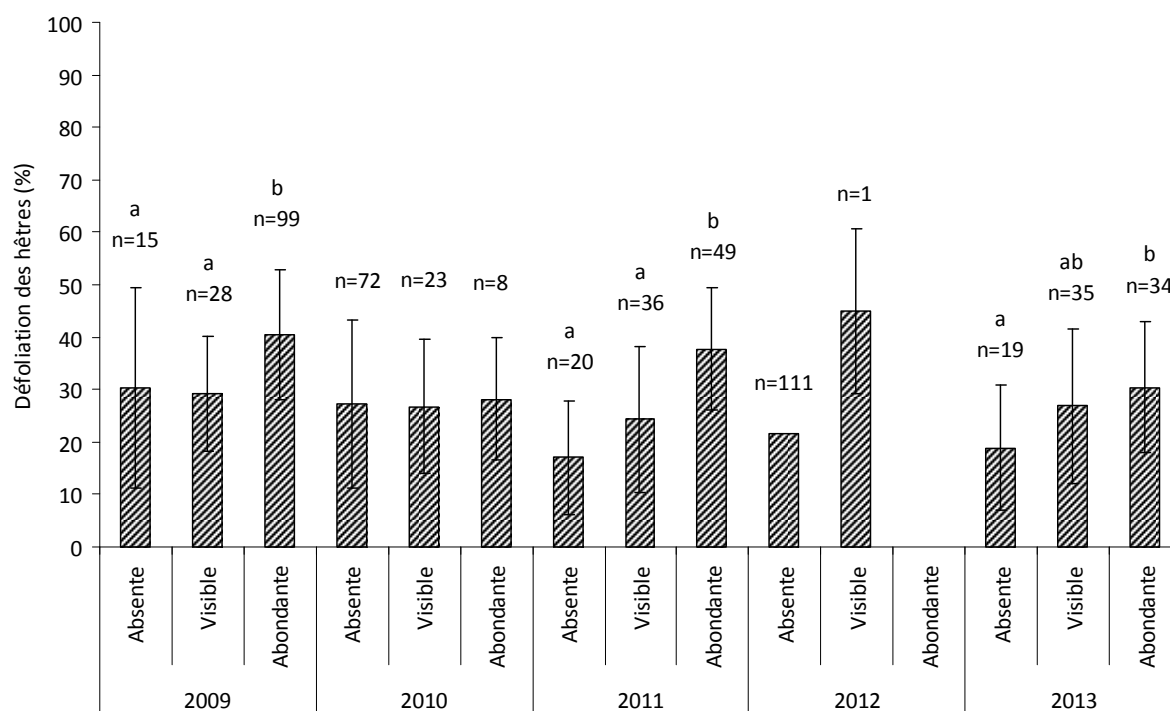


Figure 36: Evolution de la défoliation moyenne des hêtres selon la classe la fructification et l'année

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 15). 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 15: 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. sessiles 2013 | 1 | 59,52 | 59,52 | 0,6158 | 0,4682 |
| 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* |

Aussi bien pour les chênes que pour les hêtres, la défoliation augmente de manière significative en fonction du degré de simplification du houppier et ce, à chacune des campagnes. Les groupes de plus de 4 individus sont significativement différents entre eux. Selon l'année d'observation, la défoliation moyenne des chênes varie entre 12 et 18% pour les arbres ayant une ramification dense ; entre 20 et 31% pour ceux marqués par une simplification légère et entre 40 et 80% pour les chênes au houppier fortement simplifié (voir Figure 37).

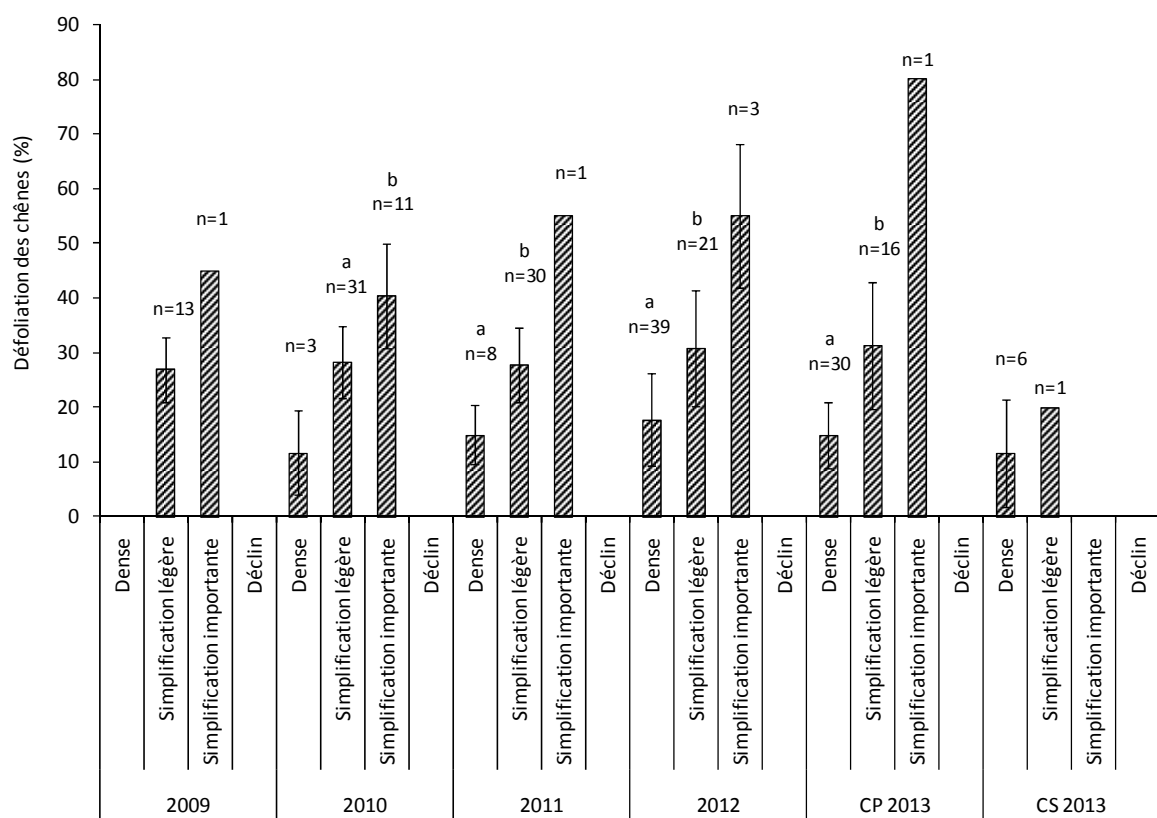


Figure 37: Evolution de la défoliation moyenne des chênes selon la classe la forme du houppier et l'année

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 varie 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 38).

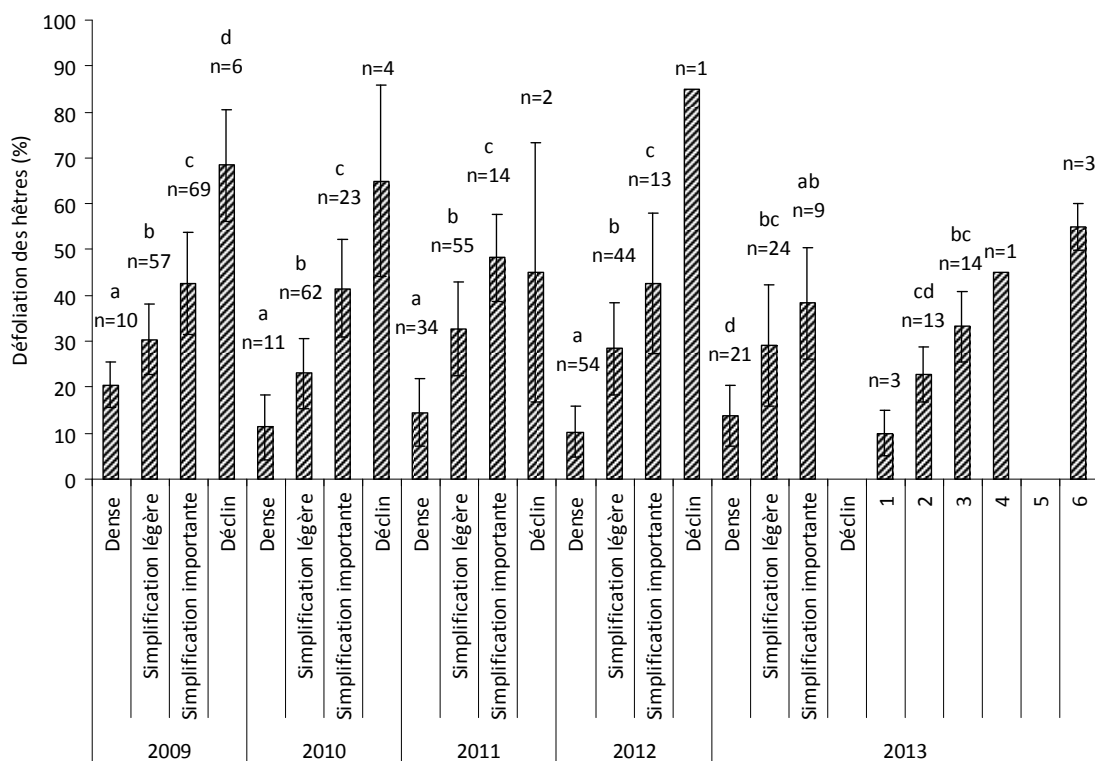


Figure 38: Evolution de la défoliation moyenne des hêtres selon la classe la forme du houppier et l'année

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 16 reprend l'ensemble des dommages observés en 2013, 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 49 chênes pédonculés, 7 chênes sessiles et 101 hêtres.

En 2013, on dénombre 65% des chênes pédonculés et 86% chênes sessiles atteints par les défoliateurs alors qu'en 2012 ce pourcentage atteignait 29% pour les chênes indigènes. 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 (*Lymantria dispar*) ou par le mildiou qui détériorent les nouvelles pousses. En 2013, la présence de mineurs a été notée sur 3 chênes pédonculés et celle du mildiou poudreux sur 3 chênes pédonculés et un chêne sessile. Un peu moins d'un quart (22%) des chênes pédonculés ont des branches de moins de 2 cm de diamètre mortes ou mourantes au sein de la cime. Ce nombre a quasi triplé depuis 2012 (8%).

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. Notons qu'un même individu peut être sujet à plusieurs symptômes. De même, le pourcentage de hêtres dont les rameaux ($\Phi < 2$ cm) sont morts ou mourants a chuté de 32 à 13% de 2012 à 2013. 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 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). Par ailleurs, la mortalité des rameaux latéraux ($\Phi < 2$ cm) des chênes indigènes a augmenté de 8 à 22%. Le suivi photographique des couronnes qui sera mis en place en 2014 permettra d'observer plus finement l'évolution de la structure 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 la troisième 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 16: Symptômes et dommages observés et proportion des arbres affectés

| Chênes pédonculés | | | | | |
|----------------------------|--|----------------------------------|----------------------|--------------------------|---|
| | Partie affectée | Symptômes | Nombre de cas | % arbres observés | |
| Feuilles | | Dévorées | 32 | 65 | |
| | | Décolorées rouge/brun | 8 | 16 | |
| | | Décolorées bronze | 1 | 2 | |
| Branches | Rameaux latéraux ($\Phi < 2$ cm) | Mortes ou mourantes | 11 | 22 | |
| | Branches ($\Phi \geq 10$ cm) | Mortes ou mourantes | 1 | 2 | |
| Tronc | Tronc sous le houppier | Collet | Blessures | 2 | 4 |
| | | | Blessures | 2 | 4 |
| | | | Pourriture | 1 | 2 |
| | Hauteur d'homme | Blessures | 1 | 2 | |
| | | Ecoulement de sève | 2 | 4 | |
| Nombre total de cas | | | 61 | | |
| Chênes sessiles | | | | | |
| | Partie affectée | Symptômes | Nombre de cas | % arbres observés | |
| Feuilles | | Dévorées | 6 | 86 | |
| | | Décolorées rouge/brun | 1 | 14 | |
| Nombre total de cas | | | 7 | | |
| Hêtres | | | | | |
| | Partie affectée | Symptômes | Nombre de cas | % arbres observés | |
| Feuilles | | Dévorées | 1 | 1 | |
| | | Mycrophyllie (feuilles nanisées) | 1 | 1 | |
| Branches | Rameaux latéraux ($\Phi < 2$ cm) | Mortes ou mourantes | 13 | 13 | |
| | Branches ($\Phi \geq 2$ et < 10 cm) | Mortes ou mourantes | 12 | 12 | |
| | Branches ($\Phi \geq 10$ cm) | Mortes ou mourantes | 2 | 2 | |
| Tronc | Tronc sous le houppier | Collet | Déformations | 1 | 1 |
| | | | Blessures | 3 | 3 |
| | | | Ecoulement de sève | 1 | 1 |
| | Totalité du tronc | Blessures | 2 | 2 | |
| | | Manifestation arthropodes | 1 | 1 | |
| | Hauteur d'homme | Blessures | 2 | 2 | |
| | | Déformations | 4 | 4 | |
| | | Blessures | 1 | 1 | |
| | Ecoulement de sève | 2 | 2 | | |
| Nombre total de cas | | | 46 | | |

6.7.2. Extension des dommages par placette

Le Tableau 17 illustre le nombre d'arbres touchés par l'attaque de défoliateurs et le pourcentage d'arbres atteints selon la placette. Il apparaît que 4 des 6 placettes en chênaie ont entre 50 et 100% des individus touchés.

Tableau 17: Proportion des arbres touchés par l'attaque de défoliateurs selon les placettes

| Placette | Typologie | Triage | Nombre d'arbres touchés | % d'arbres touchés par placette |
|----------|---------------------|------------------|-------------------------|---------------------------------|
| 4781 | Hêtraies - Chênaies | Trois -Fontaines | 5 | 100 |
| 4449 | Chênaies pures | Rouge-Cloître | 13 | 87 |
| 4529 | Chênaies pures | Rouge-Cloître | 12 | 80 |
| 3595 | Hêtraies- Chênaies | Bonniers | 2 | 50 |
| 4541 | Hêtraies pures | Coin du Balai | 1 | 10 |

Près de la moitié des arbres situés au sein de la placette 2791 et un quart des individus de la placette 4781 ont leur feuillage marqué par une décoloration rouge/brune due à l'attaque de mineurs ou de l'oïdium (voir Tableau 18).

Tableau 18: Proportion des arbres touchés par une décoloration rouge/brune des feuilles selon les placettes

| Placette | Typologie | Triage | Nombre d'arbres touchés | % d'arbres touchés par placette |
|----------|--------------------|------------------|-------------------------|---------------------------------|
| 2791 | Hêtraies- Chênaies | Saint-Hubert | 8 | 47 |
| 4781 | Hêtraies- Chênaies | Trois -Fontaines | 1 | 25 |
| 3033 | Hêtraies pures | Infante | 1 | 14 |
| 4541 | Hêtraies pures | Coin du Balai | 1 | 10 |
| 3197 | Hêtraies- Chênaies | Saint-Hubert | 1 | 9 |

La proportion d'arbres touchés par la mortalité des rameaux au sein d'une placette est variable puisqu'elle varie entre 10 et 80%.

Tableau 19: 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 |
|----------|-----------|------------------|-------------------------|---------------------------------|
| 4309 | Hêtraie | Bonne Odeur | 4 | 80 |
| 3989 | Hêtraie | Bonniers | 3 | 60 |
| 4449 | Chênaie | Rouge-Cloître | 7 | 47 |
| 3031 | Hêtraie | Infante | 2 | 29 |
| 4529 | Chênaie | Rouge-Cloître | 4 | 27 |
| 3033 | Hêtraie | Infante | 1 | 14 |
| 4618 | Hêtraie | Trois -Fontaines | 2 | 14 |
| 4541 | Hêtraie | Coin du Balai | 1 | 10 |

7. Conclusion

En 2013, 13 placettes en hêtraie visitées une année sur deux et 6 placettes en chênaie ont été observées par les adjoints forestiers de BE-IBGE. Sept chênes sessiles, 48 chênes pédonculés et 88 hêtres soit un total de 143 arbres non dominés ont été notés pour une large panoplie de critères dont la défoliation.

D'après les observations de 2013, la défoliation moyenne est de 22% ($\pm 14\%$ (\pm écart-type) pour les chênes pédonculés, 13% ($\pm 10\%$) pour les chênes sessiles et de 27% ($\pm 14\%$) pour les hêtres.

En considérant l'ensemble des campagnes, on constate que la défoliation moyenne des chênes a tendance à diminuer car celle-ci est passée de 28% à 30% de 2009 à 2010 et de 26% à 24% puis 21% de 2011 à 2013. Le 1^{er} et le 3^e quartiles de la distribution atteignent 25% et 30% en 2009 ; 25% et 35% en 2010 ; 20% et 35% en 2011 ; 15% et 30% en 2012 et 10% et 25% en 2013. De manière générale, la variabilité des niveaux de défoliation a augmenté de 2009 à 2011 et se stabilise depuis. Par ailleurs, les moyennes de défoliation sont significativement différentes entre 2010 et 2013. La défoliation moyenne des hêtres diminue de 37% à 27% de 2009 à 2010 et de 29% à 22% de 2011 à 2012 pour atteindre 27% en 2013. La distribution des valeurs est plus large comparativement à celle des chênes. En effet, le 1^{er} et le 3^e quartiles, qui mesurent la dispersion des données autour de la médiane, atteignent 27% et 45% en 2009 ; 15% et 35% en 2010 ; 15% et 40% en 2011 ; 10% et 30% en 2012 et 15 et 35% en 2013. Statistiquement la moyenne de 2009 est significativement différente des autres années. Il en est de même entre la moyenne de 2012 et celle de 2011. Rappelons que les séries d'arbres observés les années paires et impaires sont différentes.

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 et 2013. Il apparaît qu'individuellement, la variation interannuelle de la défoliation des chênes indigènes est importante car elle oscille entre 0 et $\pm 25\%$. 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 58 hêtres est de 36% en 2009 ; 33% en 2011 et 29% en 2013 ; ces valeurs s'inscrivent également dans la même gamme que celles calculées pour l'ensemble des hêtres. Par ailleurs, tout comme pour l'échantillon total, le déficit foliaire moyen de l'échantillon commun de 2009 est significativement différent de celui de 2013.

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. En 2009, 2011 et 2013, la proportion de hêtres ayant une fructification abondante diminue de 70% à 46% et 37%. 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. En 2013, ce niveau a atteint 64% pour les chênes pédonculés soit 30 individus et 86% pour les chênes sessiles soit 6 arbres. Les années précédentes la forme du houppier des hêtres était notée de manière similaire à celle du chêne selon 4 classes. En 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, 42% des hêtres sont caractérisés par une ramification dense du houppier. En conclusion,

la structure des chênes indigènes et des hêtres s'améliore nettement depuis 2009. La présence de pousses éplicormiques est plus généralement observée chez les chênes et ceci de manière constante puisque depuis 2009, la proportion de chênes sans gourmands avoisine les 50%. Depuis 2009, les chênes sont plus largement soumis à la décoloration que les hêtres. Cette année, la majorité des chênes pédonculés (91%) et sessiles (57%) ont entre 0 et 10% de leur feuillage décoloré. Les chênes indigènes n'ont jamais été aussi peu touchés par la décoloration depuis 2009. De plus en 2013, aucun chêne indigène décoloré à plus de 60% n'a été observé. Pour les hêtres, la tendance est identique puisque la totalité 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, on dénombre 65% des chênes pédonculés et 86% chênes sessiles atteints par les défoliateurs alors qu'en 2012 ce pourcentage atteignait 29% pour les chênes indigènes. Par ailleurs, le pourcentage de hêtres dont les rameaux latéraux ($\Phi < 2$ cm) sont morts ou mourants a chuté de 32 à 13% de 2012 à 2013. Par contre, la mortalité des rameaux latéraux des chênes indigènes a augmenté de 8 à 22%. 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. Le suivi photographique des couronnes permettra d'observer plus finement l'évolution de la structure des hêtres et chênes afin d'en préciser les causes possibles.

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 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 et 2013 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.

Finalement, lors d'une prochaine campagne, il sera intéressant de mettre en œuvre un suivi photographique des houppiers permettant (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., Vanwijssberghe 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, Vinck, 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.