

Université catholique  
de Louvain



Bruxelles-Environnement  
BE-IBGE



Earth and Life Institute  
Environmental  
Sciences



# Suivi de l'état sanitaire en forêt de Soignes bruxelloise 2012

**Réalisation** Ir. Alexandra Delente  
**Technicien** Frédéric Hardy  
**Promoteur** Prof. Q. Ponette  
**Appui scientifique** Dr. Mathieu Jonard

*Novembre 2012*

# Convention UCL – Bruxelles Environnement 2012

## Fiche descriptive

### 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

Depuis 2009, le Région bruxelloise réalise annuellement le suivi de l'état sanitaire de la forêt de Soignes bruxelloise. Ce système d'observation a pour but d'évaluer dans le temps et dans l'espace la vitalité des essences principales qui composent la forêt de Soignes, à savoir, le hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et les chênes indigènes (*Quercus robur* L. et *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). Cette année 2012 s'est déroulée la quatrième campagne, qui a permis de dégager certaines tendances quant à l'état de santé de la forêt depuis 2009.

Le protocole d'observation se réfère à celui mis au point dans le cadre du programme international concerté sur les forêts (*ICP Forests*). Les évaluations sont réalisées à différents niveaux puisqu'elles se rapportent aux conditions d'observation (statut social, concurrence, etc.), à l'état de santé du houppier (défoliation, fructification, décoloration, etc.) et aux dommages et symptômes visibles affectant l'arbre. Un intérêt tout particulier est porté à l'évaluation et à l'évolution de la défoliation dans le temps puisque ce critère intégrateur reflète l'impact des conditions stationnelles, climatiques, individuelles et des épisodes de stress.

La campagne 2012 a été réalisée par les agents forestiers de BE-IBGE entre le 16 juillet et le 18 août 2012 sur 21 placettes dont 6 en chênaie et 15 en hêtraie. Au total, 206 arbres (66 chênes et 140 hêtres) ont été observés pour au moins un critère et la défoliation a pu être notée pour 64 chênes et 122 hêtres. En 2012, la défoliation moyenne est de 24% pour les chênes et de 20% pour les hêtres. De plus, on remarque que 50% des effectifs en chênes, centrés sur la médiane, ont des valeurs de défoliation comprises entre 15 et 32% alors que la moitié des hêtres ont des valeurs de défoliation variant entre 5 et 30% (Q1-Q3). En conclusion, les degrés de défoliation sont plus variables pour les hêtres. Aussi bien pour les chênes que pour les hêtres, aucune fructification n'a été observée en 2012. Par contre, la structure des houppiers est en constante amélioration depuis 2009. La proportion d'arbres ayant une ramification dense s'élève à 63% pour les chênes et à 54% pour les hêtres. Par ailleurs, la présence de pousses épiscopiques est plus généralement observée chez les chênes. En 2012, 19% des chênes possèdent un volume abondant et 32% un volume moyen de gourmands. Pour les hêtres, 8% présentent de nombreux gourmands et 89% n'ont rien développé.

Concernant la décoloration, la proportion de chênes ayant entre 10 et 60% de leur feuillage décoloré est passée de 32% à 42% de 2011 à 2012. Pour les hêtres, cette même classe de décoloration a augmenté ses effectifs de 10% (de 6 à 16%) entre 2011 et 2012.

Concernant les proportions d'arbres présentant des dommages par rapport à l'ensemble des arbres évalués, on note 38% de chênes et 11% de hêtres atteints par différents types de décoloration. On compte également 29% des chênes touchés par les défoliateurs contre 4% pour les hêtres.

En considérant l'ensemble des arbres inclus dans les suivis de 2009 à 2012, on constate que la défoliation moyenne des chênes est passée de 28% à 31% de 2009 à 2010 et de 26% à 24% de 2011 à 2012. De manière générale, la variabilité des niveaux de défoliation a augmenté avec le temps. Par ailleurs, les moyennes de défoliations sont significativement différentes entre 2010 et 2012. Cette amélioration de l'état de santé s'observe également pour les hêtres car les défoliations moyennes ont diminué de 37% à 26% de 2009 à 2010 et de 28% à 20% de 2011 à 2012. Par contre, la distribution des valeurs est plus large comparativement à celle des chênes. Statistiquement, les moyennes de 2010 et 2011 sont toutes deux significativement différentes à celles de 2009 et 2012.

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.). Près de 19% de la variabilité de la défoliation du hêtre s'explique par la circonférence du tronc. Les coefficients  $R^2$  révèlent également que selon les années entre 14 et 24% de la variabilité de la défoliation est expliquée par le statut social du hêtre. En 2009 et 2011, la défoliation moyenne des hêtres étaient significativement plus élevée pour les arbres présentant une fênaie importante.

**Date de fin** : Septembre 2012.

## Table des matières

<b>RESUME.....</b>	<b>2</b>
<b>TABLE DES MATIERES.....</b>	<b>4</b>
<b>TABLE DES FIGURES .....</b>	<b>6</b>
<b>1. CONTEXTE .....</b>	<b>8</b>
<b>2. OBJECTIFS.....</b>	<b>8</b>
<b>3. DESCRIPTION DE LA FORET DE SOIGNES.....</b>	<b>9</b>
3.1. Composition spécifique .....	9
3.2. Sols.....	10
3.3. Climat .....	11
3.4. Pollution atmosphérique.....	12
<b>4. ETAT SANITAIRE ET DEPERISSEMENT.....</b>	<b>13</b>
<b>5. MISE EN PLACE DE LA CAMPAGNE DU SUIVI SANITAIRE DE 2012 .....</b>	<b>13</b>
5.1. Plan d'échantillonnage .....	13
5.2. Protocole d'évaluation .....	17
5.3. Caractéristiques des arbres observés .....	17
5.3.1. Effectifs et distribution des arbres en classes de grosseurs.....	17
5.3.2. Concurrence – Indice d'ombrage .....	18
5.3.3. Statut social .....	19
5.3.4. Visibilité .....	20
5.4. Encodage et traitement des données .....	21
5.5. Contrôle-qualité .....	21
<b>6. RESULTATS.....</b>	<b>24</b>
6.1. Défoliation .....	25
6.1.1. La défoliation, indicateur de vitalité des arbres.....	25
6.1.2. Défoliation moyenne des arbres de la campagne 2012 .....	25
6.1.3. Evolution de la défoliation moyenne de 2009 à 2012.....	30
6.2. Fructification .....	36
6.3. Structure de la couronne .....	36

<b>6.4. Pousses épïcormiques .....</b>	<b>38</b>
<b>6.5. Décoloration des feuilles .....</b>	<b>38</b>
<b>6.6. Relations entre la défoliation et d'autres variables .....</b>	<b>39</b>
6.6.1. Analyses statistiques .....	39
6.6.2. Défoliation et circonférence .....	40
6.6.3. Défoliation et grosseur relative reflet du statut social .....	41
6.6.4. Défoliation et concurrence .....	43
6.6.5. Défoliation et décoloration .....	45
6.6.6. Défoliation et fructification .....	46
6.6.7. Défoliation et forme du houppier .....	48
<b>6.7. Dommages et symptômes .....</b>	<b>50</b>
6.7.1. Distribution des dommages .....	50
6.7.2. Extension des dommages par placettes .....	53
6.7.3. Dégâts du tronc .....	53
<b>7. CONCLUSION .....</b>	<b>54</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>56</b>

## Table des figures

Figure 1: Proportion des types de peuplements en forêt de Soignes bruxelloise (Braem <i>et al.</i> , 2010) .....	9
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).....	10
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).....	11
Figure 4: Climatogramme de la station météorologique d'Uccle, 1961-1990 (IRM, 2011). .....	11
Figure 5 : Localisation des placettes des sous-échantillons - années paires.....	15
Figure 6 : Localisation des placettes des sous-échantillons - années impaires.....	16
Figure 7 : Distribution des hêtres observés selon les classes de circonférence.....	18
Figure 8 : Distribution des chênes observés selon les classes de circonférence.....	18
Figure 9 : Distribution des arbres observés selon le degré de concurrence (2012).....	19
Figure 10 : Proportion des statuts sociaux en fonction des essences (2012) .....	20
Figure 11 : Distribution des arbres en fonction de la visibilité et de l'essence (2012).....	21
Figure 12 : Test apparié portant sur les écarts de cotation des chênes indigènes .....	23
Figure 13 : Test apparié portant sur les écarts de cotation des hêtres.....	23
Figure 14 : Comparaison des observations de défoliation 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).....	24
Figure 15 : Légende d'un boxplot.....	25
Figure 16: boxplot de la défoliation de l'ensemble des chênes (n=64) et hêtres (n=122).....	26
Figure 17 : Distribution des arbres selon les classes de défoliation (2012) .....	27
Figure 18: Boxplot de la défoliation des arbres visibles en fonction de l'essence (chênes : n=53 ; hêtres : n=101) .....	28
Figure 19 : Distribution des valeurs de défoliation des chênes de 2009 à 2012.....	31
Figure 20 : Distribution des valeurs de défoliation des hêtres de 2009 à 2012.....	32
Figure 21 : Evolution de la défoliation d'un même échantillon de chênes entre 2009, 2010 et 2012 .....	34
Figure 22 : Evolution de la défoliation d'un même échantillonnage de hêtres entre 2009, 2010 et 2012.....	35
Figure 23 : Evolution du degré de fructification de 2009 à 2012 pour les chênes et les hêtres .....	36
Figure 24 : Les quatre formes de houppier du hêtre, avec leurs codes (Eichhorn <i>et al.</i> , 2006) .....	37
Figure 25 : Les quatre formes de houppier des chênes, avec leurs codes (Eichhorn <i>et al.</i> , 2006) .....	37
Figure 26 : Distribution des arbres selon la structure de la couronne.....	37
Figure 27 : Distribution des arbres selon l'abondance des pousses épïcormiques.....	38
Figure 28 : Distribution des arbres selon le pourcentage de décoloration du feuillage .....	39
Figure 29 : Régression linéaire de la défoliation des chênes en 2012 en fonction de la circonférence .....	41
Figure 30 : Régression linéaire entre la défoliation des hêtres en 2012 et la circonférence.....	41
Figure 31 : Régression linéaire entre la défoliation des chênes et la circonférence relative pour les différentes années de suivi.....	42
Figure 32 : Régression linéaire entre la défoliation des hêtres et la circonférence relative pour les différentes années de suivi.....	43
Figure 33 : Distribution des moyennes de défoliation du chêne en fonction des indices d'ombrage.....	44
Figure 34 : Distribution des moyennes de défoliation du hêtre en fonction des indices d'ombrage .....	45
Figure 35 : Distribution des moyennes de défoliation du chêne en fonction de la décoloration.....	46
Figure 36 : Distribution de la défoliation du hêtre en fonction de la décoloration .....	46
Figure 37 : Distribution des moyennes de défoliation du chêne en fonction de la fructification du houppier observable.....	47
Figure 38 : Distribution des moyennes de défoliation du hêtre en fonction de la fructification du houppier observable.....	48
Figure 39 : Pourcentage de défoliation moyen selon la forme du houppier et l'année pour les chênes .....	49
Figure 40 : Pourcentage de défoliation moyen selon la forme du houppier et l'année pour le hêtre .....	50
Figure 41: Proportion des dommages observés chez les chênes en 2012.....	50
Figure 42 : Proportion des dommages observés chez les hêtres en 2012 .....	51

## 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) .....	12
Tableau 2 : Evolution de la concentration moyenne de NO <sub>2</sub> en µg/m <sup>3</sup> mesurée à la station d'Uccle. Source : IRCEL-CELINE, 2012 .....	12
Tableau 3 : Caractéristiques et exemples de facteurs de dépérissement. ....	13
Tableau 4. Placettes des sous-échantillons. Les numéros correspondent aux identifiants des placettes.....	14
Tableau 5: Effectifs (placettes, arbres) observés lors des campagnes de 2009 à 2012 .....	17
Tableau 6: Effectifs d'arbres observés durant la campagne 2012 .....	17
Tableau 7 : Moyenne des écarts de défoliation par essence observée en 2012 et résultats des tests t de Student .....	22
Tableau 8: Moyenne et écarts-types des défoliations et des circonférences par essence et par placette (2012)	29
Tableau 9 : Moyenne de défoliation par année et essence .....	33
Tableau 10 : Corrélation entre la circonférence et la défoliation en fonction de l'essence et de l'année .....	40
Tableau 11 : Coefficients de corrélation entre la défoliation et circonférence relative .....	42
Tableau 12 : Résultats des ANOVA testant l'impact de l'indice d'ombrage sur la défoliation .....	43
Tableau 13 : Résultats des ANOVA testant l'impact de la décoloration sur la défoliation .....	45
Tableau 14 : Résultats des ANOVA testant l'effet de la fructification dans le houppier observable sur la défoliation .....	47
Tableau 15 : Résultats des ANOVA testant l'effet de la forme du houppier sur le pourcentage de défoliation ..	49
Tableau 16 : Symptômes et dommages observés et proportion des arbres affectés.....	52
Tableau 17 : Proportion des arbres touchés par la décoloration des feuilles en fonction des placettes .....	53
Tableau 18 : Proportion des arbres touchés par l'attaque de défoliateurs en fonction des placettes.....	53

## 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 ».

Le dépérissement du hêtre que l'on observe en forêt de Soignes n'est autre qu'un processus faisant intervenir de multiples causes qui agissent en synergie. 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 due aux exploitations forestières, développement de loisirs, etc. Par ailleurs, 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 vulnérable aux changements climatiques. Les impacts attendus sur les écosystèmes forestiers sont les suivants : (i) une augmentation de la température et de la concentration en CO<sub>2</sub> combinée à un allongement de la période de végétation. Ces phénomènes occasionnent 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 provoque des stress hydriques puis des dépérissements ; (iii) une augmentation de la pluviosité en période hivernale susceptible de provoquer des engorgements et des inondations ; (iv) une augmentation de la fréquence d'événements climatiques extrêmes occasionnant des chablis, des dégâts de gelées hors saison,... (v) une modification des relations hôtes/parasites et l'apparition de nouveaux parasites qui provoquent des problèmes sanitaires et finalement (vi) une perturbation de la biodiversité (Laurent *et al.*, 2009).

Dans le but d'évaluer l'état de vitalité actuel de la forêt mais aussi son évolution au fil des années, la Région bruxelloise s'est dotée d'un système de suivi sanitaire. Les peuplements, purs ou mélangés, des essences majoritaires qui présentent un intérêt économique 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 et, d'autre part, d'analyser son évolution depuis 2009 et d'en dégager d'éventuelles tendances. Pour la campagne 2012, les observateurs ont sollicité une formation de terrain axée principalement sur l'estimation de la défoliation et une présentation des résultats à l'issue de la campagne.

### 3. Description de la forêt de Soignes

#### 3.1. Composition spécifique

La forêt de Soignes située en Région bruxelloise s'étend sur 1657 ha (Gryseels *et al.*, 2006) soit 38% de la superficie totale. Les peuplements de hêtraies pures recouvrent 64,1% et on compte 2/3 de la superficie de la forêt occupée par la « hêtraies cathédrales » (Daise, 2011). 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. Parmi les 16,4% restant, 5% sont des résineux et 11,4% sont composés de divers peuplements.

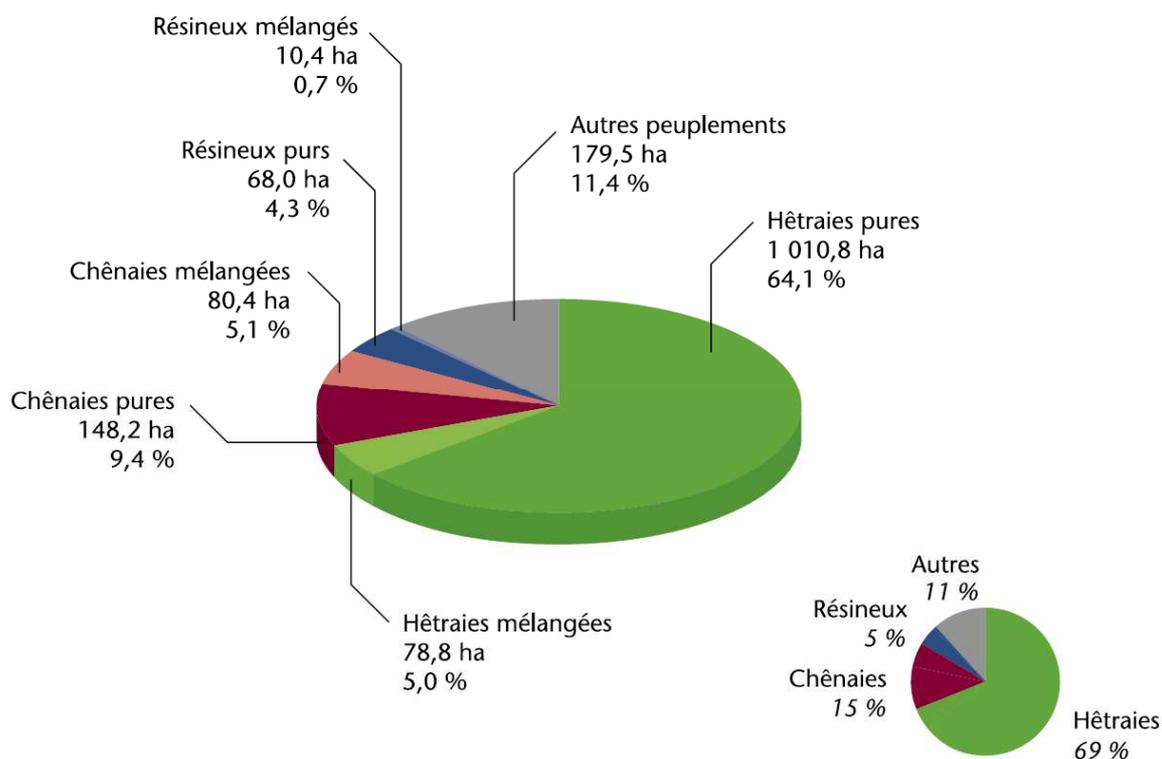
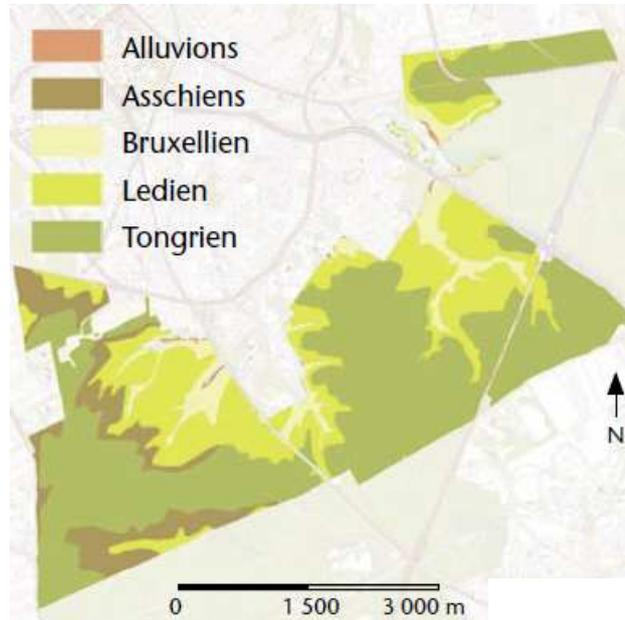


Figure 1: Proportion des types de peuplements en forêt de Soignes bruxelloise (Braem *et al.*, 2010)

### 3.2. Sols

Le sous-sol sonien est constitué pour un tiers de la surface de sable (*bruxellien* et *lédien*) et par deux tiers d'argile (*asschien* et *tongrien*) (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.

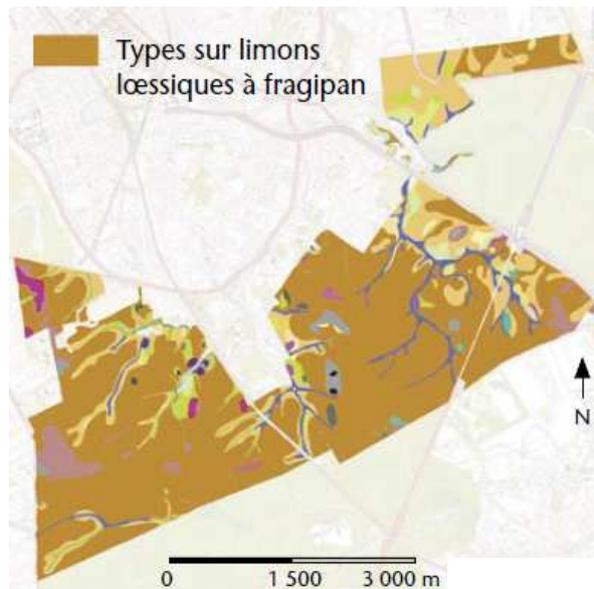


Figure 3: Les sols de la Forêt de Soignes sont dominés par le type Abc interprété comme étant un sol limoneux à fragipan (source: cartes des sols de Belgique; numérisation BE-IBGE)

### 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.

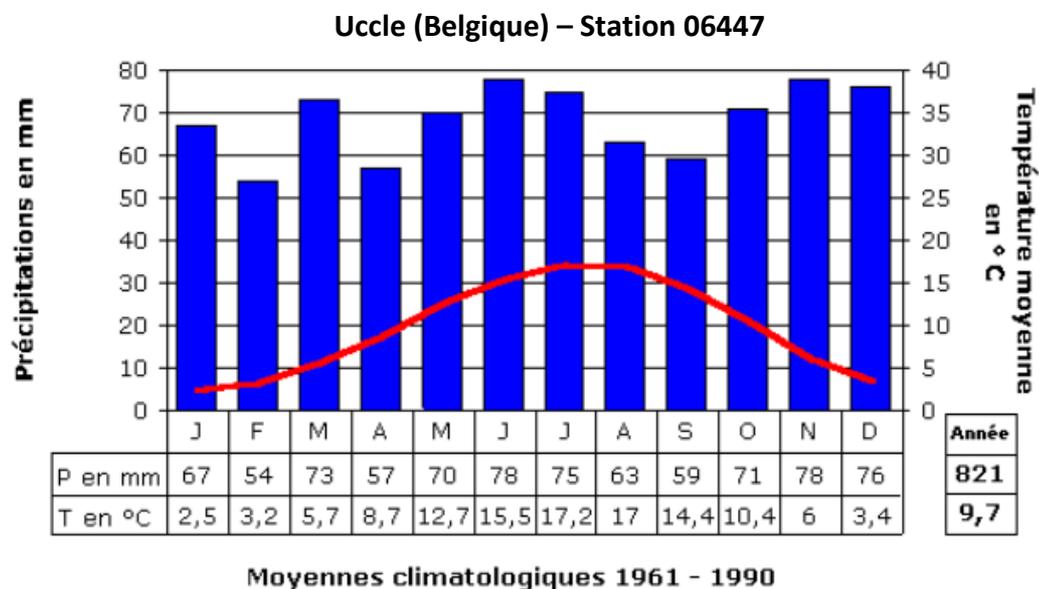


Figure 4: Climatogramme de la station météorologique d'Uccle, 1961-1990 (IRM, 2011).

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 d'avril, juin et juillet 2012 ont doublé alors qu'en août 2012 les précipitations totales ont été très anormalement faibles (<http://www.meteo.be/meteo/view/fr/6042923-Climat+actuel+en+Belgique.html>, 2012). En revanche, les températures moyennes et la durée d'ensoleillement s'inscrivent dans les normales saisonnières.

**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)	T moy (°C)	Ensoleillement (h)
Avril 2012	<b>104,1</b>	8,4	113
Normale mensuelle	51,3	9,8	159
Mai 2012	63,4	14,3	190
Normale mensuelle	66,5	13,6	191
Juin 2012	<b>133</b>	15,4	147
Normale mensuelle	71,8	16,2	188
Juillet 2012	<b>116</b>	17,3	173
Normale mensuelle	73,5	18,4	201
Août 2012	<b>22,5</b>	19,2	189
Normale mensuelle	79,3	18	190

### 3.4. Pollution atmosphérique

Les écosystèmes peuvent être endommagés par (i) les dépôts de substances acidifiantes – oxyde d'azote, dioxyde de soufre et ammoniac qui entraînent la disparition d'espèces végétales et animales ; (ii) l'excès d'azote nutritif, sous forme d'ammoniac et d'oxydes d'azote, qui peut perturber les communautés végétales et s'infiltrer dans les eaux douces, causant dans les deux cas une perte de diversité biologique par eutrophisation ; et (iii) l'ozone troposphérique, qui cause des détériorations physiques et ralentit la croissance des cultures, des forêts et des plantes (Commission des Communautés Européennes, 2005 ; Garrec *et al.*, 1989).

Les principaux composés responsables de l'acidification sont les acides nitrique (HNO<sub>3</sub>) et sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), résultant de la transformation des composés soufrés (surtout SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub> et H<sub>2</sub>S) et azotés (surtout NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) dans l'air. Cette acidification du milieu s'opère par deux voies : d'une part, les retombées humides, sous forme de pluie, neige et brouillards ; d'autre part, les retombées sèches sous forme de gaz et de poussières. (AWAC-ISSeP, 2010)

Au travers de la directive cadre 96/62 régissant l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air, des normes sont proposés pour 13 polluants (valeurs limites et une série de seuils d'alarme). Dans cette optique, la directive 1999/30/CE impose, depuis le 01/01/2010, que les concentrations moyennes annuelles de NO<sub>2</sub> ne dépassent pas le seuil de 40 µg/m<sup>3</sup>.

A titre d'exemple, voici l'évolution de la concentration moyenne (µg/m<sup>3</sup>) d'un des polluants responsable de l'acidification des milieux. Les valeurs présentées au Tableau 2 sont issues de la station située à Uccle.

**Tableau 2 : Evolution de la concentration moyenne de NO<sub>2</sub> en µg/m<sup>3</sup> mesurée à la station d'Uccle. Source : IRCEL-CELINE, 2012**

Année	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
41R012	37	37	36	28	30	27	30	26	29	28	27	30	29	27	28	28	26	26

## 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 3).

Tableau 3 : Caractéristiques et exemples de facteurs de dépérissement.

	<b>Fact. prédisposants</b>	<b>Fact. déclenchants</b>	<b>Fact. aggravants</b>
<b>Caractéristiques</b>	- Stress permanent - Baisse relative de la productivité - Détermine le degré de résistance	- Brusques et intenses - Aggravés par des facteurs prédisposants existants.	- Amplification des facteurs déclenchants - Stade final du dépérissement - Mort de l'arbre
<b>Exemples</b>	- Conditions stationnelles (sol, altitude, régime hydrique,...)	- Attaque de défoliateurs ou de pathogènes foliaires (oïdium)	- Ravageurs (insectes, pourritures, virus, nématodes, etc.)
	- Génétique	- Gel	- Incendies
	- Climat	- Sécheresse	- Tornades
	- Age élevé	- Pic de pollution	
	- Interventions sylvicoles (travaux et coupes) - Pollution atmosphérique	- Tempête	

## 5. Mise en place de la campagne du suivi sanitaire de 2012

Les activités suivantes ont été réalisées en 2012 :

- (i) Le suivi de l'état sanitaire de 21 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 22 juin 2012
  - b. La revisite de 8 placettes du suivi sanitaire par l'UCL
- (iii) Le traitement des données relatives à l'état sanitaire recueillies en 2012

### 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 (CDAF<sup>1</sup>) en 2006. Elles 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

<sup>1</sup> Centre de Développement Agro-Forestier (Chimay).

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 (voir Figure 6 et Figure 7). Ces deux sous-échantillons comportent chacun une quinzaine de placettes et sont visités alternativement d'une année à l'autre (Tableau 4).

La placette n°5101, située en hêtraie et observée en 2010, a été remplacée en 2012 par la placette n°5022 suite à une mise à blanc. La placette de remplacement n°5022 est située à 300 m de la première dans un îlot de vieillissement.

**Tableau 4. Placettes des sous-échantillons. Les numéros correspondent aux identifiants des placettes**

	<b>Années paires (15 placettes)</b>	<b>Années impaires (13 placettes)</b>
<b>Placettes en hêtraie</b>	2877, 2879, 3509, 3511, 3831, 4145, 4147, 4151, 4458, 4467, 4469, 4778, 4783, 4785, 5022	3031, 3033, 3345, 3349, 3669, 3671, 3989, 4307, 4309, 4618, 4625, 4928, 4947
<b>Placettes en chênaie</b>	2791, 3197, 3595, 4449, 4529, 4781 (6 placettes)	

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. 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. Le renforcement des effectifs en chênaie permet d'obtenir un échantillon représentatif de la forêt de Soignes.

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 2012, la campagne d'observation a été coordonnée par MM. Bram Aertsen et Bart Swerts désignés correspondants-observateurs parmi les adjoints forestiers en 2011.



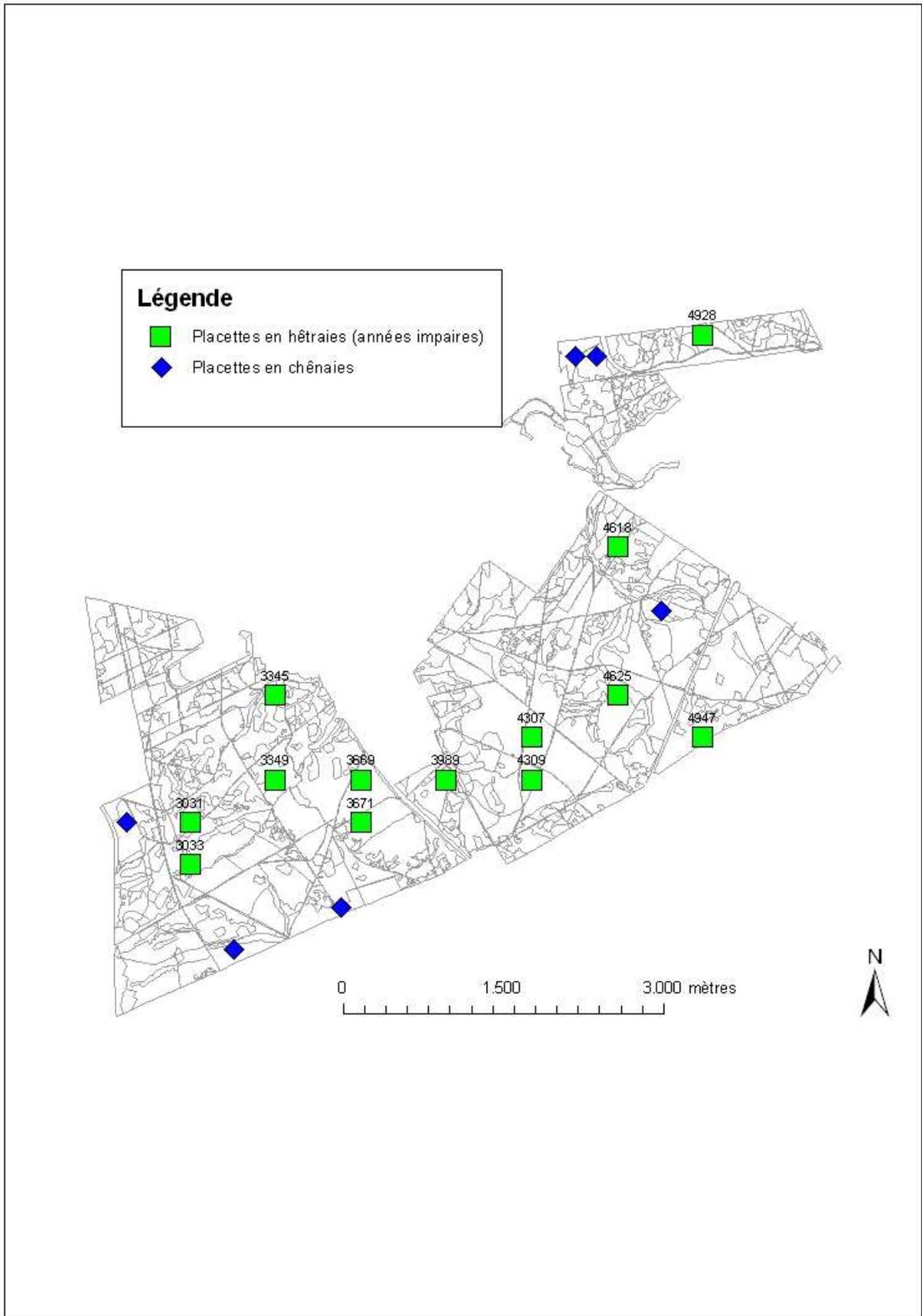


Figure 6 : Localisation des placettes des sous-échantillons - années impaires

## 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 (*JCP 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 annotées 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 dans la « couronne observable » c'est-à-dire, la partie du houppier non concurrencée par les arbres voisins. Les dommages sont, quant à eux, estimés sur les différentes parties de l'arbre (houppier, tronc, collet).

## 5.3. Caractéristiques des arbres observés

### 5.3.1. Effectifs et distribution des arbres en classes de grosseurs

Les effectifs de 2012 sont supérieurs à 2010 et 2011, ce qui assure une bonne représentativité de l'échantillonnage au niveau de la forêt de Soignes et augmente la confiance à accorder aux résultats statistiques. Le Tableau 5 suivant reprend le nombre de placettes observées depuis 2009 jusqu'en 2012, ainsi que le nombre d'arbres par essence pour chacune des campagnes d'observation.

Tableau 5: Effectifs (placettes, arbres) observés lors des campagnes de 2009 à 2012

	2009	2010	2011	2012
<b>Nombre de placettes</b>	34	21	19	21
<b>Nombre de chênes</b>	20	49	42	66
<b>Nombre de hêtres</b>	200	141	111	140
<b>Total</b>	<b>220</b>	<b>190</b>	<b>153</b>	<b>206</b>

Durant la campagne 2012, 21 placettes ont été visitées (6 en chênaie et 15 en hêtraie) contre 19 placettes en 2011 (6 en chênaie et 13 en hêtraie). Au total, 140 hêtres et 66 chênes indigènes ont été observés en 2012 soit un total de 206 arbres (voir Tableau 6). Parmi les 20 arbres dont la défoliation n'a pas été estimée, on compte 14 hêtres non évaluables pour cause de non-visibilité ainsi que 4 hêtres et 2 chênes qui sont soit morts, ou à l'état de souche, soit détériorés (perte de la cime observable).

Tableau 6: Effectifs d'arbres observés durant la campagne 2012

	Hêtres	Chênes indigènes non identifiés	Chênes pédonculés	Chênes sessiles
<b>Défoliation notée</b>	122	34	24	6
<b>Défoliation non notée</b>	18	2	0	0
<b>Total</b>	<b>140</b>	<b>36</b>	<b>24</b>	<b>6</b>

Environ 86% des hêtres sont représentés en effectifs équilibrés dans les différentes classes de circonférence variant de 80 cm à 240 cm de circonférence ; les effectifs diminuent au-delà de 240 cm de circonférence (voir Figure 7).

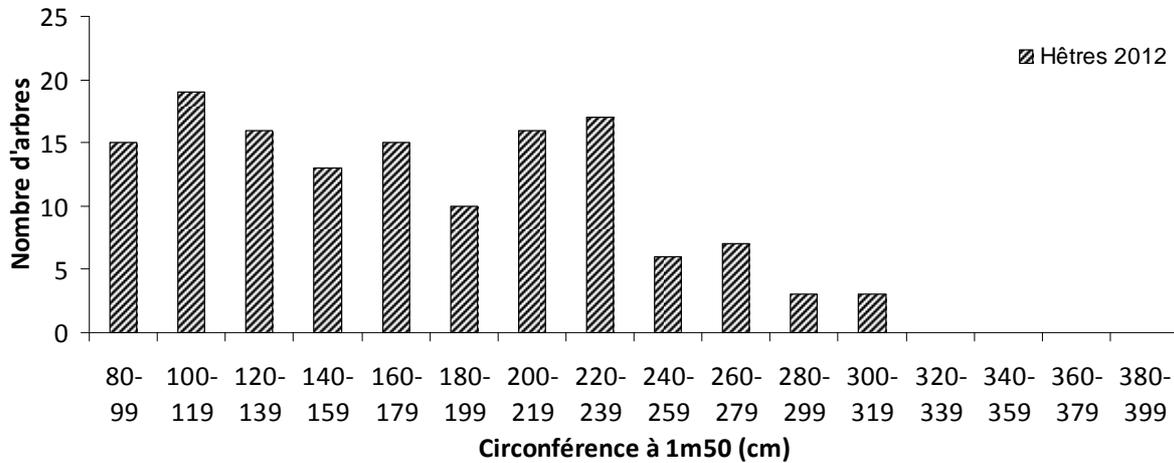


Figure 7 : Distribution des hêtres observés selon les classes de circonférence

Le nombre de chênes décroît selon une allure proche d'une exponentielle avec la circonférence (voir Figure 8). Environ 71 % des chênes observés ont une circonférence comprise entre 80 et 139 cm. L'effectif maximum comporte 20 chênes indigènes ayant une circonférence entre 100 et 119 cm.

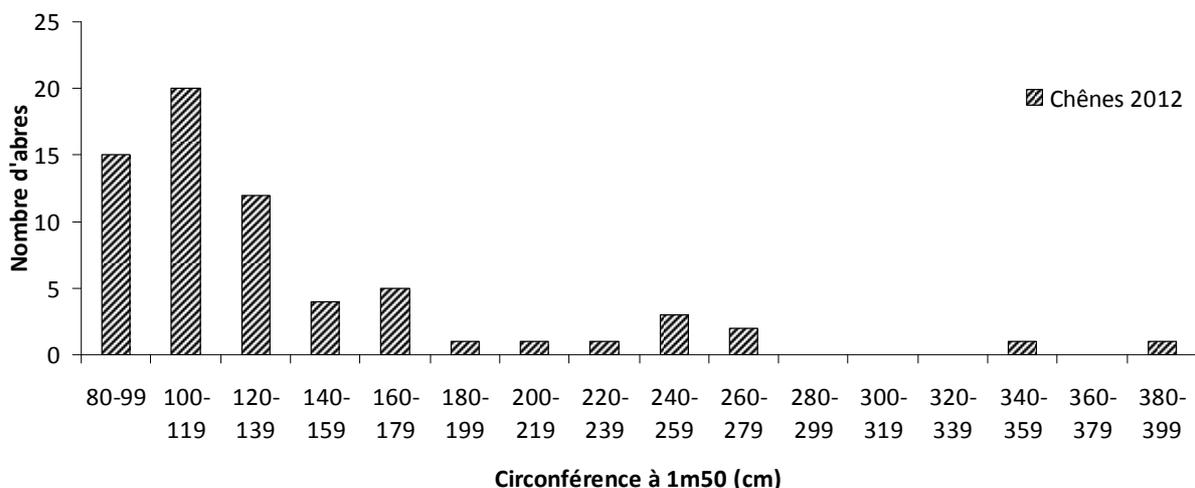


Figure 8 : Distribution des chênes observés selon les classes de circonférence

### 5.3.2. Concurrence – Indice d'ombrage

La concurrence est définie comme 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 devraient être exclus de l'échantillonnage.

Comme illustré à la Figure 9, trois quart des chênes ont deux ou trois côtés de leur cime touchés par d'autres couronnes. En revanche, les hêtres sont plus soumis à la concurrence puisque 40% de ceux-ci ont leur couronne concurrencée sur 4 côtés alors que seuls 16% des chênes sont dans la même situation.

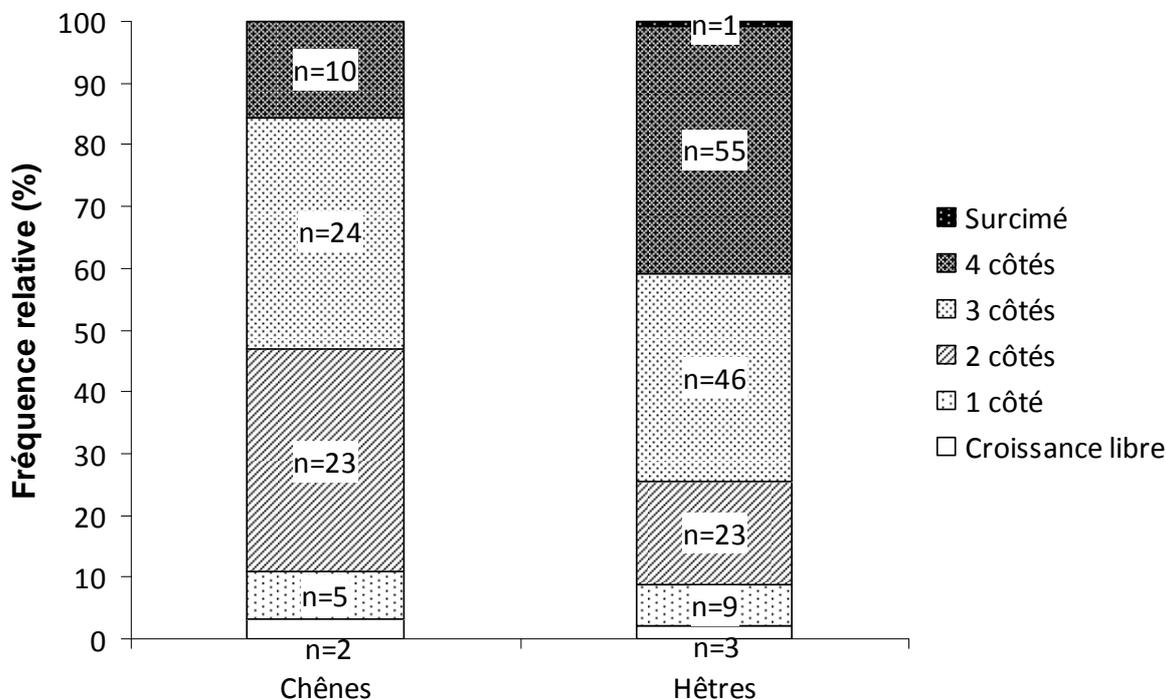


Figure 9 : Distribution des arbres observés selon le degré de concurrence (2012)

### 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. Dominé<sup>2</sup> : arbre largement dépassé par les cimes voisines et ne recevant aucune lumière directe.

<sup>2</sup> Selon le protocole les arbres dominés sont exclus du suivi de l'état sanitaire. Néanmoins, certains arbres ayant ce statut social ont été observés et pris en compte dans les analyses.

D'après la Figure 10, près de 80% des chênes et des hêtres sont classés comme codominants ou dominants. Les mêmes proportions ont été observées en 2010 et en 2011. On note également la présence de 16% de chênes et de 14% de hêtres sous-dominants ainsi qu'une minorité de 2% de chênes et de 9% de hêtres dominés ; ceux-ci devraient normalement être exclus de l'échantillonnage.

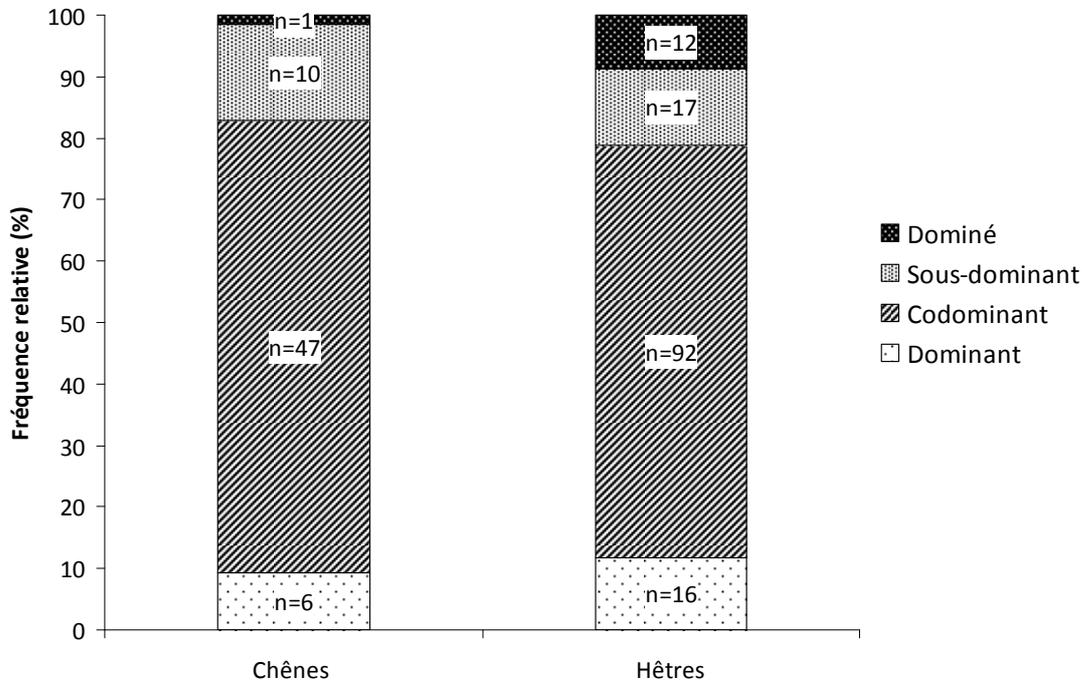


Figure 10 : Proportion des statuts sociaux en fonction des essences (2012)

#### 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.

Seuls 25% des chênes et 29% des hêtres sont entièrement visibles et peuvent être observés sous différents angles de vue (voir Figure 11). On compte également 58% de chênes et 46% de hêtres qui ont été évalués dans des conditions de visibilité partielle ou à contre-jour. Dans ce dernier cas, il est probable de mal estimer la défoliation des arbres. Finalement, 17% soit 11 chênes et 26% des hêtres soit 35 arbres ne sont pas visibles. Lorsque la visibilité est nulle, la défoliation n'est pas notée ou bien elle est extrapolée à l'ensemble du houppier à partir de la perte foliaire évaluée dans des petites fenêtres d'observation.

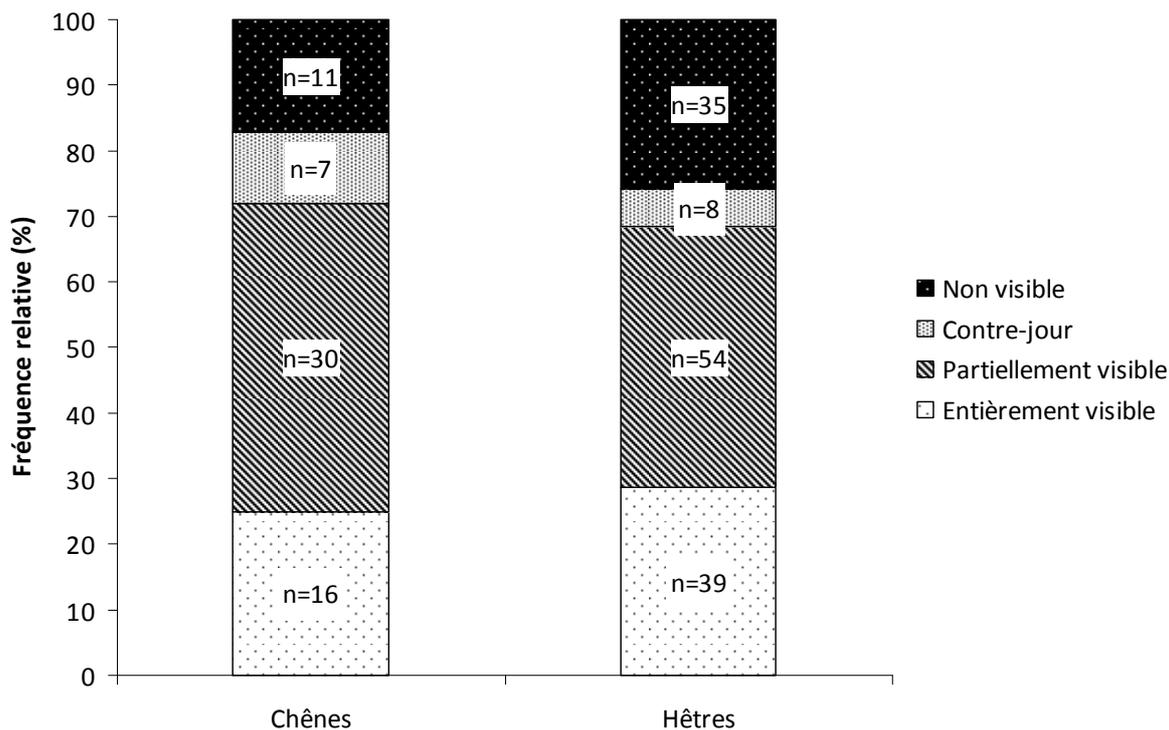


Figure 11 : Distribution des arbres en fonction de la visibilité et de l'essence (2012)

#### 5.4. Encodage et traitement des données

L'ensemble des données recueillies durant la campagne 2012 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.

Etant donné qu'en 2009, 2010 et 2011 des formations théoriques et pratiques avaient été dispensées aux adjoints forestiers de BE-IBGE concernant l'application du protocole *ICP Forests*, seule une formation pratique a été réalisée en 2012 (22 juin). L'objectif de cette journée était d'affiner les critères permettant l'évaluation de la défoliation du hêtre et des chênes indigènes. A cet effet, la placette n° 4785 en hêtraie et la placette n° 4781 en chênaie ainsi que leurs alentours ont été observés.

Durant le mois de juillet, l'équipe de référence de l'UCL a revisité cinq placettes en hêtraies (n° 3509, 3831, 4458, 4467 et 4783) ainsi que trois placettes en chênaie (n° 2791, 3197 et 4529). 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).

Les résultats de calibration obtenus en 2012 sont meilleurs que ceux de 2011 et de 2010. Au total, 80 arbres ont été observés par les deux équipes (28 chênes et 52 hêtres). Comme illustré à la Figure 14, 71% des chênes et 75% des hêtres ont obtenus les mêmes côtes de défoliation par l'UCL et par BE-IBGE à 10% près. Globalement, sur l'échantillon de 80 arbres, 74% des arbres ont le même pourcentage de défoliation à 10% près.

En considérant chacun des écarts de cotation entre BE-IBGE et l'UCL, on constate que la moyenne des écarts de défoliation est de 1% pour les chênes et les hêtres. De plus, les tests des grandeurs appariées indiquent que, pour ces deux essences, la différence des moyennes de défoliation entre les deux équipes n'est pas significativement différente de 0 avec un seuil de risque  $\alpha = 0,05$  (voir dernière colonne Tableau 7).

**Tableau 7 : Moyenne des écarts de défoliation par essence observée en 2012 et résultats des tests t de Student**

	Effectif de contrôle	Proportion contrôlée (%)	Défoliation moyenne UCL (%)	Défoliation moyenne BE-IBGE(%)	Moyenne des écarts BE-IBGE (%)	Résultat test t de Student
<b>Chênes indigènes</b>	28	44	23	24	1	Prob.>  t  = 0,4023
<b>Hêtres</b>	52	43	17	18	1	Prob.>  t  = 0,4722

La Figure 12 et la Figure 13 illustrent les résultats des tests appariés. Au vu des graphiques, il apparaît que le biais de défoliation n'est pas systématique puisque les valeurs sont relativement dispersées autour de la moyenne de 1%. En d'autres termes, les observateurs n'ont pas tendance à surestimer ou à sous-estimer la défoliation.

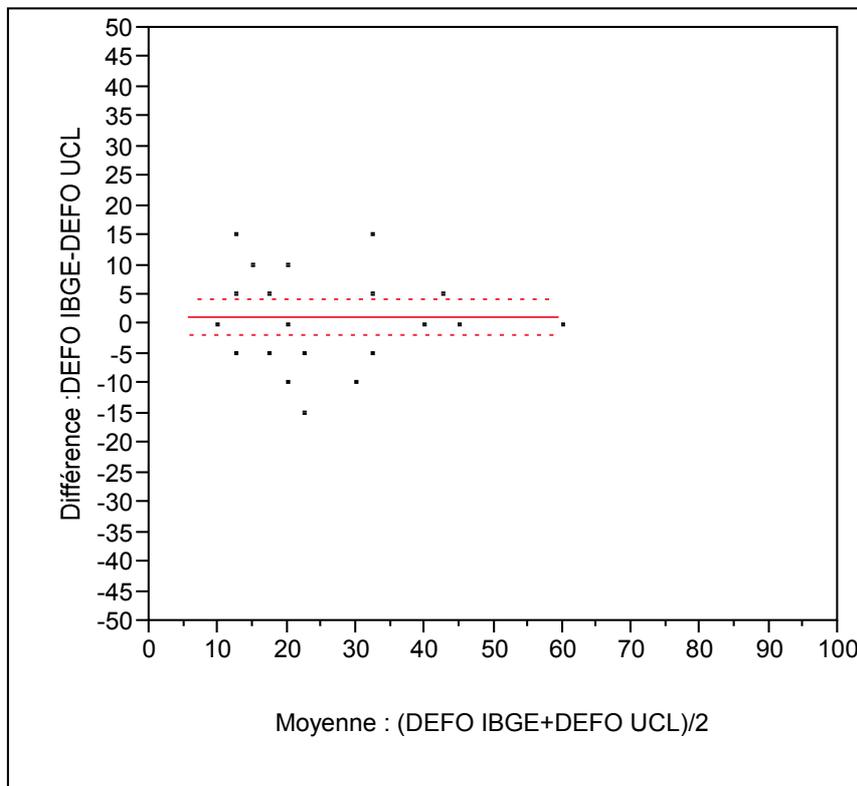


Figure 12 : Test apparié portant sur les écarts de cotation des chênes indigènes

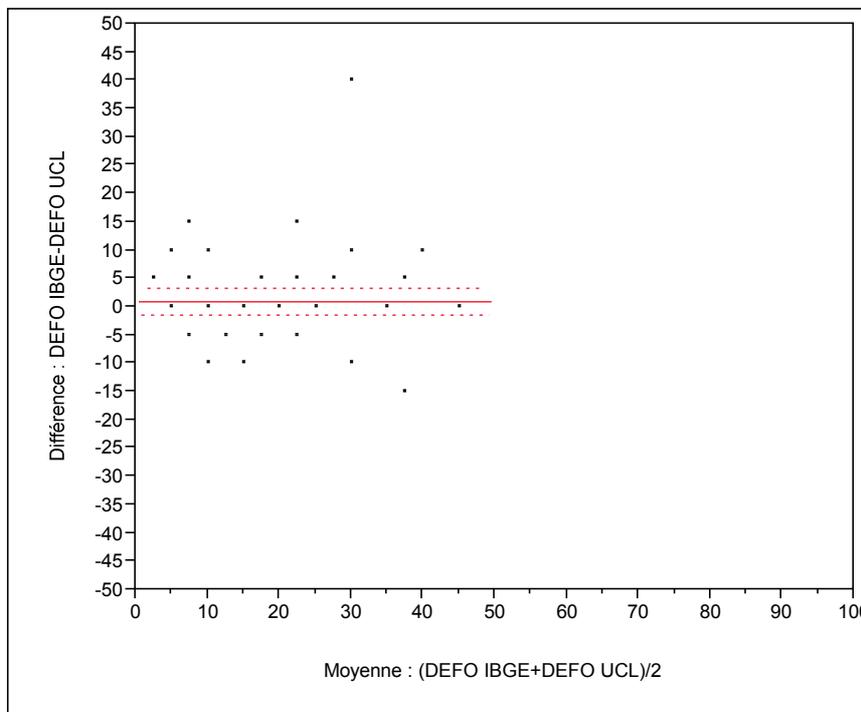


Figure 13 : Test apparié portant sur les écarts de cotation des hêtres

La Figure 14 suivante explique également que les estimations de défoliation effectuées par l'UCL et BE-IBGE ne diffèrent pas plus dans des conditions de visibilité partielle ou nulle. Les écarts observés seraient dus à la difficulté de délimiter le houppier considéré comme « observable » c'est-à-dire la hauteur à laquelle la cime est hors concurrence. Par exemple, le hêtre n°7 de la placette 3509 a été évalué sur des hauteurs de cime différentes en fonction des équipes. C'est pourquoi, il atteint 50% de défoliation par BE-IBGE et seulement 10% par l'UCL qui a pris uniquement le sommet du houppier en considération.

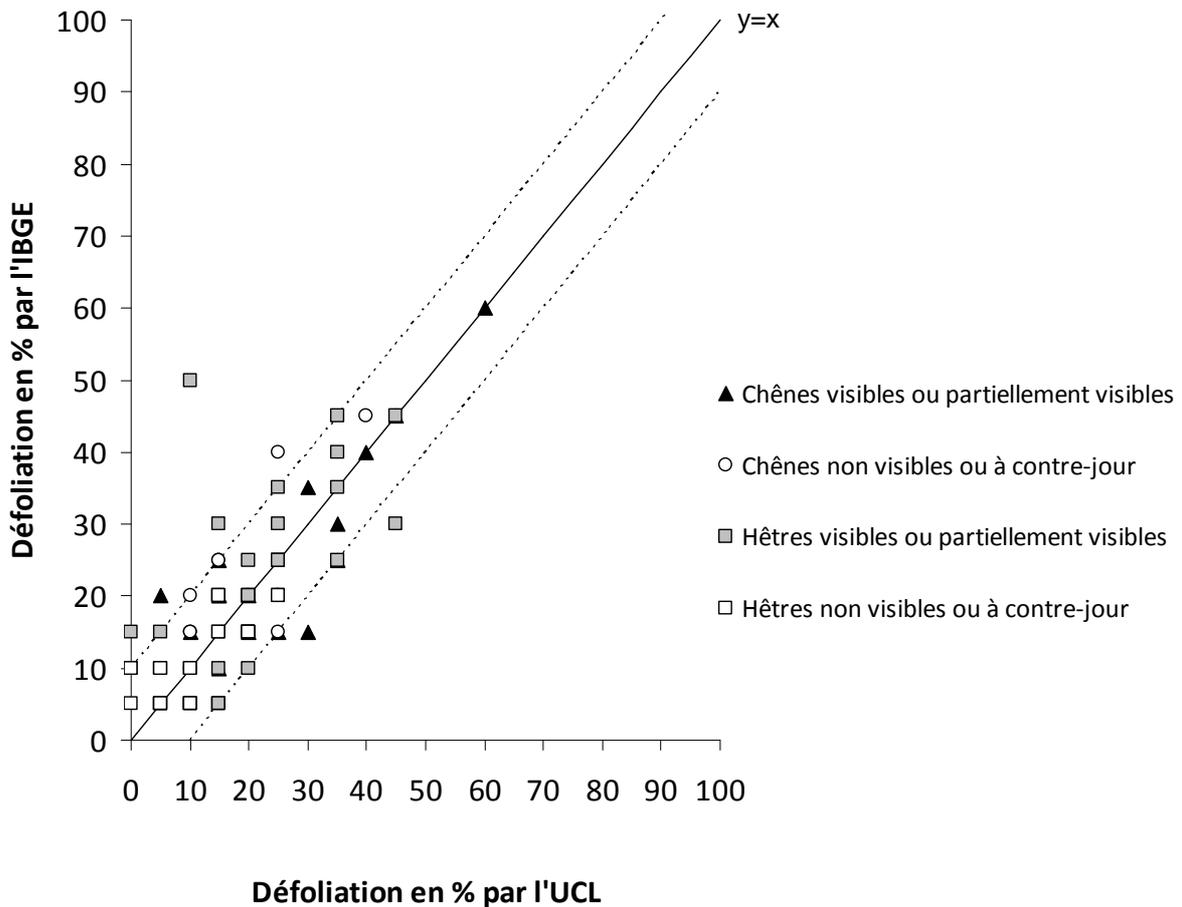


Figure 14 : Comparaison des observations de défoliation entre le BE-IBGE et l'UCL. Les droites en pointillés délimitent un intervalle de 10% de part et d'autre de la droite  $y=x$  (correspondance parfaite)

## 6. Résultats

Dans un premier temps, les pourcentages de défoliation des arbres de la campagne 2012 sont présentés. Ceux-ci sont ensuite comparés aux valeurs obtenues depuis 2009 afin de dégager une variation interannuelle du déficit foliaire. Ensuite, l'évolution de 2009 à 2012 du degré de fructification, de la structure de la couronne, de la présence de pousses épicorniques et de la décoloration des feuilles est présentée graphiquement.

Ensuite, la défoliation des chênes indigènes et des hêtres est exprimée en fonction de la circonférence, du statut social, du degré de concurrence, de la décoloration, de la fructification et de la forme du houppier. Les relations observées sont vérifiées statistiquement par comparaison des moyennes ou par régression linéaire. Finalement, les symptômes et dommages observés en fonction des essences et des placettes d'observation sont analysés.

## 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.).

Néanmoins, il faut rester prudent dans l'interprétation des résultats car l'évaluation de la défoliation reste subjective 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. Par ailleurs, 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.

### 6.1.2. Défoliation moyenne des arbres de la campagne 2012

Les boxplot suivants permettent de visualiser la distribution des données et les statistiques élémentaires ; la Figure 15 en illustre la légende.

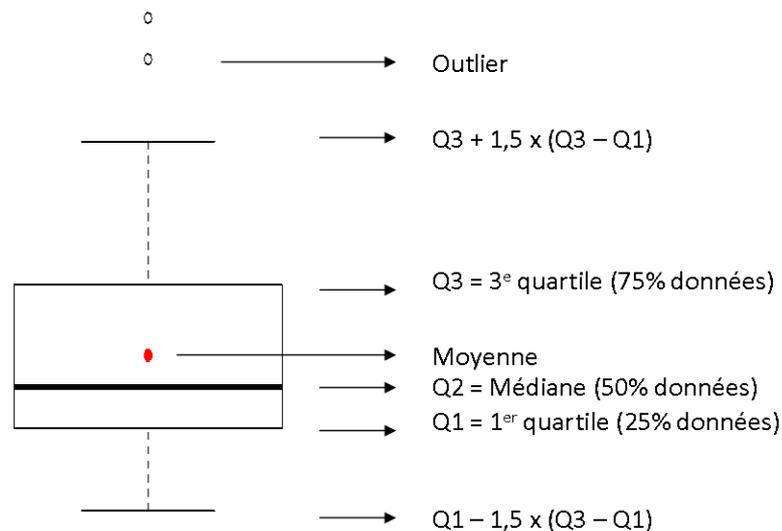


Figure 15 : Légende d'un boxplot

La Figure 16 présente la distribution des valeurs de défoliation pour les 64 chênes et 122 hêtres repartis au sein des 21 placettes et dont la défoliation a été notée. La défoliation moyenne est de 24% pour les chênes et de 20% pour les hêtres. De plus, on remarque que 50% des chênes ont des valeurs de défoliation comprises entre 15 et 32% alors que la moitié des hêtres ont des valeurs de défoliation variant entre 5 et 30% (Q1-Q3). En conclusion, les degrés de défoliation sont plus variables pour les hêtres.

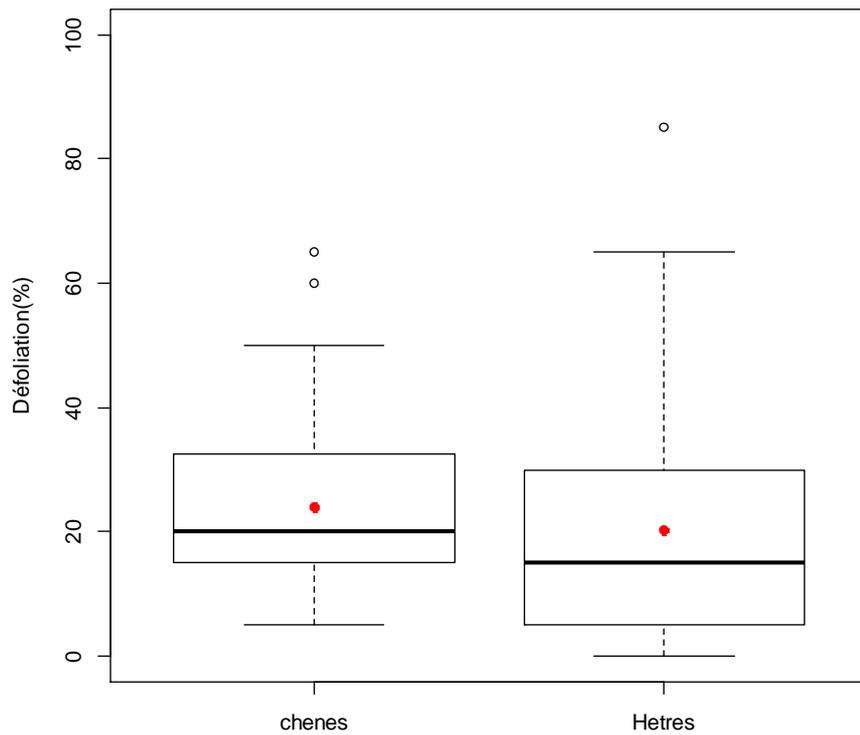


Figure 16: boxplot de la défoliation de l'ensemble des chênes (n=64) et hêtres (n=122)

La Figure 17 complète la Figure 16 car elle illustre le nombre d'arbres attribués à chaque classe de défoliation. Le nombre de hêtres décroît de manière approximativement linéaire avec la défoliation. Les effectifs maximum sont atteints pour des défoliations de 0 à 20%. Par contre les effectifs en chênes suivent une distribution de type log-normale étirée vers la droite. Cette tendance est identique à celle observée en 2010 et 2011 pour le chêne. Par contre, en comparant les effectifs des hêtres en 2010 et 2012 (années paires), il apparaît que la tendance log-normale de 2010 a évolué vers une tendance linéaire suite à l'augmentation des effectifs présentant une défoliation entre 0 à 20%.

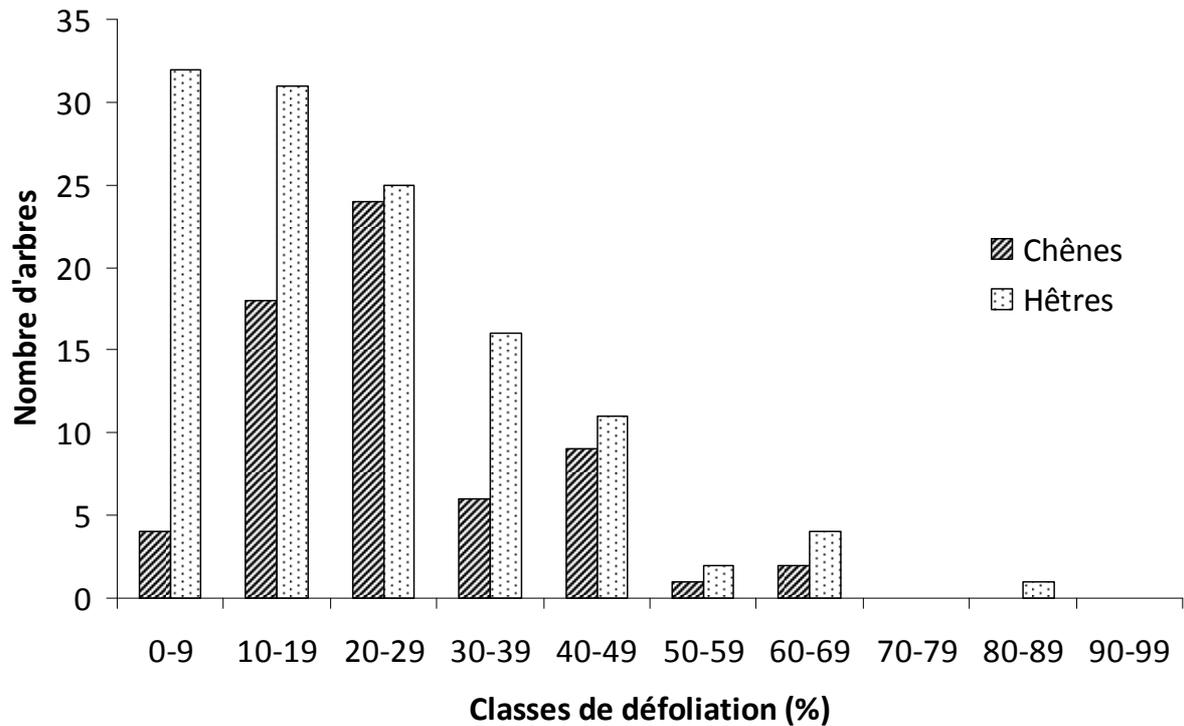
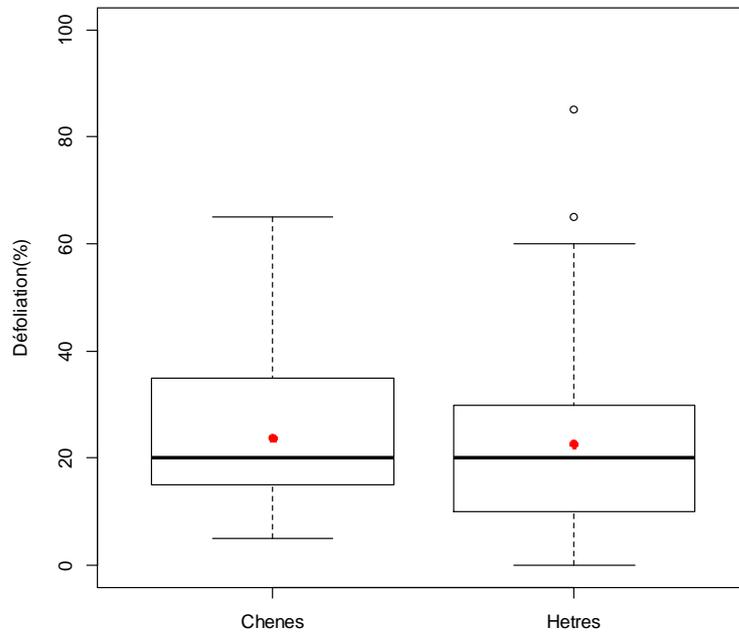


Figure 17 : Distribution des arbres selon les classes de défoliation (2012)

La Figure 18 reflète les valeurs de défoliation attribuées aux arbres qui sont visibles ou partiellement visibles. Les arbres dont la couronne est 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, 53 chênes et 101 hêtres ont été retenus. La défoliation moyenne du chêne est identique à celle calculée pour l'ensemble des chênes soit 24%. Par contre, la défoliation moyenne des 101 hêtres visibles ou partiellement visibles augmente de 3%, elle atteint donc 23%.



**Figure 18: Boxplot de la défoliation des arbres visibles en fonction de l'essence (chênes : n=53 ; hêtres : n=101)**

Le Tableau 8 suivant synthétise les valeurs de défoliations et circonférences moyennes par placette et par essence.

**Tableau 8: Moyenne et écarts-types des défoliations et des circonférences par essence et par placette (2012)**

<b>Hêtres</b>						
<b>Placette</b>	<b>Typologie</b>	<b>Effectif</b>	<b>Défoliation (%)</b>		<b>C150 (cm)</b>	
			<b>Moyenne</b>	<b>Ecart-type</b>	<b>C150</b>	<b>Ecart-type</b>
2791	Hêtraies - Chênaies	6	14	4	153	20
2877	Hêtraies pures	9	26	11	217	37
2879	Hêtraies pures	1	0	X	224	X
3197	Hêtraies - Chênaies	10	17	12	183	64
3509	Hêtraies pures	7	35	11	196	42
3511	Hêtraies pures	7	36	15	230	50
3595	Hêtraies - Chênaies	1	25	X	290	X
3831	Hêtraies pures	7	25	8	229	38
4145	Hêtraies pures	8	33	14	201	40
4147	Hêtraies pures	9	28	21	108	20
4151	Hêtraies pures	3	5	5	121	40
4458	Hêtraies pures	8	11	5	137	72
4467	Hêtraies pures	6	5	0	106	15
4469	Hêtraies pures	4	50	25	255	35
4778	Hêtraies pures	10	16	13	143	32
4783	Hêtraies pures	9	14	7	218	54
4785	Hêtraies pures	10	5	4	180	42
5022	Hêtraies pures	7	18	15	159	40
<b>Total</b>		<b>122</b>	<b>20</b>	<b>16</b>	<b>179</b>	<b>59</b>

<b>Chênes indigènes</b>						
<b>Placette</b>	<b>Typologie</b>	<b>Effectif</b>	<b>Défoliation (%)</b>		<b>C150 (cm)</b>	
			<b>Moyenne</b>	<b>Ecart-type</b>	<b>C150</b>	<b>Ecart-type</b>
2791	Hêtraies - Chênaies	5	22	11	132	33
2791	Hêtraies - Chênaies	3	20	0	119	15
2791	Hêtraies - Chênaies	4	18	6	119	35
2877	Hêtraies pures	1	40	X	196	X
3197	Hêtraies - Chênaies	3	15	5	198	48
3197	Hêtraies - Chênaies	1	45	X	164	X
3595	Hêtraies - Chênaies	3	35	10	245	27
4151	Hêtraies pures	8	38	13	185	98
4449	Chênaies pures	1	15	X	87	X
4449	Chênaies pures	16	18	12	121	64
4529	Chênaies pures	1	30	X	261	X
4529	Chênaies pures	14	26	14	111	14
4781	Hêtraies - Chênaies	4	16	5	135	16
<b>Total</b>		<b>64</b>	<b>24</b>	<b>13</b>	<b>141</b>	<b>63</b>

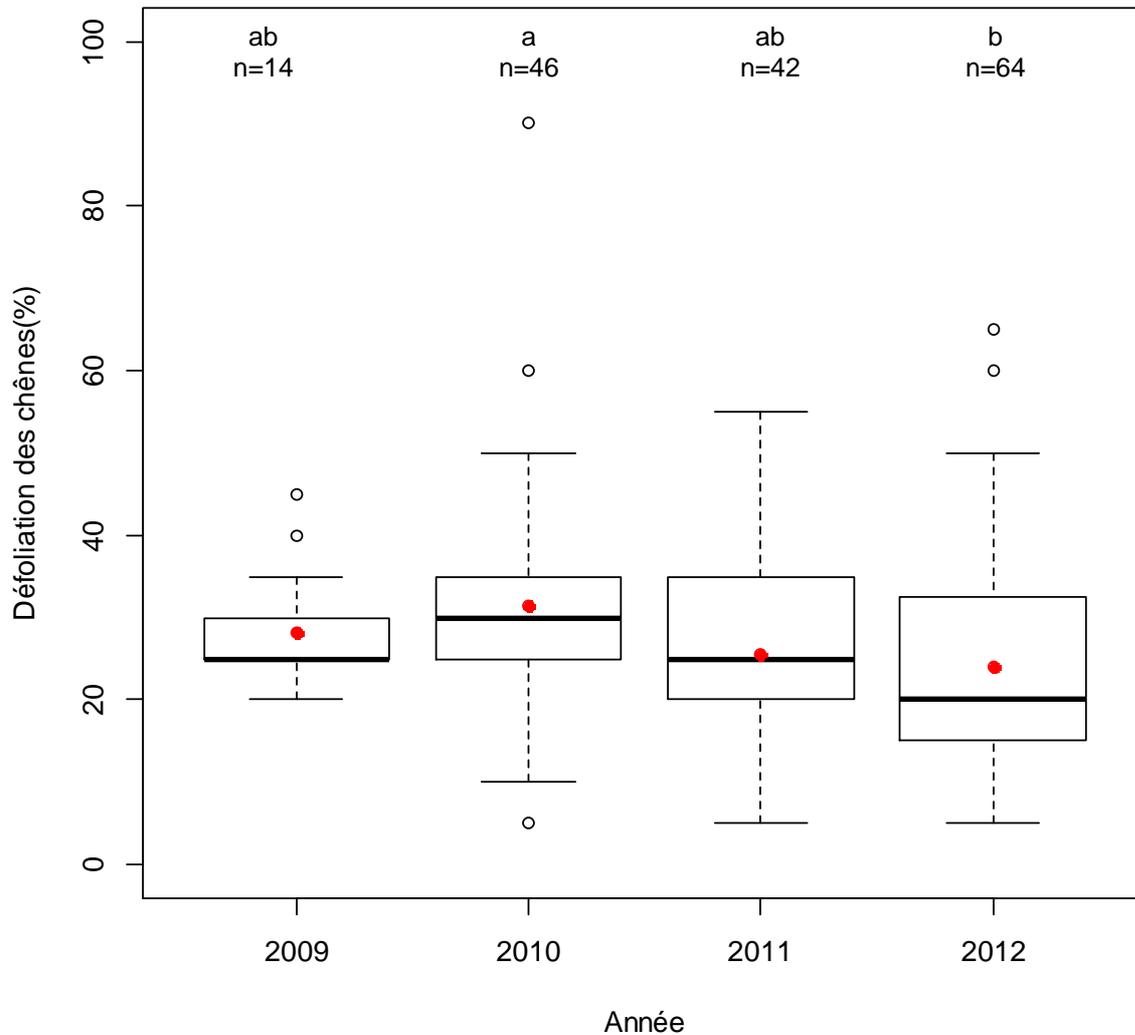
### **6.1.3. Evolution de la défoliation moyenne de 2009 à 2012**

Les données des campagnes de 2009, 2010 et de 2011 ont été extraites de la base de données MS Access. Afin de mettre en évidence l'évolution de la vitalité des arbres, de leur situation au sein du peuplement, de leur morphologie, etc. L'ensemble de ces données ont été traitées une nouvelle fois en 2012. A l'issue des analyses statistiques, certains effectifs différaient par rapport à ceux rapportés les années précédentes. 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 années comportant des lettres différentes ont des moyennes significativement différentes au seuil de 0,05.

La Figure 19 reflète l'évolution des valeurs de défoliation des chênes de 2009 à 2012. Les chênes pris en considération appartiennent soit aux placettes de type chênaie soit aux placettes de type mixte (mélange chênes et hêtres). Comme cité précédemment les effectifs sont en augmentation depuis 2009.

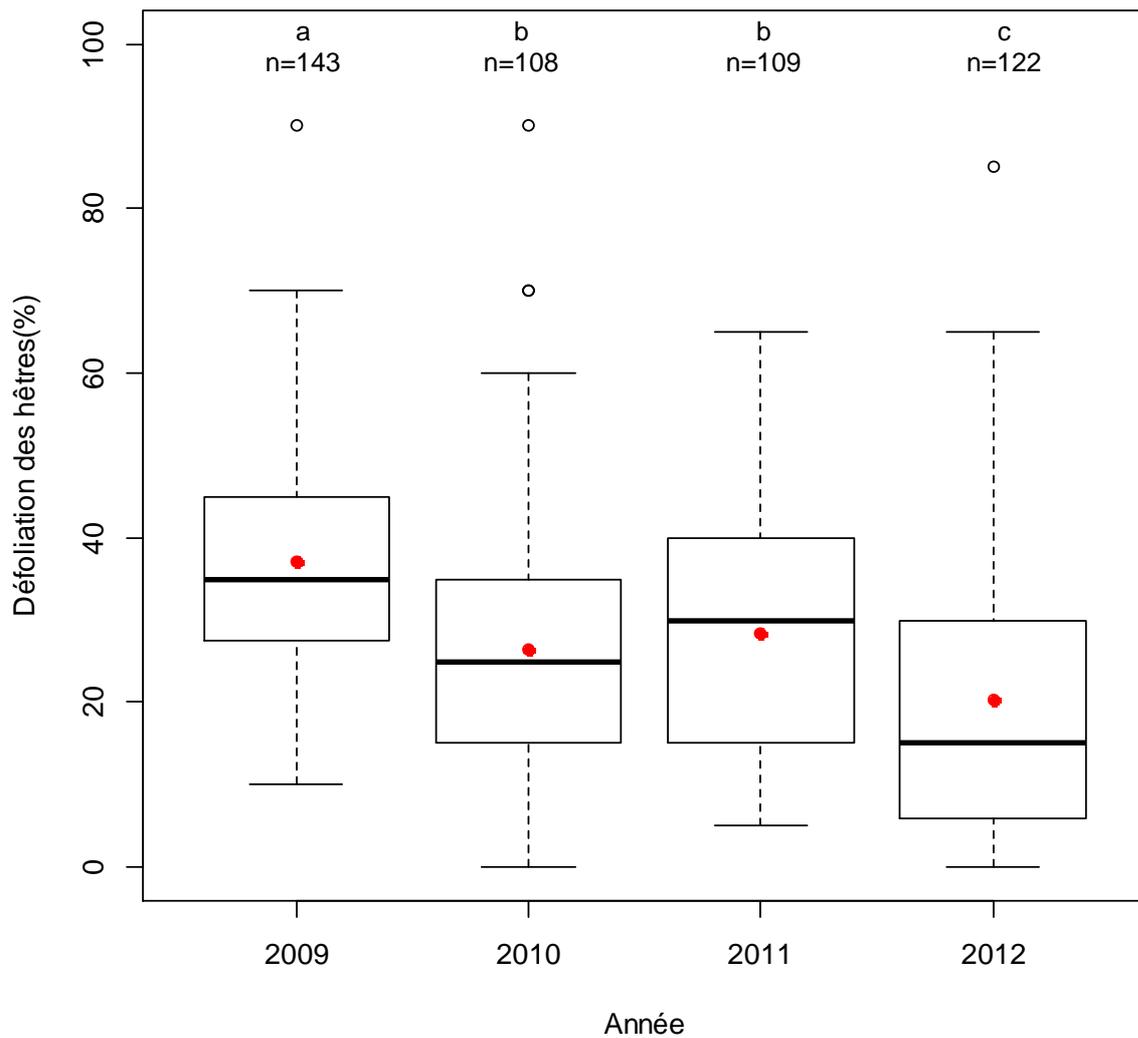
La défoliation moyenne des chênes a tendance à diminuer car elle est passée de 28% à 31% de 2009 à 2010 et de 26% à 24% de 2011 à 2012. Le 1<sup>er</sup> et le 3<sup>e</sup> quartile de la distribution atteignent 25% et 30% en 2009 ; 25% et 35% en 2010 ; 20% et 35% en 2011 et 15% et 32% en 2012. De manière générale, la variabilité des niveaux de défoliation a augmenté avec le temps. Par ailleurs, les moyennes de défoliations sont significativement différentes entre 2010 et 2012.



**Figure 19 : Distribution des valeurs de défoliation des chênes de 2009 à 2012**

Les hêtres retenus dans la représentation de la Figure 20 proviennent de certaines placettes mixtes mais également des placettes en hêtraie pur. Pour rappel, les placettes en hêtraie observées les années paires différent de celles évaluées les années impaires, hormis en 2009 où la totalité des placettes ont été visitées.

La défoliation moyenne des hêtres diminue de 37% à 26% de 2009 à 2010 et de 28% à 20% de 2011 à 2012. 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, 2010). La distribution des valeurs est plus large comparativement à celle des chênes. En effet, le 1<sup>er</sup> et le 3<sup>e</sup> 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 et 6% et 30% en 2012. Statistiquement les moyennes de 2010 et 2011 sont toutes deux significativement différentes à celles de 2009 et 2012.



**Figure 20 : Distribution des valeurs de défoliation des hêtres de 2009 à 2012**

Le Tableau 9 reprend résumé les valeurs moyennes de défoliation par année et essence.

**Tableau 9 : Moyenne de défoliation par année et essence**

	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>
<b>Chênes</b>	28% (n=14) <i>ab</i>	31% (n=46) <i>a</i>	26% (n=42) <i>a</i>	24% (n=64) <i>b</i>
<b>Hêtres</b>	37% (n=143) <i>a</i>	26% (n=108) <i>b</i>	28% (n=109) <i>b</i>	20% (n=122) <i>c</i>

La Figure 21 représente l'évolution de la défoliation de chênes notés en 2009, 2010 et 2012. Analyser l'évolution d'un même échantillonnage d'arbres permet de minimiser le biais dû à la variabilité des conditions d'observation (visibilité des arbres, concurrence, etc.) et à la variabilité des valeurs de défoliation due à l'évaluation d'arbres situés dans des conditions stationnelles différentes (sol, structure du peuplement, etc.). A l'exception de l'année 2009, les chênes observés les années impaires relèvent d'un échantillonnage différent. C'est pourquoi, les données de la campagne 2011 n'ont pas été considérées dans l'analyse. Les données relatives aux hêtres ont également été ignorées afin de suivre la même méthodologie pour les deux essences et pour éviter d'effectuer des analyses statistiques sur des effectifs réduits.

La défoliation moyenne des chênes est passée de 30 à 24% de 2009 à 2010 et a atteint 25% en 2012. Ces valeurs sont proches de celles observées pour la totalité des chênes bien qu'en 2010, la différence entre les moyennes était de 7%. Les 10 chênes considérés ont récupéré en moyenne 5% de foliation en 3 ans sans pour autant que les moyennes soient significativement différentes. Toutefois, à cause des effectifs réduits, l'interprétation de ces résultats ne peut être généralisée.

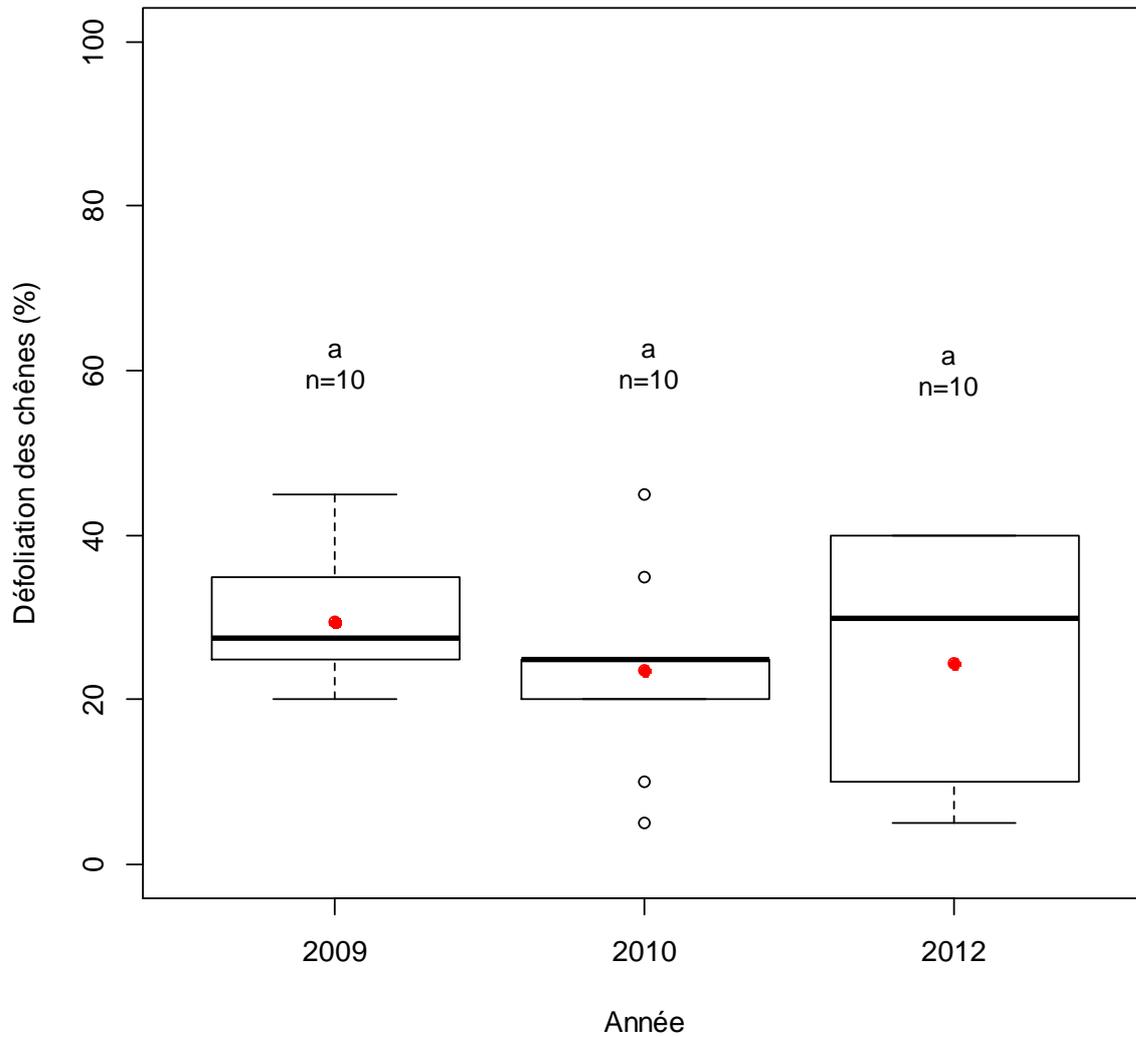
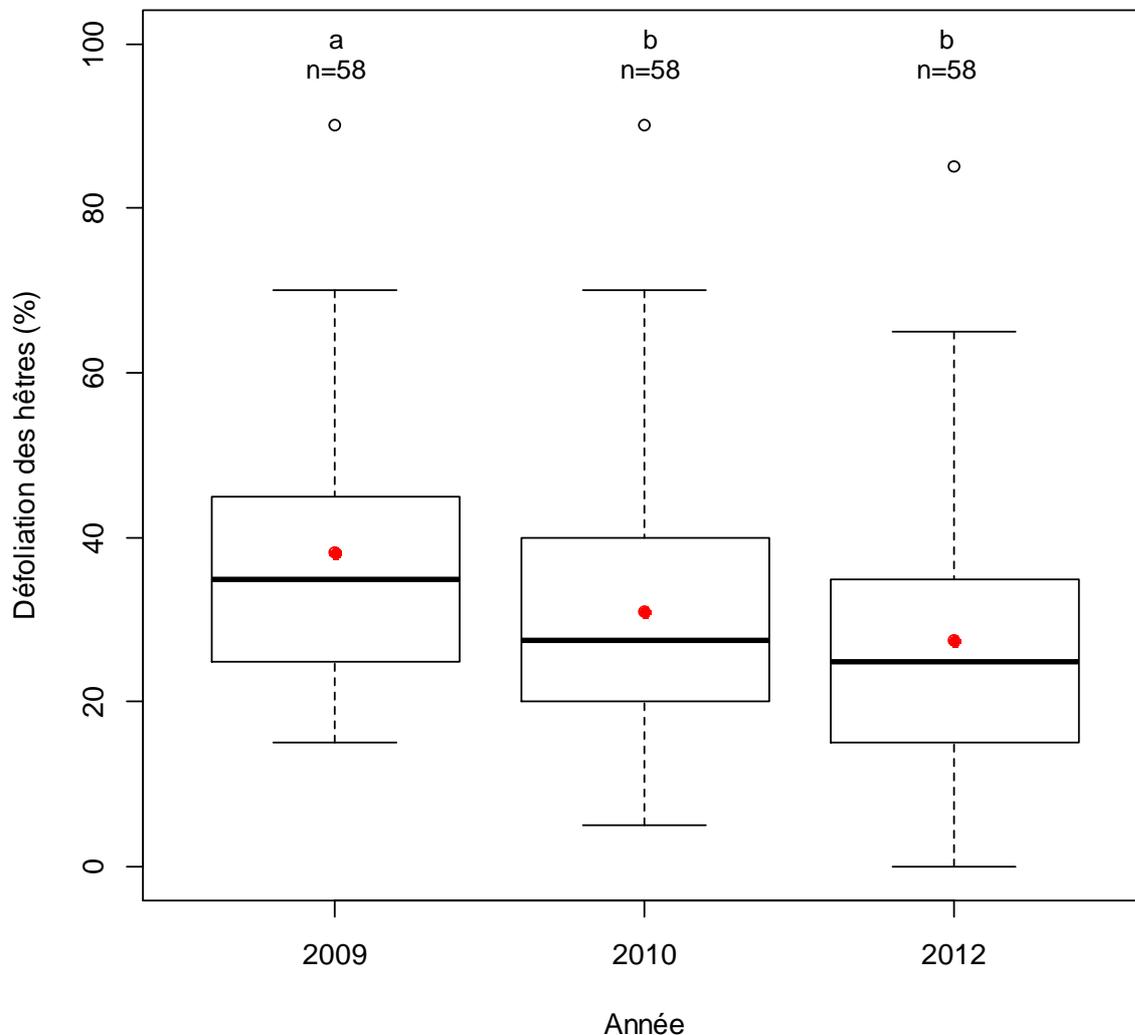


Figure 21 : Evolution de la défoliation d'un même échantillon de chênes entre 2009, 2010 et 2012

Les moyennes de défoliation des 58 hêtres ont diminué de 38 à 31% de 2009 à 2010 et atteint 28% en 2012 (Figure 22). La moyenne de 2009 est significativement différente à celles de 2010 et 2012. Les valeurs diffèrent de maximum 8% par rapport à celles présentées à la Figure 20 ; néanmoins la tendance à la baisse est similaire.



**Figure 22 : Evolution de la défoliation d'un même échantillonnage de hêtres entre 2009, 2010 et 2012**

De manière générale, la réduction de biomasse foliaire peut-être considérée comme un mécanisme de régulation transitoire et non comme un mécanisme de dépérissement lorsque cette diminution est réversible. Au niveau individuel, la diminution de la perte foliaire peut être attribuée à un rabotage de cime<sup>3</sup> bien que dans ce cas il s'agisse d'un processus de réversibilité « apparente » puisque l'arbre ne récupère pas sa vitalité initiale. Par ailleurs, à l'échelle de la placette d'étude, une diminution moyenne du déficit foliaire peut être due à l'enlèvement préférentiel d'arbres dépérissants lors des éclaircies.

<sup>3</sup> Chute des branches mortes au sommet de la couronne sous l'effet du vent et réduction de la cime observable, qui paraît dès lors plus saine.

## 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).

Aussi bien pour le chêne que pour le hêtre, la fructification est nulle en 2012. Sur la période de temps considérée, la fructification semble plus abondante les années impaires, avec un maximum observé en 2009 où 70% des hêtres portaient un volume élevé de faînes. En 2011, 12% des chênes possédaient une fructification et 7% un développement abondant de fruits contre respectivement 35% et 45% pour les hêtres.

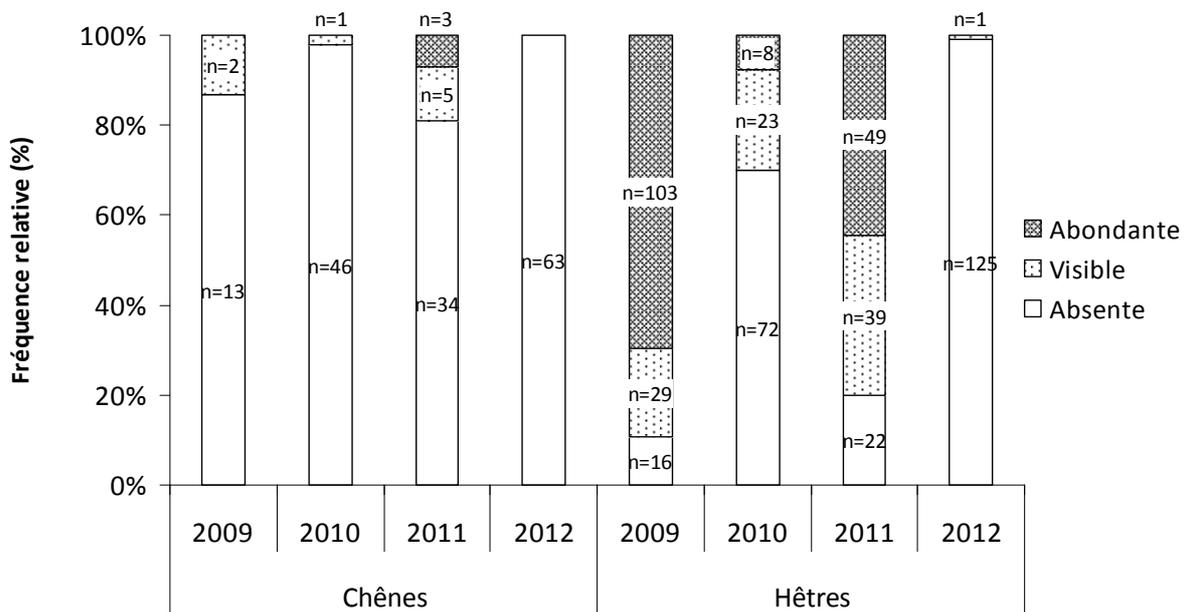


Figure 23 : Evolution du degré de fructification de 2009 à 2012 pour les chênes et les hêtres

## 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 et des hêtres, quatre formes du houppier ont été définies par le protocole en fonction de la forme de la partie supérieure de la couronne et du développement de ces rameaux (voir Figure 24 et Figure 25).

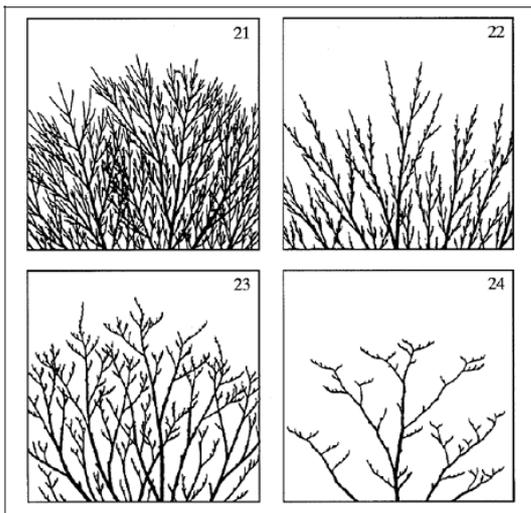


Figure 24 : Les quatre formes de houppier du hêtre, avec leurs codes (Eichhorn *et al.*, 2006)

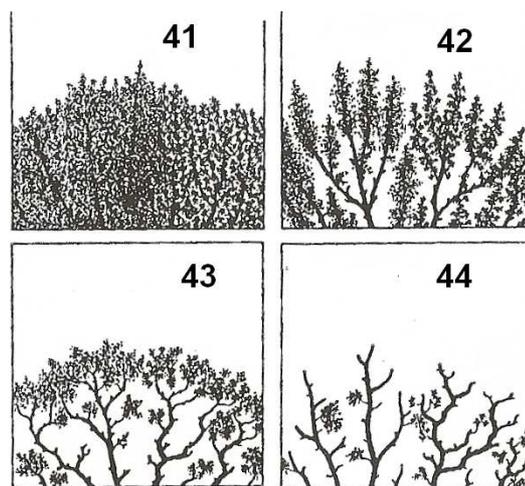


Figure 25 : Les quatre formes de houppier des chênes, avec leurs codes (Eichhorn *et al.*, 2006)

21 ou 41 : ramification dense ; 22 ou 42 : simplification légère ;  
23 ou 43 : simplification importante ; 24 ou 44 : déclin

Depuis 2009, la structure de la couronne s'améliore nettement pour les chênes et les hêtres (voir Figure 26). En 2012, la proportion de chênes ayant une ramification dense s'élève à 62%, une simplification légère à 33% et 5 % sont marqués par une simplification importante. Rappelons qu'en 2010, seuls 7% des chênes possédaient une ramification dense du houppier. Pour les hêtres la tendance est identique. En 2012, 54% possèdent une ramification dense, 10% se simplifient légèrement, 35% de manière importante et enfin 1% des hêtres sont en déclin. Les proportions d'arbres ayant une simplification légère ou importante ont diminué pratiquement de moitié entre 2010 et 2012 (de 84% à 45%).

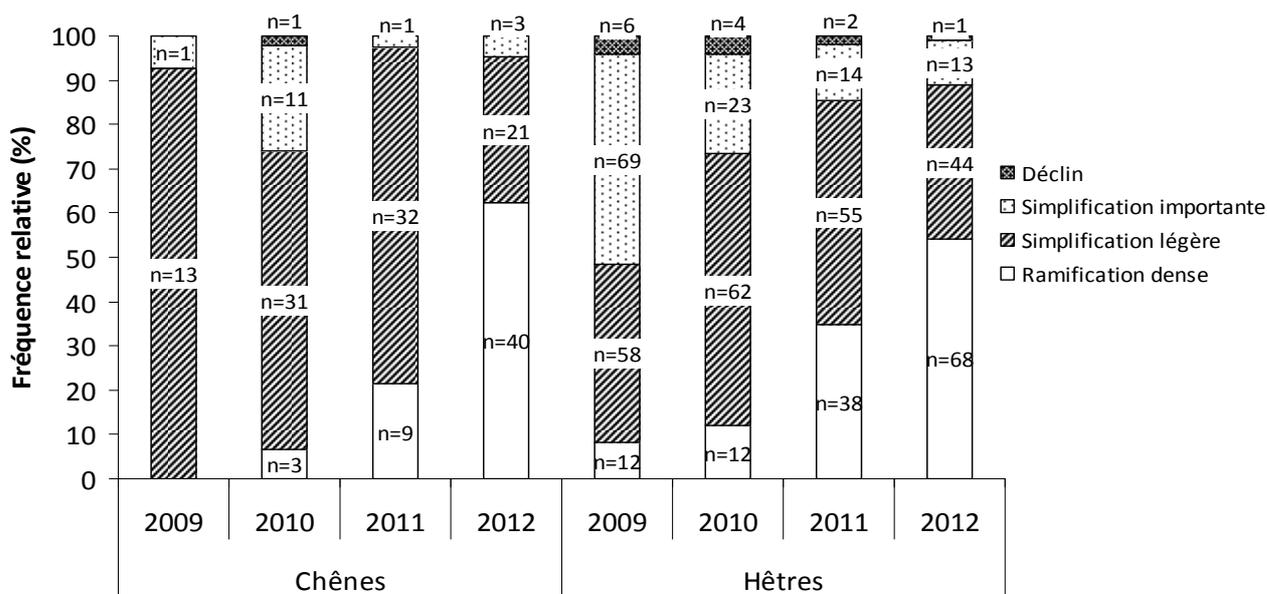


Figure 26 : Distribution des arbres selon la structure de la couronne

## 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. En 2012, 19% des chênes possèdent un volume abondant de gourmands et 32% un volume moyen. Lors de la campagne, de nombreux chênes touchés par les défoliateurs ont généré des pousses de la Saint-Jean, petites et orangées, en réaction à la perte foliaire parfois massive. Ces feuilles au terme de leur développement répondront au besoin photosynthétique de l'arbre. La distribution des gourmands pour le hêtre est moins constante que pour le chêne. On compte 8% des hêtres présentant quelques pousses épïcormiques et 89% n'ayant rien développé.

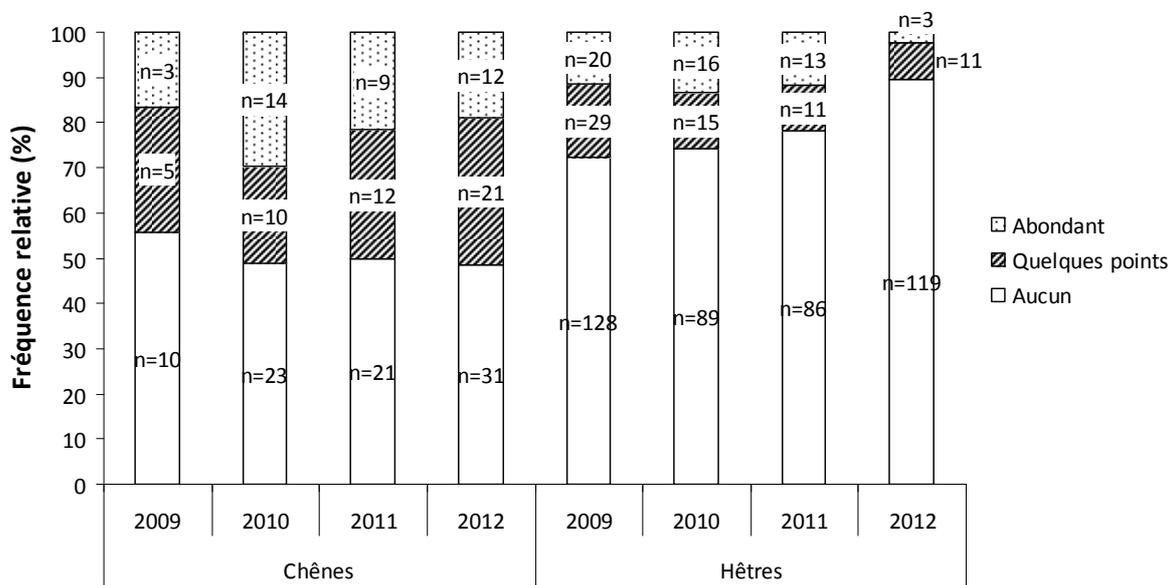


Figure 27 : Distribution des arbres selon l'abondance des pousses épïcormiques

## 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 par rapport à la totalité du feuillage 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 (56%) ont entre 0 et 10% de leur feuillage décoloré. Par contre, la proportion de chênes ayant leur feuillage décoloré entre 10 et 60% est passée de 32% à 42% de 2011 à 2012. Pour les hêtres, cette même classe de décoloration a également augmenté de 10% (de 6 à 16%) entre 2011 et 2012. Néanmoins, la majorité des hêtres soit 84% ont entre 0 et 10% de leurs feuilles atteintes.

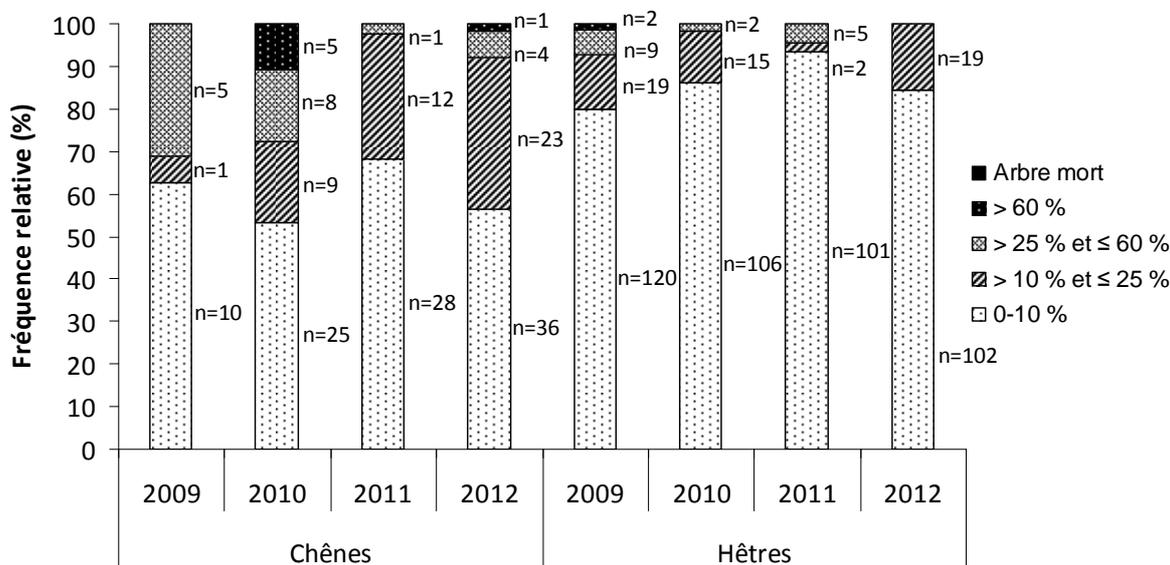


Figure 28 : Distribution des arbres selon le pourcentage de décoloration du feuillage

Les facteurs causant une décoloration des feuilles sont difficilement identifiables. Généralement ce symptôme apparaît en raison de carences minérales, de pollution atmosphérique, d'attaques parasitaires ou bien de sécheresse printanière ou estivale. Cette dernière cause ne permet pas d'expliquer les valeurs atteintes en 2012 puisque les précipitations ont été abondantes d'avril 2012 à juillet 2012 par rapport aux normales saisonnières.

## 6.6. Relations 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 et 2012. 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, 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 R<sup>2</sup>, 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 N(0,s) 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 2012.

**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)	<b>0,396*</b> (n=143)
2010	0,032 (n=46)	<b>0,439*</b> (n=108)
2011	-0,211 (n=42)	<b>0,494*</b> (n=109)
2012	0,184 (n=64)	<b>0,442*</b> (n=122)

Les régressions linéaires illustrées à la Figure 29 et à la Figure 30 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 la relation linéaire est nulle. En d'autres termes, lorsque la p-valeur est inférieure à 0.05, il existe une relation linéaire entre la circonférence et la défoliation. Nous pouvons conclure qu'il existe bien une relation significative entre les deux variables pour les hêtres contrairement aux chênes.

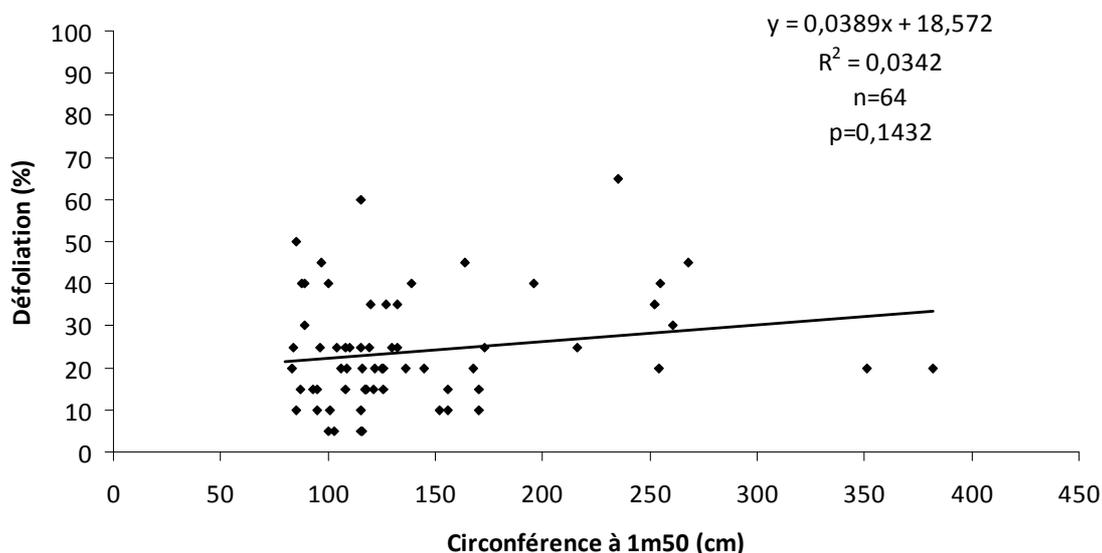


Figure 29 : Régression linéaire de la défoliation des chênes en 2012 en fonction de la circonférence

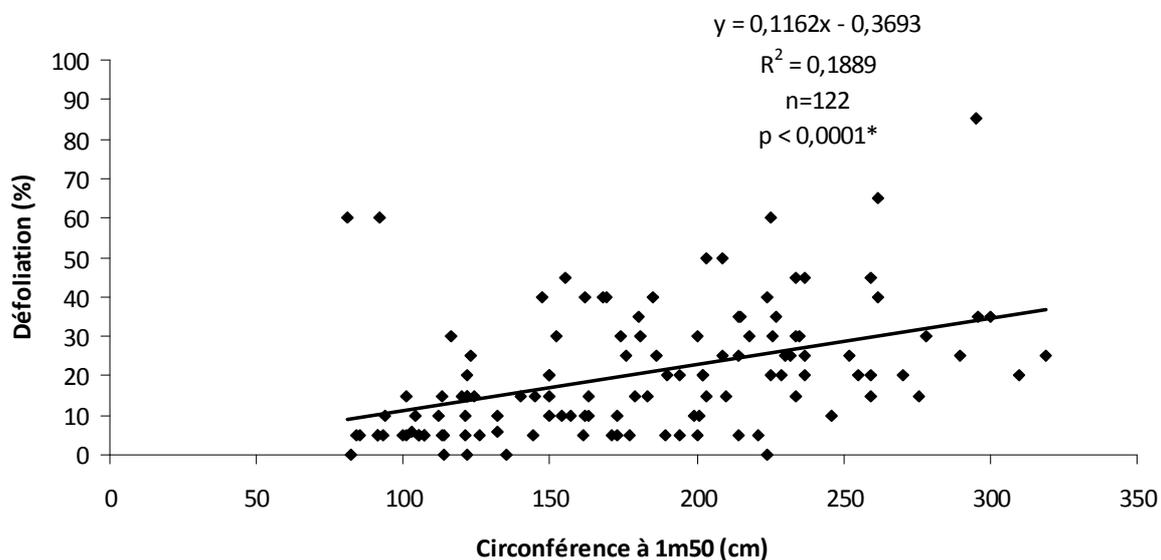


Figure 30 : Régression linéaire entre la défoliation des hêtres en 2012 et la circonférence

### 6.6.3. Défoliation et grosseur relative reflet du statut social

L'appréciation du rang social peut varier entre opérateurs (Dhôte, 1999). La distinction entre dominant et codominant est particulièrement délicate. La grosseur relative est une autre manière, moins subjective, d'exprimer le statut social de l'arbre au sein du peuplement. La grosseur relative est une variable continue, exprimée comme le rapport entre la circonférence de l'arbre et la

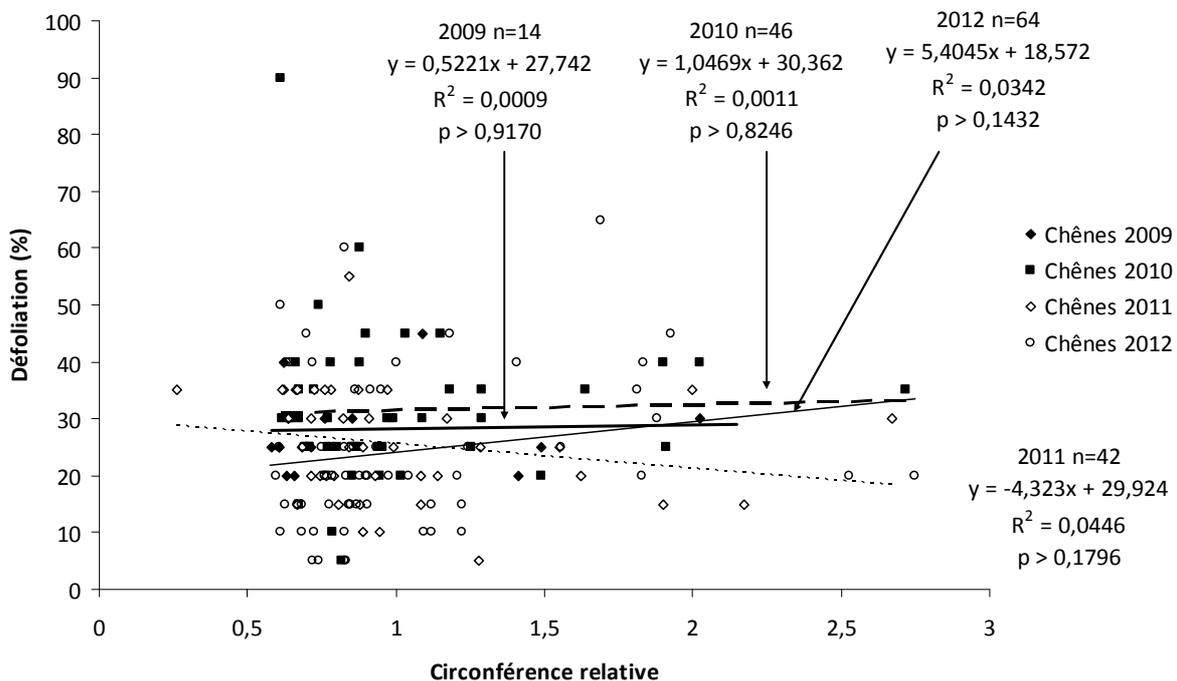
circonférence moyenne des arbres de la placette (Dhôte, 1999). Il est donc possible de tester la corrélation entre la défoliation et la grosseur relative. Pour rappel, le seuil d'inventaire est fixé à 80 cm de circonférence à 1,50m de hauteur.

Les résultats du Tableau 11, identiques à ceux du Tableau 10, révèlent que le statut social des hêtres permet d'expliquer les niveaux de défoliation atteints. En revanche, les niveaux de corrélations atteints pour les chênes ne sont pas significatifs. Nous pouvons donc conclure que les hêtres dominants ont tendance à être plus défoliés que les codominants ou dominés. A priori, les arbres dominants par leurs dimensions sont plus vulnérables aux stress puisque leur couronne est moins protégée par les houppiers voisins.

**Tableau 11 : Coefficients de corrélation entre la défoliation et circonférence relative**

Année	Corrélation entre la défoliation et circonférence relative	
	Chênes	Hêtres
2009	0,033 (n=14)	<b>0,405*</b> (n=143)
2010	0,032 (n=46)	<b>0,439*</b> (n=108)
2011	-0,211 (n=42)	<b>0,541*</b> (n=106)
2012	0,185 (n=64)	<b>0,442*</b> (n=122)

La Figure 31 et la Figure 32 illustrent les résultats des régressions linéaires entre la circonférence relative et la défoliation des chênes et des hêtres selon les différentes années de suivi. Nous pouvons conclure que, concernant les hêtres, il existe une relation linéaire très significative entre les deux variables. Par contre, cette relation n'est pas vérifiée pour les données relatives aux chênes.



**Figure 31 : Régression linéaire entre la défoliation des chênes et la circonférence relative pour les différentes années de suivi**

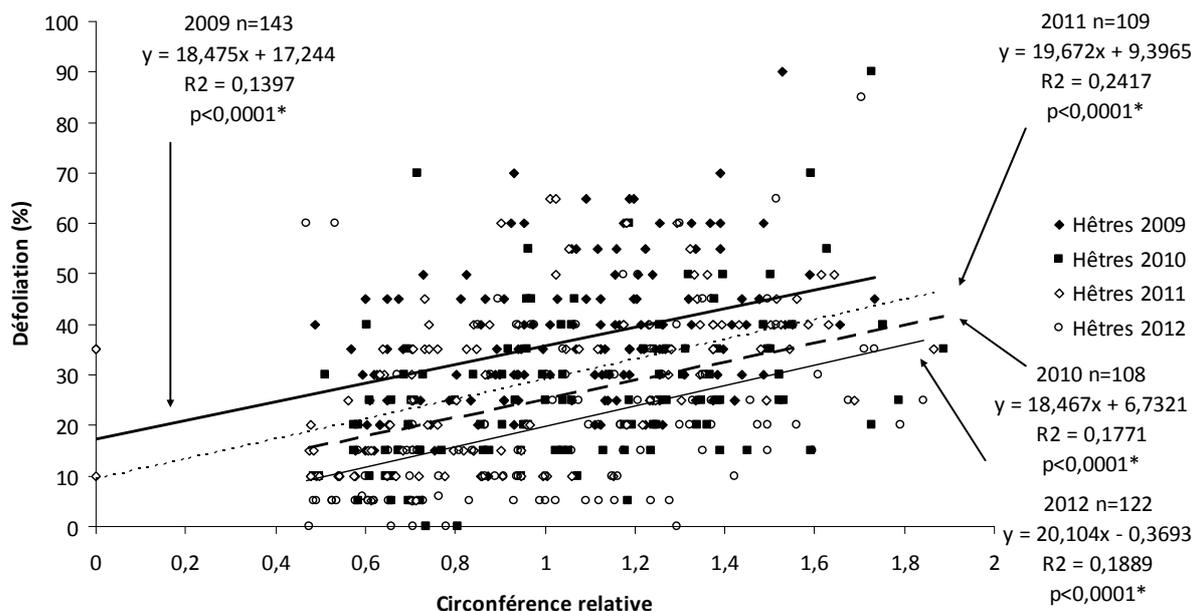


Figure 32 : Régression linéaire entre la défoliation des hêtres et la circonférence relative pour les différentes années de suivi

#### 6.6.4. 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. Un arbre dont l'indice d'ombrage est de 4 côtés reflète un degré maximum de concurrence.

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 en 2009 et en 2011.

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	55,5	0,9827	0,4636
Chênes 2010	5	4154,3060	830,861	8,2491	<0,0001
Chênes 2011	4	170,5357	42,6339	0,4334	0,7836
Chênes 2012	4	1377,074	344,269	2,1121	0,0906
Hêtres 2009	4	1870,886	467,722	2,5974	<b>0,039</b>
Hêtres 2010	4	2842,834	710,709	3,3781	<b>0,0122</b>
Hêtres 2011	5	4146,222	829,244	4,0952	<b>0,002</b>
Hêtres 2012	5	4042,477	808,495	3,5316	<b>0,0052</b>

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. Les résultats sont illustrés sur la Figure 33 et la Figure 34 au moyen de lettres. Pour une année considérée, les indices d'ombrage portant des lettres différentes forment des groupes significativement différents les uns des autres.

En considérant les chênes, aucune tendance significative ne peut être mise en évidence. L'intensité de la concurrence n'est pas liée aux pourcentages de défoliations observés depuis 2009. Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que, d'une part, 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. D'autre part, de nombreuses coupes ont été réalisées entre 2011 et 2012. La défoliation des chênes a pu être surestimée pour les arbres ne présentant plus qu'un ou deux voisins après les coupes car dans ce cas, des trouées fortement visibles sont occasionnées dans la couronne.

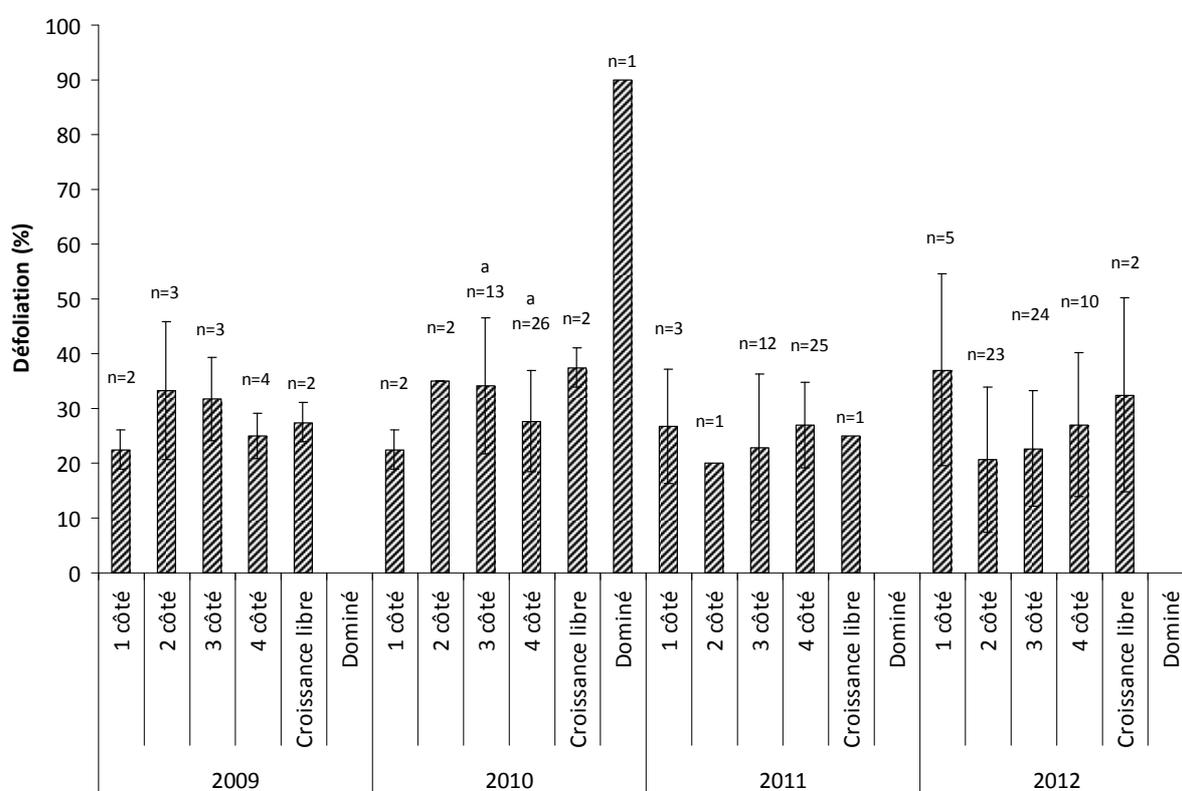


Figure 33 : Distribution des moyennes de défoliation du chêne en fonction des indices d'ombrage

Les pourcentages de défoliation des hêtres ont tendance à décroître (non significatif) à mesure que le degré de concurrence augmente. Cette tendance est inverse à celle observée pour les chênes en 2012. En 2009, 2010 et 2011, les maxima de défoliation sont atteints par les hêtres en croissance libre.

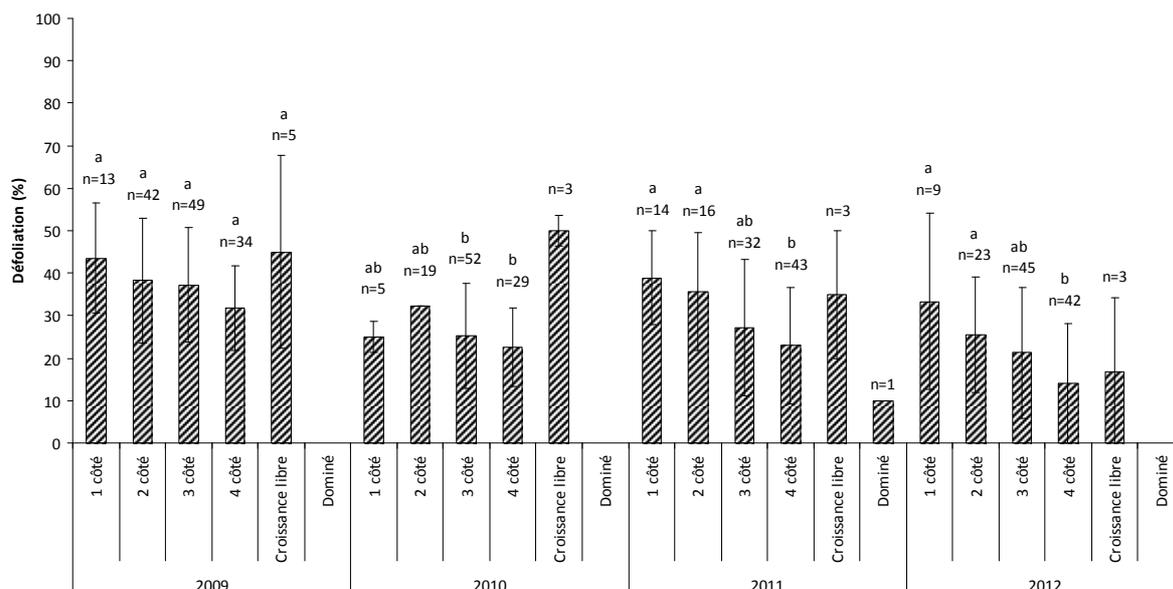


Figure 34 : Distribution des moyennes de défoliation du hêtre en fonction des indices d'ombrage

### 6.6.5. 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 classé par espèce et par année d'observation, 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	56,92308	28,4615	0,7692	0,4889
Chênes 2010	3	210,0966	70,032	0,3689	0,7758
Chênes 2011	2	91,9788	45,9894	0,5322	0,5916
Chênes 2012	3	539,825	179,942	1,0328	0,3846
Hêtres 2009	3	3235,266	1078,42	6,3380	<b>0,0005</b>
Hêtres 2010	2	1656,573	828,287	3,7909	<b>0,0258</b>
Hêtres 2011	2	472,668	236,334	1,0155	0,3658
Hêtres 2012	1	49,464	49,464	0,1937	0,6606

La Figure 35 et la Figure 36 illustrent la distribution des moyennes de défoliation en fonction des classes de décoloration pour les chênes et les hêtres. Aucune tendance ne se dessine suffisamment pour interpréter les résultats obtenus.

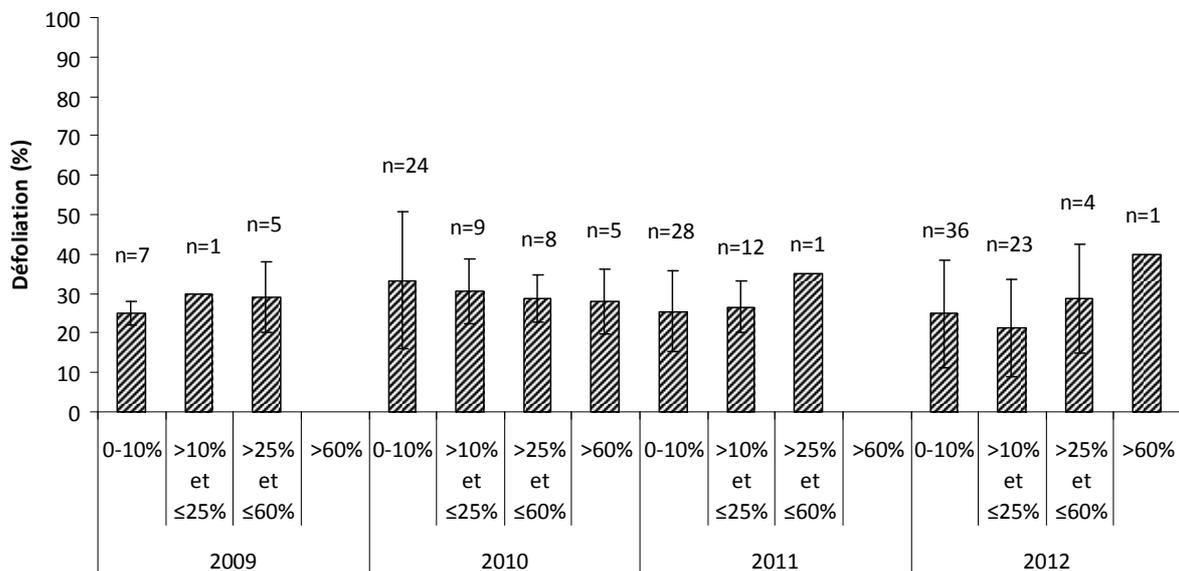


Figure 35 : Distribution des moyennes de défoliation du chêne en fonction de la décoloration

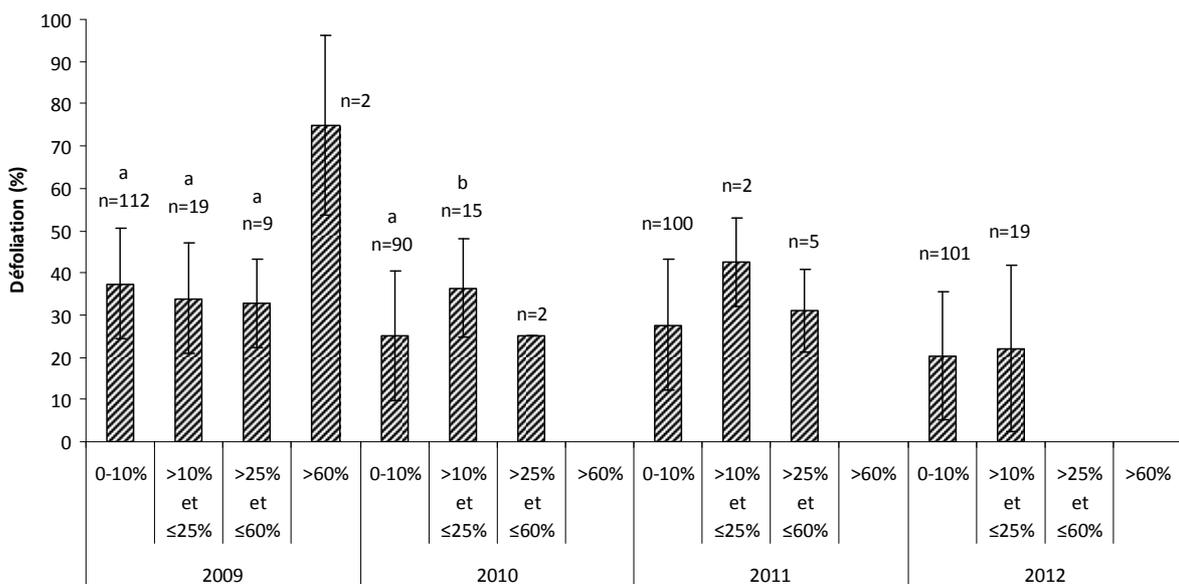


Figure 36 : Distribution de la défoliation du hêtre en fonction de la décoloration

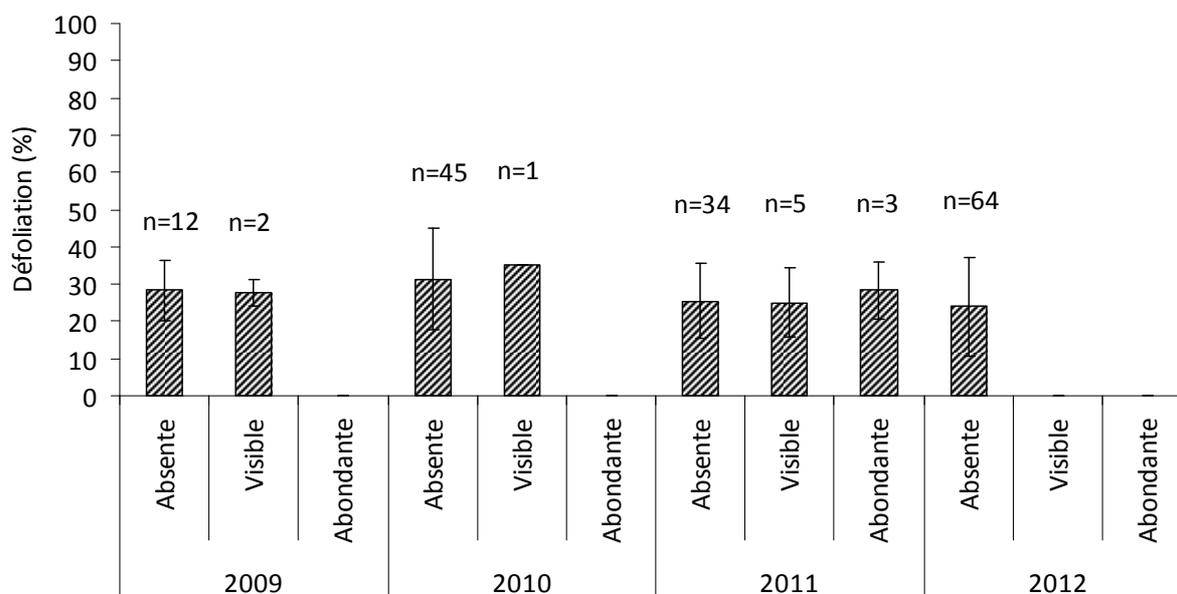
### 6.6.6. Défoliation et fructification

Seuls les hêtres observés lors de la campagne en 2009 et 2011 ont des moyennes de défoliation significativement différentes en fonction de l'abondance de fructification (voir Tableau 14).

**Tableau 14 : Résultats des ANOVA testant l'effet de la fructification dans le houpper observable sur la défoliation**

Source	DDL	Somme des carrés	Carrés moyens	F	Pr > F
Chênes 2009	1	1,19048	1,1905	0,0196	0,8910
Chênes 2010	1	13,1522	13,152	0,0708	0,7914
Chênes 2011	2	25,07	12,5350	0,1292	0,8792
Chênes 2012	1	0,893	0,893	0,005	0,9437
Hêtres 2009	2	3477,008	1738,5	10,4192	<b>&lt;0,0001</b>
Hêtres 2010	2	12,914	6,457	0,0285	0,9719
Hêtres 2011	2	8589,284	4294,64	27,7353	<b>&lt;0,0001</b>
Hêtres 2012	1	610,893	610,893	2,4446	0,1206

D'après la Figure 37, la fructification des chênes est restée constante en 2009, 2010 et 2011. En 2011, seuls 3 arbres sur les 42 chênes observés présentaient une fructification importante. L'année 2012 se distingue par une fructification nulle observée sur les 64 chênes de la campagne. Ce phénomène peut s'expliquer par la présence importante de chenilles (*Tortrix viridana*) avant ou pendant le débourrement (Pesson *et al.*, 1994), ce qui a anéanti la floraison et par conséquent la fructification de l'année 2012.



**Figure 37 : Distribution des moyennes de défoliation du chêne en fonction de la fructification du houpper observable**

A l'analyse de la Figure 38 et au vue des tests de Tukey, les arbres présentant des faînéas importantes en 2009 et 2011 ont une défoliation moyenne supérieure, de l'ordre de 40%. Cette relation a déjà été observée pour le hêtre (Schmidt, 1991 ; Eichhorn *et al.*, 2005 ; Fischer *et al.*, 2010).

Tout d'abord, la périodicité des bonnes fainaies est de 5 à 10 ans. Le développement du fruit nécessite une grande quantité de glucides, il faut donc que les conditions microclimatiques pendant l'été soient optimales pour la photosynthèse et que les stations aient une réserve en eau utile adéquate. La sylviculture permet également de créer des conditions favorables à la fructification : coupes d'éclaircies, traitement en futaie dense, etc. (Becker *et al.*, 1977)

La relation entre la défoliation et la fructification s'explique, entre autres, par le fait que les fortes faînéas 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).

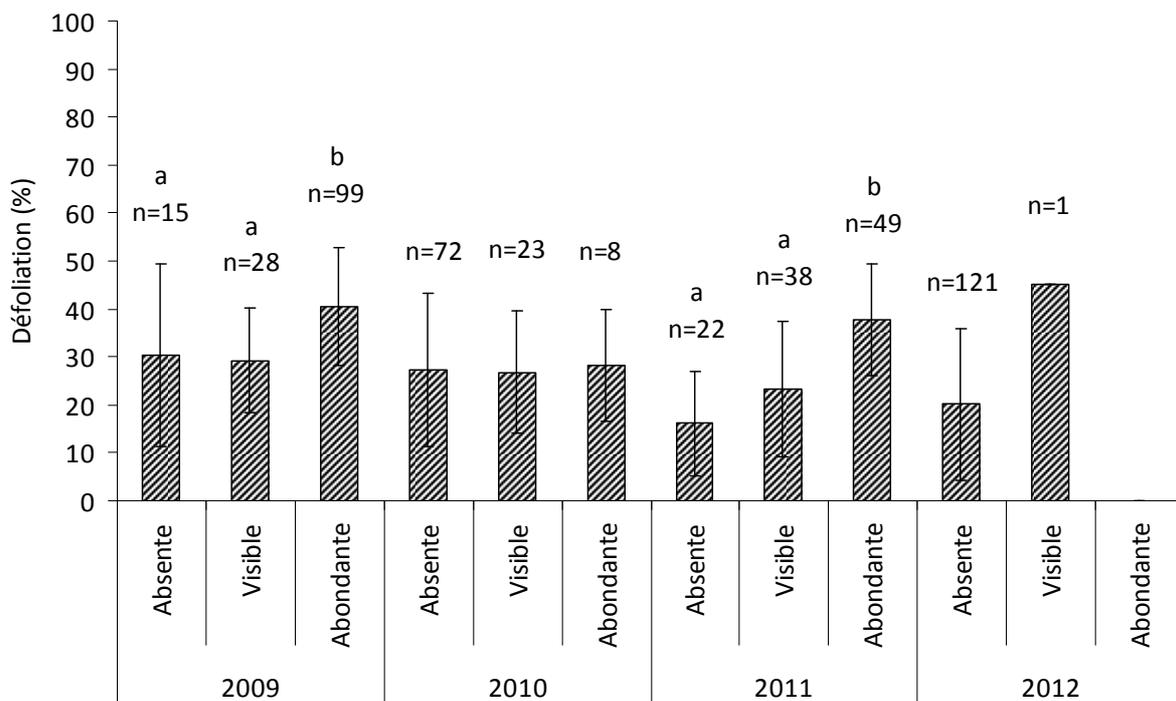


Figure 38 : Distribution des moyennes de défoliation du hêtre en fonction de la fructification du houpier observable

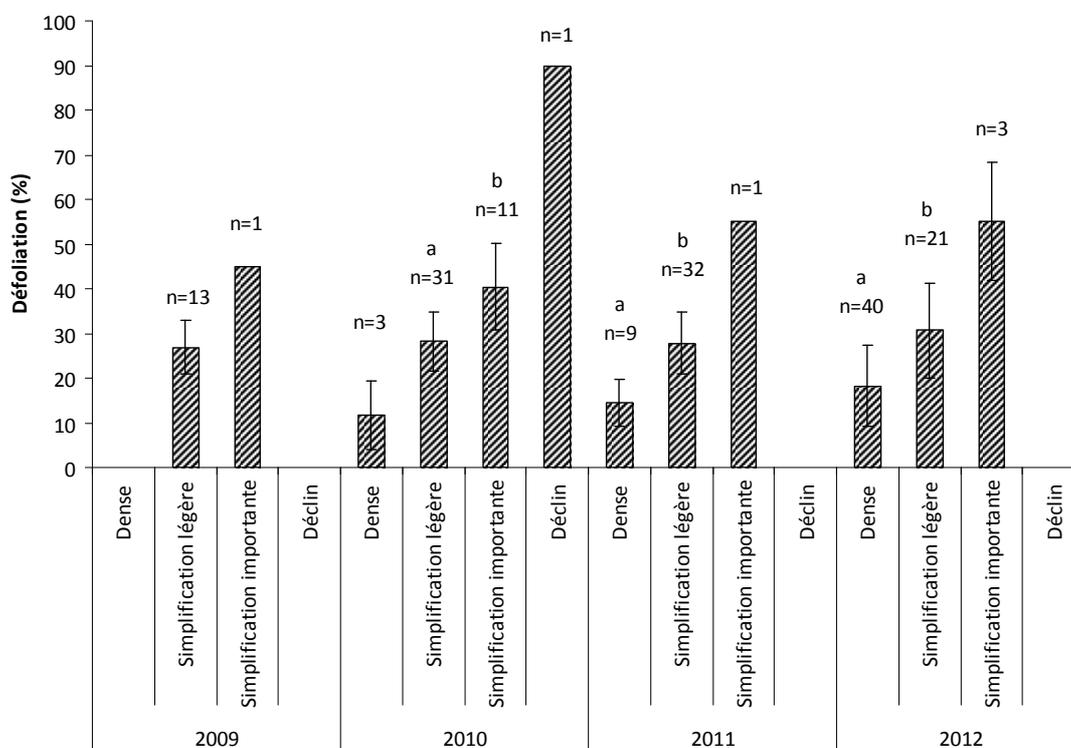
### 6.6.7. Défoliation et forme du houpier

Comme attendu, une relation nette existe entre la défoliation des arbres et la forme du houpier aussi bien pour les chênes que pour les hêtres (Tableau 15 ; Figure 39 et Figure 40). Cette relation était prévisible car 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	303,43407	303,434	8,529	<b>0,0128</b>
Chênes 2010	3	11,6667	5816,3389	1938,78	<b>&lt;0,0001</b>
Chênes 2011	2	2141,0218	1070,51	25,0135	<b>&lt;0,0001</b>
Chênes 2012	2	5151,964	2575,98	26,8984	<b>&lt;0,0001</b>
Hêtres 2009	3	13282,308	4427,44	48,1135	<b>&lt;0,0001</b>
Hêtres 2010	3	14744,303	4914,77	60,0692	<b>&lt;0,0001</b>
Hêtres 2011	3	15350,003	5116,67	55,6577	<b>&lt;0,0001</b>
Hêtres 2012	3	21301,378	7100,46	90,1159	<b>&lt;0,0001</b>

Les résultats du test de tukey révèlent la même tendance pour les deux essences et pour toutes les années d'observation. La défoliation augmente en fonction du degré de simplification de la ramification. Toutes espèces confondues, ces moyennes de défoliation varient selon les années de 9 à 20% pour la classe de ramification dense, de 23 à 33% pour les arbres simplifiés légèrement, de 40 à 55% pour les simplifications importantes du houppier et de 45 à 90% de défoliation pour les arbres en déclin (voir Figure 39 et Figure 40).



**Figure 39 : Pourcentage de défoliation moyen selon la forme du houppier et l'année pour les chênes**

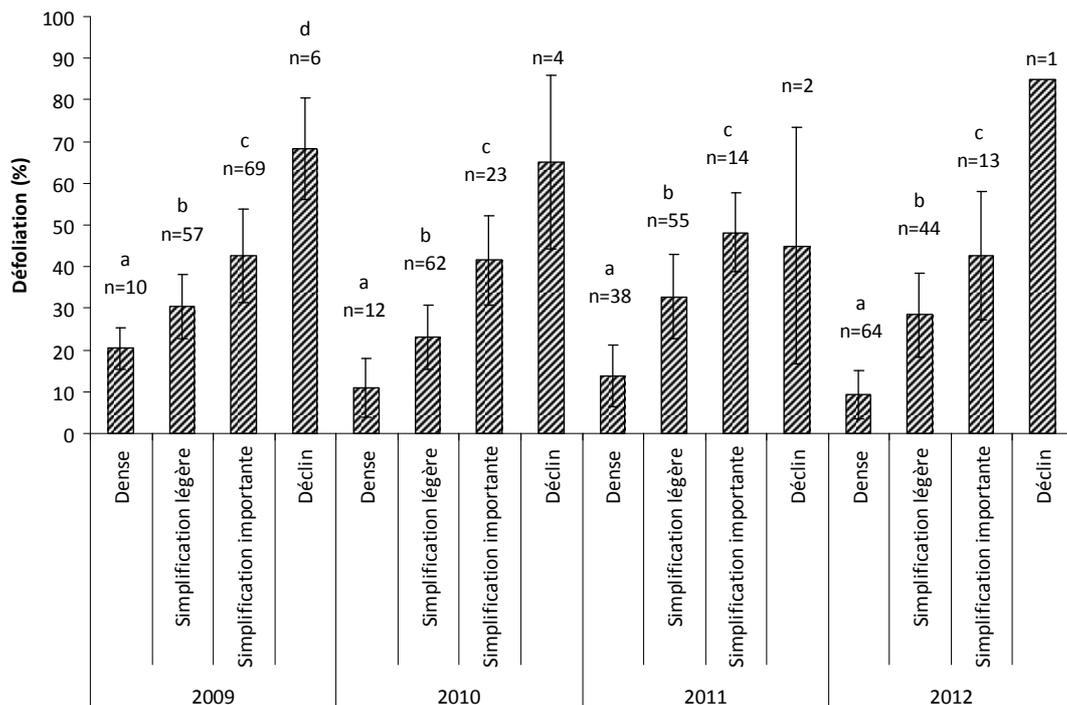


Figure 40 : Pourcentage de défoliation moyen selon la forme du houppier et l'année pour le hêtre

## 6.7. Dommages et symptômes

### 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 diagnostiqués et à chacun des symptômes une côte d'extension est attribuée. Cette côte reflète le pourcentage endommagé de l'organe considéré.

Les graphiques suivants représentent la proportion des dommages observés en 2012 pour chacune des essences. On constate que les principaux symptômes observés chez les chênes sont la décoloration des feuilles dans 44% des cas et les feuilles dévorées dans 26% des cas (voir Figure 41). On observe également une fréquence élevée de dégâts du tronc (19%) et de mortalité des branches (11%). Un arbre peut présenter plusieurs dommages simultanément.

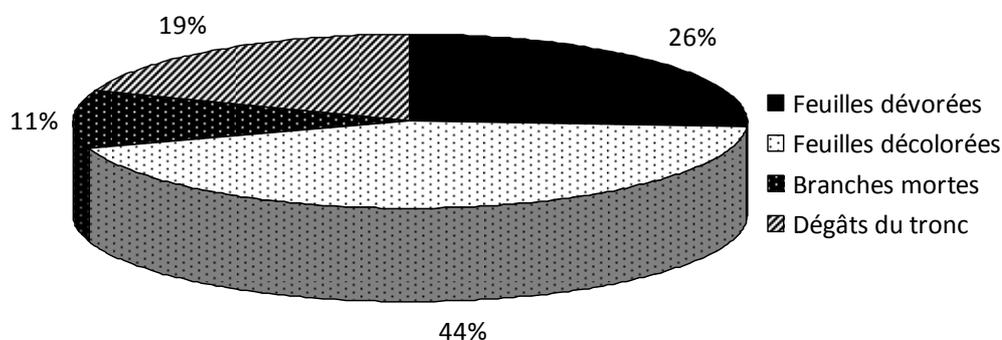


Figure 41: Proportion des dommages observés chez les chênes en 2012

Pour le hêtre, les facteurs de dégradation les plus fréquents sont la mortalité des branches à raison de 50% et les dégâts occasionnés sur le tronc dans 28% des cas. Les hêtres sont également touchés par la décoloration des feuilles (28%). Par contre, les défoliateurs affectent nettement moins les hêtres que les chênes : seuls 5% des dommages sont attribués aux feuilles dévorées.

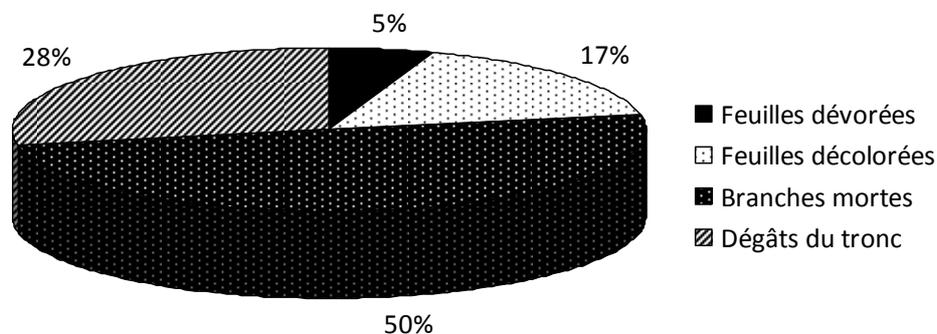


Figure 42 : Proportion des dommages observés chez les hêtres en 2012

Le Tableau 16 reprend l'ensemble des dommages observés en 2012, le nombre d'arbres touchés ainsi que la proportion d'arbres affectés par rapport au nombre total d'arbres observés lors de la campagne. On compte 29% des chênes touchés par les défoliateurs contre 4% pour les hêtres. Différents types de décolorations sont notés pour 38% des chênes et 11% des hêtres. En 2012, 9% des chênes sont touchés par de l'Oïdium principalement. Toutefois, il est certain que l'étendue des dégâts et le nombre d'arbres touchés ont été sous-estimés puisque les feuilles sont observées par le dessous et que l'Oïdium se développe principalement sur la face supérieure des feuilles sous forme d'un feutrage blanc. La mortalité des branches, notamment celle des rameaux de moins de 2cm de diamètre, est très fréquente puisque 8% des chênes mais surtout 32% des hêtres sont touchés.

Tableau 16 : Symptômes et dommages observés et proportion des arbres affectés

Chênes					
	Partie affectée	Symptômes	Nombre de cas	% arbres observés	
<b>Feuilles</b>		Dévorées	19	29	
		Décolorées vert clair à jaune	1	2	
		Décolorées rouge/brun	10	15	
		Décolorées bronze	13	20	
		Décolorées autre couleur	1	2	
		Déformation	1	2	
		Manifestations de champignons	6	9	
<b>Branches</b>	Rameaux latéraux ( $\Phi < 2$ cm)	Mortes ou mourantes	5	8	
	Branches ( $\Phi \geq 2$ et $< 10$ cm)	Mortes ou mourantes	1	2	
	Diamètres variables	Mortes ou mourantes	2	3	
<b>Tronc</b>	Tronc sous le houppier	Collet	Blessures	3	5
		Blessures	1	2	
		Ecoulement de sève	1	2	
		Pourriture	2	3	
	Totalité du tronc	Blessures	1	2	
		Déformations	1	2	
	Hauteur d'homme	Blessures	4	6	
		Déformations	1	2	
<b>Effectif</b>			73		
Hêtres					
	Partie affectée	Symptômes	Nombre de cas	% arbres observés	
<b>Feuilles</b>		Dévorées	6	4	
		Décolorées vert clair à jaune	13	9	
		Décolorées rouge/brun	1	1	
		Décolorées bronze	1	1	
		Mycrophyllie (feuilles nanisées)	3	2	
		Déformations	1	1	
<b>Branches</b>	Rameaux latéraux ( $\Phi < 2$ cm)	Mortes ou mourantes	45	32	
	Branches ( $\Phi \geq 2$ et $< 10$ cm)	Mortes ou mourantes	10	7	
	Branches ( $\Phi \geq 10$ cm)	Mortes ou mourantes	1	1	
		Cassés	1	1	
<b>Tronc</b>	Tronc sous le houppier	Déformations	7	5	
		Blessures	6	4	
		Pourriture	2	1	
	Collet	Déformations	1	1	
		Manifestations de champignons	1	1	
		Blessures	1	1	
		Pourriture	1	1	
	Totalité du tronc	Déformations	3	2	
		Autres manifestations	1	1	
		Blessures	3	2	
	Hauteur d'homme	Déformations	3	2	
		Blessures	3	2	
<b>Effectif</b>			114		

### 6.7.2. Extension des dommages par placettes

Le Tableau 17 classe l'ensemble des cas de décoloration observés en fonction des placettes. Au moins la moitié des arbres sont touchés dans les placettes 3595, 4449, 4469 et 5022.

**Tableau 17 : Proportion des arbres touchés par la décoloration des feuilles en fonction des placettes**

Placette	Typologie	Triage	Nombre d'arbres touchés	% d'arbres touchés par placette
5022	Hêtraie	Trois-Fontaine	7	71
4469	Hêtraie	Bonne Odeur	4	50
4449	Chênaie	Rouge-Cloître	18	50
3595	Chênaie	Bonniers	4	50
4778	Hêtraie	Trois-Fontaine	13	38
4529	Chênaie	Rouge-Cloître	16	37
4151	Hêtraie	Bonne Odeur	12	25
3197	Chênaie	Saint-Hubert	14	21
2791	Chênaie	Saint-Hubert	18	17
3509	Hêtraie	Bonniers	8	12
4467	Hêtraie	Bonne Odeur	11	9

A l'analyse du Tableau 17 et du Tableau 18, on constate que la placette 2791 est touchée à 17% par la décoloration et à 39% par les défoliateurs. Ceux-ci détruisent les jeunes feuilles et les premiers bourgeons, ce qui oblige l'arbre à feuiller une seconde fois dans la saison en puisant dans ses réserves. Cet épuisement peut être aggravé par des défoliateurs plus tardifs (*Lymmantria dispar*) ou par le mildiou qui détériorent les repousses. Les placettes 3197, 3509, 3595, 4151 sont également fortement atteintes par la décoloration et les défoliateurs.

**Tableau 18 : Proportion des arbres touchés par l'attaque de défoliateurs en fonction des placettes**

Placette	Typologie	Triage	Nombre d'arbres touchés	% d'arbres touchés par placette
4151	Hêtraie	Bonne Odeur	6	46
2791	Chênaie	Saint-Hubert	7	39
4147	Hêtraie	Bonne Odeur	5	36
3595	Chênaie	Bonniers	1	25
3197	Chênaie	Saint-Hubert	3	21
3509	Hêtraie	Bonniers	1	12
2877	Hêtraie	Saint-Hubert	1	10
4449	Chênaie	Rouge-Cloître	1	6

### 6.7.3. Dégâts du tronc

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).

Le hêtre, de par sa fine écorce, est particulièrement sensible aux coups de soleil, qui se caractérisent par une nécrose du cambium (côté sud principalement) et des fissurations de l'écorce (Perrin, 1981 ;

Nageleisen *et al.*, 2010). Bien que certains hêtres soient brûlés par le soleil en forêt de Soignes et principalement dans les îlots de vieillissement, aucun arbre du suivi 2012 n'a été recensé comme tel.

Depuis 2011, MM Bram Aertsen et Bart Swerts ont signalé la présence d'*Ustulina deusta* sur le hêtre n°7 de la placette 3197. Cet Ascomycète entraîne la pourriture du bois et affaiblit l'arbre, parfois jusqu'à la mort. À terme, le tronc peut se rompre (Abrams *et al.*, 2008).

## 7. Conclusion

---

La campagne 2012 du suivi sanitaire de la Forêt de Soignes a été réalisée par les agents forestiers de BE-IBGE entre le 16 juillet et le 18 août 2012 sur 21 placettes dont 6 en chênaie et 15 en hêtraie. Au total, 206 arbres (66 chênes et 140 hêtres) ont été observés pour au moins un critère et la défoliation a pu être notée pour 64 chênes et 122 hêtres. En 2012, la défoliation moyenne est de 24% pour les chênes et de 20% pour les hêtres. De plus, on remarque que 50% des effectifs en chênes, centrés sur la médiane, ont des valeurs de défoliation comprises entre 15 et 32% alors que la moitié des hêtres ont des valeurs de défoliation variant entre 5 et 30% (Q1-Q3). En conclusion, les degrés de défoliation sont plus variables pour les hêtres.

En considérant l'ensemble des arbres inclus dans les suivis de 2009 à 2012, on constate que la défoliation moyenne des chênes est passée de 28% à 31% de 2009 à 2010 et de 26% à 24% de 2011 à 2012. Le 1<sup>er</sup> et le 3<sup>e</sup> quartile, 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 et 15% et 32% en 2012. De manière générale, la variabilité des niveaux de défoliation a augmenté avec le temps. Par ailleurs, les moyennes de défoliations sont significativement différentes entre 2010 et 2012.

Cette amélioration de l'état de santé s'observe également pour les hêtres car les défoliations moyennes ont diminué de 37% à 26% de 2009 à 2010 et de 28% à 20% de 2011 à 2012. La distribution des valeurs est plus large comparativement à celle des chênes. En effet, le 1<sup>er</sup> et le 3<sup>e</sup> quartile atteignent 27% et 45% en 2009 ; 15% et 35% en 2010 ; 15% et 40% en 2011 et 6% et 30% en 2012. Statistiquement les moyennes de 2010 et 2011 sont toutes deux significativement différentes à celles de 2009 et 2012.

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 et 2012. La défoliation moyenne des chênes est passée de 30 à 24% de 2009 à 2010 et a atteint 25% en 2012. Ces valeurs sont proches de celles observées pour la totalité des chênes bien qu'en 2010, la moyenne diverge de 7%. Les 10 chênes considérés ont récupéré en moyenne 5% de feuillage en 3 ans sans pour autant que les moyennes soient significativement différentes. Les moyennes de défoliation des 58 hêtres ont diminué de 38 à 31% de 2009 à 2010 et atteint 28% en 2012. La moyenne de 2009 est significativement différente de celle de 2010 et 2012. Par rapport aux moyennes de défoliation pour l'ensemble des arbres, les valeurs diffèrent de maximum 8%, tout en montrant une tendance à la baisse similaire.

D'autres caractéristiques relatives à l'état du houppier ont été analysées et comparées aux années 2009, 2010 et 2011. Premièrement, aussi bien pour le chêne que pour le hêtre, aucune fructification n'a été observée en 2012 alors qu'elle a été particulièrement abondante en 2009. D'autre part, depuis 2009, la structure de la couronne s'améliore nettement pour les chênes et les hêtres. La proportion de chênes ayant une ramification dense s'élève à 63%, alors qu'en 2010, elle atteignait seulement 7%. Pour les hêtres, la tendance est identique puisqu'en 2012, 54% des hêtres sont densément ramifiés contre 12% en 2010. Par ailleurs, la présence de pousses épécormiques est plus généralement observée chez les chênes. En 2012, 19% des chênes possèdent un volume abondant et

32% un volume moyen de gourmands. De nombreux gourmands se sont développés en réponse aux attaques des défoliateurs. Pour les hêtres, 8% présentent de nombreuses pousses secondaires et 89% n'ont rien développé. Depuis 2009, les chênes sont plus largement soumis à la décoloration par rapport aux hêtres. La proportion de chênes ayant leur feuillage décoloré entre 10 et 60% est passée de 32% à 42% de 2011 à 2012. Pour les hêtres, cette même classe de décoloration a également augmenté de 10% (de 6 à 16%) entre 2011 et 2012.

Dans le but de mettre en évidence certains facteurs explicatifs de la défoliation. La relation entre la défoliation et divers critères sont analysés statistiquement au cours des années. Tout d'abord, les coefficients de corrélation et les régressions linéaires indiquent que le déficit foliaire des hêtres augmente significativement 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 2012. Deuxièmement, contrairement aux chênes, le statut social des hêtres permet d'expliquer de manière significative les niveaux de défoliations atteints. Il en résulte que les hêtres dominants ont tendance à être plus défoliés que les codominants ou les dominés. Par ailleurs, la fructification des chênes est restée constante en 2009, 2010 et 2011. L'année 2012 se distingue par une fructification nulle qui peut s'expliquer par la présence importante de chenilles qui ont anéanti la floraison et par conséquent la fructification de 2012. Parallèlement, les hêtres présentant des fainées importantes en 2009 et 2011 ont une défoliation moyenne supérieure, de l'ordre de 40%, ces mêmes années. Finalement, une relation nette existe entre la défoliation et la simplification de la ramification du houppier, tant pour les chênes que pour les hêtres.

Les principaux symptômes observés chez les chênes sont par ordre de fréquence, la décoloration des feuilles, les feuilles dévorées, les dégâts du tronc et la mortalité des branches. Pour les hêtres, les facteurs de dégradation les plus fréquents sont la mortalité des branches, les dégâts sur le tronc, la décoloration des feuilles et les feuilles dévorées.

Par rapport à l'ensemble des arbres évalués, 38% des chênes et 11% des hêtres atteints par différents types de décolorations. On compte également 29% des chênes ayant les feuilles dévorées contre 4% pour les hêtres. En 2012, 9% des chênes sont touchés par de l'Oïdium ; toutefois, il est certain que l'étendue des dégâts et le nombre d'arbres touchés pour ces symptômes ont été sous-estimés par manque de visibilité.

Finalement, lors d'une prochaine campagne, il serait intéressant de répertorier l'ensemble des arbres présents au sein des placettes ainsi que ceux qui sont abattus lors d'éclaircies. De cette manière, l'état sanitaire des arbres pourrait être mis en lien avec la surface terrière des placettes ; cela permettrait de mieux cerner le degré de concurrence, les conditions de lumière et de visibilité des arbres.

## Références bibliographiques

- Abras, S., Fassotte, C., Chandelier, A., Cavelier, M. 2008. *Guide visuel des principales maladies et ravageurs des essences ligneuses des milieux rivulaires en Wallonie*. CRAW - DGRNE, Gembloux, 121 p.
- AWAC-ISSeP, 2010. *Réseau de surveillance de la qualité de l'air. Rapport 2009*. Service Public de Wallonie, 250 p.
- 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.
- Becker, M., Dublois, F. X., Le Tacon, F., 1977. *Types de station, fructification et installation des semis sur les plateaux calcaires du nord-est (Forêt de Haye – Meurthe et Moselle)*. Class. Oxford, 231, 174 p.
- Becker, M., Le Tacon, F., Lévy, G., 1994. *Conjonction des facteurs naturels et des pratiques sylvicoles dans le dysfonctionnement des écosystèmes forestiers*. Revue Forestière Française, 46, 5, 572-578.
- Braem, S., Jonard, M., Vanwijnsberghe, S., Defourny, P., Ponette, Q., 2010. *Bilan de santé de la forêt de Soignes bruxelloise*. Forêt Wallonne, 105, 15-25.
- Braem, S., 2009. *Suivi de l'état sanitaire en Forêt de Soignes bruxelloise*. Rapport complet, 39 p.
- Braem, S., 2010. *Suivi de l'état sanitaire 2010 – Par observation au sol et par télédétection en forêt de Soignes bruxelloise ; par télédétection en forêt wallonne*. Rapport complet, 93 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.
- Daise., J., Claessens, H., Rondeux, J., 2009. *Étude de l'adéquation des essences aux stations forestières de la forêt de Soignes (zone bruxelloise) dans le contexte du changement climatique*. Rapport de la convention Gembloux-Agro-Bio-Tech – IBGE, 392 p.
- Daise J., Claessens H., Vanwijnsberghe S., 2011. *Analyse de l'adéquation actuelle et future des arbres à leur station en forêt de Soignes bruxelloise*. Forêt Wallonne, 110, 3-21.
- Delatour C., 1990. *Dépérissement des Chênes et pathogènes*. Revue forestière française, 42, 2, 182 p.
- Dobbertin, M., Brang, P., 2001. *Crown defoliation improves tree mortality models*. Forest Ecology and Management, 141, 271-284.
- 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.

- Dhôte, J.-F., 1999. *Compétition entre classes sociales chez le chêne sessile et le hêtre*. Revue Forestière Française, 51, 309-325.
- Douzon, G., 2003. *La situation des dépérissements de chênes 2003*. Bilan du DSF Nord-ouest de la santé des forêts en 2003, 2 p.
- 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.
- Eichhorn, J., Szepesi, A., Ferretti, M., Durrant, D. Roskams, P., 2006. *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, 61 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.
- Garrec, J.-P., Kerfourn, C., Laitat, E., 1989. *Etude des surfaces foliaires des arbres dépérissants*. Annals of Forest Science, 46, 547-552.
- Guillaumin, J.-J., Legrand, P., Lung-Escarmant, B., Botton, B., 2005. *L'armillaire et le pourridié-agaric des végétaux ligneux*. INRA, Paris, 504 p.
- Gryseels, M., Prignon, J.-C., Vanwijnsberghe, S., Alaïme P., 2006. *La Forêt de Soignes*. Bruxelles Environnement - IBGE. 44 p.
- 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..
- Huart O., Rondeux J., 2001. *Genèse, évolution et multiples facettes d'une maladie inhabituelle affectant le hêtre en région wallonne*. Forêt Wallonne, 52, 8-19.
- 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.
- Nageleisen L.M., Reuter J.-C., 2006. *Dépérissements de hêtre : retour sur les situations de crise de la hêtraie au cours de la dernière décennie*. Bilan de la santé des forêts en 2006, 7 p.
- Nageleisen, L.-M., 1993. *Les dépérissements d'essences feuillues en France*. Revue forestière française, 45, 605-620.
- Perrin, R., 1981. *Domages causés aux hêtres et aux hêtraies – le champignon*. In : Le Hêtre, INRA, Paris, 613 p.
- Pesson, P., Louveaux, J., 1994. *Pollinisation et productions végétales*. INRA, Paris. 240 p.
- Schmidt, M., 1991. *The interrelation of leaf loss and fruiting in beech*. Allgemeine Forstzeitschrift, 46,501-503.
- Timal, G., 2006. Mise à jour de la carte des peuplements. Document annexe à la convention CDAF-IBGE 2003-2005. 5 pp.
- Vanwijtsberghe, S., (2003). *Plan de gestion de la Forêt de Soignes, partie de Bruxelles-Capitale*. Document public disponible à l'IBGE (Bruxelles). 163p.