

Université catholique  
de Louvain



Bruxelles-Environnement



Earth and Life Institute  
Environmental  
Sciences



# Suivi de l'état sanitaire en forêt de Soignes bruxelloise 2018

**Réalisation**  
**Technicien**  
**Promoteur**

Hugues Titeux  
Frédéric Hardy  
Quentin Ponette

*Novembre 2018*



## Convention UCL – Bruxelles Environnement 2018

### Institutions : UCLouvain

*Earth and Life Institute  
Environmental Sciences*

### Bruxelles-Environnement (BE-IBGE)

Bruxelles Environnement  
Div. Qualité de l'environnement et  
gestion de la nature  
Dpt. Forêt

*Objet de l'action :*

**« Recherche scientifique d'intérêt général relative au suivi de l'état sanitaire en forêt de Soignes bruxelloise »**

**Promoteur :** Prof. Quentin Ponette

### Résumé

Dans le cadre des études relatives aux impacts des changements climatiques, la Région bruxelloise s'est dotée d'un système de suivi sanitaire dont le but est d'évaluer la vitalité actuelle de la forêt mais aussi son évolution au fil des années.

Depuis 2009, les peuplements, purs ou mélangés, des essences majoritaires à savoir le hêtre (*Fagus sylvatica* L.), le chêne sessile (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) et le chêne pédonculé (*Quercus robur* L.), sont observés chaque année en juillet et août.

Depuis 2014, un suivi photographique a été mis en place afin de mieux comprendre les facteurs impliqués dans l'évolution de la défoliation moyenne et de la structure du houppier des hêtres et des chênes. Les photographies sont prises annuellement en été et en hiver.

Les observations se réfèrent au protocole *ICP Forests* mis au point dans le cadre du programme international concerté sur les forêts. Les évaluations sont réalisées à différents niveaux puisqu'elles se rapportent aux conditions d'observation (statut social, concurrence, etc.), à l'état du houppier (défoliation, fructification, décoloration, etc.) et aux dommages visibles affectant l'arbre.

En 2018, 109 hêtres, 40 chênes pédonculés et 10 chênes sessiles, sur 22 placettes, ont été observés par les adjoints forestiers de Bruxelles Environnement. Après application de filtres (statut de l'arbre, visibilité), un échantillon de 128 arbres (43 chênes indigènes et 85 hêtres) a été retenu pour caractériser l'état sanitaire actuel de la forêt de Soignes, son évolution et les relations entre les différents paramètres appréhendés.

Cette année est caractérisée par une fructification très abondante pour les 3 essences suivies. Dans le cas du chêne sessile, il s'agit de la 3<sup>e</sup> année consécutive, ce qui est exceptionnel.

Malgré une sécheresse très prononcée cette année et les sécheresses modérées des années précédentes, nous n'observons pas de dégradation anormale des hêtres en 2018. Leur situation est en effet très similaire à celle de 2016, également caractérisée par une forte fructification.

Par contre, nous observons une dégradation des chênes, caractérisée par une augmentation de la défoliation et une dégradation de la structure de certains arbres. L'évolution de ces arbres affecte significativement la moyenne de l'échantillon dans le cas des chênes pédonculés, mais pas des chênes sessiles. Cette évolution pourrait être liée à la sécheresse de cette année, aux sécheresses des années précédentes et/ou à un épuisement lié à la succession d'épisodes de fructification intense.

**Date de fin** : Novembre 2018.

## Table des matières

<b>Résumé .....</b>	<b>3</b>
<b>Table des figures.....</b>	<b>6</b>
<b>Table des tableaux.....</b>	<b>8</b>
<b>1. Contexte .....</b>	<b>9</b>
<b>2. Objectifs .....</b>	<b>11</b>
<b>3. Description de la forêt de Soignes .....</b>	<b>12</b>
3.1. Composition spécifique .....	12
3.2. Sols.....	12
3.3. Climat.....	15
<b>4. Mise en place de la campagne du suivi sanitaire de 2018.....</b>	<b>17</b>
4.1. Plan d'échantillonnage .....	17
4.2. Protocole d'évaluation.....	20
4.3. La défoliation, indicateur de vitalité des arbres .....	20
4.4. Caractéristiques des arbres observés.....	22
4.4.1. Effectifs et distribution des arbres en classes de grosseurs .....	22
4.4.2. Concurrence – Indice d'ombrage.....	24
4.4.3. Statut social.....	25
4.4.4. Visibilité.....	26
4.5. Encodage et traitement des données.....	27
4.6. Contrôle-qualité.....	27
<b>5. Résultats et discussions.....</b>	<b>30</b>
5.1. Défoliation .....	30
5.1.1. Défoliation moyenne des arbres de la campagne 2018 .....	31
5.1.2. Evolution de la défoliation moyenne de 2009 à 2018 .....	33
5.1.3. Evolution de la défoliation d'un même échantillon d'arbres .....	35
5.1.4. Comparaison avec la situation en Wallonie et en Flandre.....	39
5.2. Fructification.....	41
5.3. Structure de la couronne.....	44
5.4. Pousses épïcormiques .....	48
5.5. Décoloration des feuilles .....	49
5.6. Lien entre la défoliation et d'autres variables.....	50
5.6.1. Analyses statistiques.....	50
5.6.2. Défoliation et circonférence .....	51
5.6.3. Défoliation et concurrence .....	53
5.6.4. Défoliation et décoloration .....	54
5.6.5. Défoliation et fructification.....	56
5.6.6. Défoliation et structure du houppier.....	57
5.7. Dommages.....	58
<b>6. Suivi photographique des houppiers à partir du sol .....</b>	<b>59</b>
<b>7. Conclusions générales et perspectives.....</b>	<b>64</b>
<b>Annexe 1 : Liste des arbres du suivi photographique .....</b>	<b>65</b>

## Table des figures

Figure 1: Proportion des types de peuplements en forêt de Soignes bruxelloise (Braem <i>et al.</i> , 2010)	12
Figure 2: Roche-mère géologique présente sous le limon éolien. Les teintes jaunes présentent les assises à dominance sableuse (source: carte géologique de la Belgique, numérisation: BE-IBGE).....	13
Figure 3 : Les sols de la Forêt de Soignes sont dominés par le type Abc interprété comme étant un sol limoneux à fragipan (source: cartes des sols de Belgique; numérisation BE-IBGE).....	14
Figure 4 : Température et précipitations mensuelles mesurées à la station météorologique d'Uccle, 1981-2010 (IRM, 2011).....	15
Figure 5: Localisation des placettes en hêtraie (étoiles bleues et vertes) et chênaie (croix rouges) ...	19
Figure 6 : Distribution des arbres de l'échantillon analysé en 2018 selon les classes de circonférence .....	23
Figure 7 : Distribution des arbres selon le degré de concurrence pour l'échantillon analysé en 2018	24
Figure 8 : Proportion des statuts sociaux en fonction des essences pour l'échantillon analysé en 2018 .....	25
Figure 9: Distribution des arbres en fonction de la visibilité et de l'essence pour l'échantillon analysé en 2018.....	26
Figure 10 : Distribution des arbres selon la visibilité pour l'ensemble des arbres non dominés observés en 2018. ....	27
Figure 11 : Comparaison des valeurs de défoliation selon les équipes BE et UCL en 2018 ; la surface des bulles illustre le nombre de points de mêmes coordonnées ; la droite continue correspond au rapport 1:1 ; les droites pointillées correspondent aux seuils de +/- 10 %.....	29
Figure 12 : Informations dérivées des graphiques en boîtes à moustaches (box-plot).....	30
Figure 13 : Défoliation des chênes et des hêtres en 2018 (CP= chênes pédonculés ; CS = chênes sessiles ; HE = hêtres) ; les moyennes sont représentées par un point rouge et les valeurs extrêmes par des points noirs .....	31
Figure 14 : Défoliation des chênes (CP= chênes pédonculés ; CS = chênes sessiles) et des hêtres (HE) par placette. Certains box-plots sont incomplets en raison du nombre réduit d'effectifs (c'est le cas lorsque des chênes sont présents en hêtraie, ou inversement) .....	32
Figure 15 : Evolution de la défoliation des chênes pédonculés (CP), des chênes sessiles (CS) et des hêtres (HE) de 2009 à 2018 .....	33
Figure 16 : Evolution de la défoliation des 31 chênes pédonculés observés durant les 5 campagnes de 2013 à 2018 ; la présence d'une lettre commune à deux années signifie que les moyennes associées ne sont pas significativement différentes ( $\alpha = 0.05$ ).....	35
Figure 17 : Evolution de la défoliation des 7 chênes sessiles observés durant les 5 campagnes de 2013 à 2018 ; la présence d'une lettre commune à deux années signifie que les moyennes associées ne sont pas significativement différentes ( $\alpha = 0.05$ ).....	36
Figure 18 : Evolution de la défoliation des 60 hêtres observés tous les deux ans depuis 2012 ; la présence d'une lettre commune à deux années signifie que les moyennes associées ne sont pas significativement différentes ( $\alpha = 0.05$ ) .....	37
Figure 19 : Comparaison des classes de défoliation de 2016 et 2018 pour les 31 chênes pédonculés et 8 chênes sessiles observés ces deux années (la taille des bulles correspond au nombre de points ayant les mêmes coordonnées) .....	38
Figure 20 : Comparaison des classes de défoliation de 2016 et 2018 pour les 67 hêtres observés ces deux années (la taille des bulles correspond au nombre de points ayant les mêmes coordonnées) ..	38
Figure 21 : Evolution comparée des défoliations moyennes de Hêtres en forêt de Soignes bruxelloise (BXL), en Wallonie (RW) et en Flandre (VL) depuis 2010. ....	40
Figure 22 : Evolution comparée des défoliations moyennes de chênes en forêt de Soignes bruxelloise (BXL), en Wallonie (RW) et en Flandre (VL) depuis 2010 .....	40
Figure 23 : Evolution du degré de fructification de 2010 à 2018 pour les chênes et les hêtres.....	42
Figure 24 : Les quatre formes de houppier des chênes, avec leurs codes (Eichhorn <i>et al.</i> , 2010) 41 : ramification dense ; 42 : simplification légère ; 43 : simplification importante ; 44 : déclin.....	44

Figure 25: Fiche de terrain différenciant les 8 formes du houppier du hêtre.....	45
Figure 26 : Distribution des chênes pédonculés selon la structure de la couronne (n= 33).....	46
Figure 27 : Distribution des chênes sessiles selon la structure de la couronne (n=10) .....	46
Figure 28 : Distribution des hêtres selon la structure de la couronne (n=85) ; les codes se réfèrent à la Figure 25.....	47
Figure 29 : Distribution des arbres selon l'abondance des pousses épïcormiques .....	48
Figure 30 : Distribution des arbres selon le pourcentage de décoloration du feuillage.....	49
Figure 31 : Régression linéaire de la défoliation des hêtres en fonction de la circonférence en cm (C150) en 2018 .....	52
Figure 32 : Défoliation des chênes indigènes (CP :chêne pédonculé ; CS :chêne sessile) et des hêtres (HE) selon l'indice d'ombrage en 2018 .....	53
Figure 33 : Défoliation des chênes indigènes (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles) et des hêtres (HE) en 2018 selon l'intensité de la décoloration en 2017 .....	54
Figure 34 : Evolution de la défoliation de 2017 à 2018 selon l'intensité de la décoloration en 2017 (CP : chêne pédonculé ; CS : chêne sessile ; HE : hêtre).....	55
Figure 35 : Distribution de la défoliation des chênes (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles) et des hêtres (HE) selon l'abondance de la fructification en 2018.....	56
Figure 36: Distribution de la défoliation des chênes (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles) et des hêtres (HE) selon la forme du houppier en 2018 (la signification des codes est indiquée aux Figure 24 et Figure 25) .....	57
Figure 37 : Exemples d'augmentation de la défoliation de 2017 à 2018 liée à une fructification intense .....	60
Figure 38 : Exemple de forte fluctuation inter-annuelle de la défoliation non liée aux épisodes de fructification (2016 et 2018) .....	61
Figure 39 : Exemple de faible évolution de la défoliation sur la période 2015-2018 .....	62
Figure 40 : Exemple de dégradation de la cime liée à la mortalité et la perte de branches sur la période 2015-2018 .....	63

## Table des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques et exemples de facteurs de dépérissement. ....	10
Tableau 2 : Valeurs climatiques mesurées en saison de végétation 2018 comparées aux normales mensuelles calculées sur la période 1981-2010 (IRM, Uccle).....	16
Tableau 3 : Placettes des sous-échantillons. Les numéros correspondent aux identifiants des placettes .....	18
Tableau 4 : Effectifs (placettes, arbres) lors des campagnes d'observation de 2009 à 2018 .....	22
Tableau 5 : Moyenne des écarts de défoliation par essence observée en 2018 et résultats des tests t de Student .....	28
Tableau 6: Valeurs moyennes de défoliation par année et par essence (les effectifs sont repris entre parenthèses).....	34
Tableau 7 : Table de contingence relative aux classes de fructification des hêtres en 2016 et 2018 ..	41
Tableau 8 : Table de contingence relative aux classes de fructification des chênes pédonculés en 2017 et 2018.....	43
Tableau 9 : Corrélations entre la circonférence et la défoliation en fonction de l'essence et de l'année .....	51
Tableau 10: Résultats des régressions linéaires entre la circonférence (y ; cm) et la défoliation (x) par année.....	51
Tableau 11: Symptômes et dommages observés sur les chênes pédonculés et proportion des arbres affectés .....	58
Tableau 12: Symptômes et dommages observés sur les hêtres et proportion des arbres affectés.....	58



# 1. Contexte

Depuis 1976, des dépérissements ont été signalés dans les futaies de hêtre, souvent âgées, de la forêt périurbaine de Bruxelles. Ils se sont accentués dans les années 1990, gagnant également divers peuplements de chênes (Herbauts *et al.*, 1998). Le dépérissement est défini par Delatour en 1990 comme étant « un terme de symptomatologie, c'est-à-dire qu'il caractérise un ensemble d'anomalies perceptibles à l'œil sur le terrain. Ces anomalies correspondent à l'idée que l'on se fait d'une détérioration globale de la santé de l'arbre : réduction de la qualité et de la quantité du feuillage ou des pousses, mais surtout mortalité d'organes existants (rameaux en particulier). Le terme inclut aussi une certaine idée d'évolution dans le temps qui traduit le fait que l'issue naturelle pour l'arbre dépérissant est jugée problématique mais pas obligatoirement fatale. Le dépérissement, dont le constat est en fait basé sur un ensemble de symptômes variables selon les cas, ne suppose pas en lui-même des causes particulières et ne doit pas a priori être considéré comme une maladie ».

Certains facteurs peuvent être impliqués dans la susceptibilité des arbres de la forêt de Soignes au dépérissement. Premièrement, la forêt de Soignes se situe à proximité du centre urbain de Bruxelles où la pollution atmosphérique est non négligeable. De plus, les conditions édaphiques sont contraignantes car, à long terme, le sol à *fragipan* restreint l'ancrage racinaire des arbres, ainsi que l'alimentation hydrique et minérale (Daise *et al.*, 2011). Par ailleurs, le sol limoneux de la forêt de Soignes est très sensible au tassement résultant d'exploitations forestières et d'une fréquentation intense. Enfin, la composition de la forêt de Soignes est caractérisée par un déséquilibre de la structure des âges et un manque de résilience des peuplements âgés.

Plus globalement, la forêt de Soignes est également soumise aux changements climatiques. Les impacts attendus sur les écosystèmes forestiers sont les suivants : (i) une augmentation de la température et de la concentration en CO<sub>2</sub> combinée à un allongement de la période de végétation. Ces phénomènes peuvent occasionner une augmentation de la productivité des stations fertiles et une augmentation des carences dans les stations qui le sont moins, avec l'apparition de problèmes sanitaires ; (ii) une augmentation de la xéricité en période de végétation (air et sol) qui peut entraîner des stress hydriques puis des dépérissements ; (iii) une augmentation de la pluviosité en période hivernale susceptible de provoquer des engorgements et donc des dégâts racinaires ; (iv) une augmentation de la fréquence d'événements climatiques extrêmes occasionnant des chablis, des dégâts de gelées hors saison, ... (v) une modification des relations hôtes/parasites et l'apparition de nouveaux parasites qui provoquent des problèmes sanitaires et finalement (vi) une perturbation de la biodiversité (Laurent *et al.*, 2009).

Dans le but d'évaluer l'état de vitalité actuel de la forêt mais aussi son évolution au fil des années, la Région bruxelloise s'est dotée d'un système de suivi sanitaire. Les peuplements, purs ou mélangés, des essences majoritaires à savoir le hêtre (*Fagus sylvatica* L.), le chêne sessile (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) et le chêne pédonculé (*Quercus robur* L.), sont observés chaque année en été et un échantillon d'arbre sont systématiquement photographiés à partir de points fixes au sol.

La vitalité d'un arbre est définie par sa capacité à assimiler les ressources, à survivre aux stress, à réagir aux changements de conditions et à se reproduire (Dobbertin et Brang, 2001). Comme indiqué

précédemment (point 1), le dépérissement d'un arbre est causé par l'interaction de divers facteurs d'importance relative, variables dans l'espace et le temps. Les multiples causes du dépérissement sont généralement hiérarchisées selon trois classes de facteurs (Nageleisen, 1993) (voir Tableau 1).

**Tableau 1 : Caractéristiques et exemples de facteurs de dépérissement.**

	<b>Fact. prédisposants</b>	<b>Fact. déclenchants</b>	<b>Fact. aggravants</b>
<b>Caractéristiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stress permanent</li> <li>- Baisse relative de la productivité</li> <li>- Détermine le degré de résistance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Brusques et intenses</li> <li>- Aggravés par des facteurs prédisposants existants.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Amplification des facteurs déclenchants</li> <li>- Stade final du dépérissement</li> <li>- Mort de l'arbre</li> </ul>
<b>Exemples</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conditions stationnelles (sol, altitude, régime hydrique,...)</li> <li>- Génétique</li> <li>- Climat</li> <li>- Age élevé</li> <li>- Interventions sylvicoles (travaux et coupes)</li> <li>- Pollution atmosphérique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Attaque de défoliateurs ou de pathogènes foliaires (oïdium)</li> <li>- Gel</li> <li>- Sécheresse</li> <li>- Pic de pollution</li> <li>- Tempête</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ravageurs (insectes, champignons, virus, nématodes, etc.)</li> <li>- Incendies</li> <li>- Tornades</li> </ul>

## **2. Objectifs**

Les objectifs principaux du suivi de l'état sanitaire sont, d'une part, d'évaluer l'état de santé actuel de la forêt de Soignes à l'aide de l'indicateur de défoliation et de divers critères d'observation et, d'autre part, d'analyser son évolution depuis 2009 afin de mettre en évidence des tendances et tenter de les expliquer.

### 3. Description de la forêt de Soignes

#### 3.1. Composition spécifique

La forêt de Soignes, d'une superficie totale de 4383 ha, est administrée selon sa division territoriale à 56% par la Région flamande (Agentschap voor Natuur en Bos), à 6% par la Région wallonne (Division de la Nature et des Forêts) et à 38% par la Région de Bruxelles-Capitale (Bruxelles Environnement). En plus de ces trois administrations, certains domaines sont gérés par la Donation Royale, la Fondation Solvay et quelques propriétaires privés.

La superficie de la forêt de Soignes bruxelloise est de 1657 ha (Gryseels *et al.*, 2006). Les peuplements de hêtraies pures en recouvrent 64,1%. La chênaie pure quant à elle s'étend sur 9,4% de la superficie forestière. La hêtraie et la chênaie mélangées représentent toutes les deux un vingtième de la surface. Finalement, 5% de la superficie est occupée par des résineux et 11,4% par des peuplements divers.

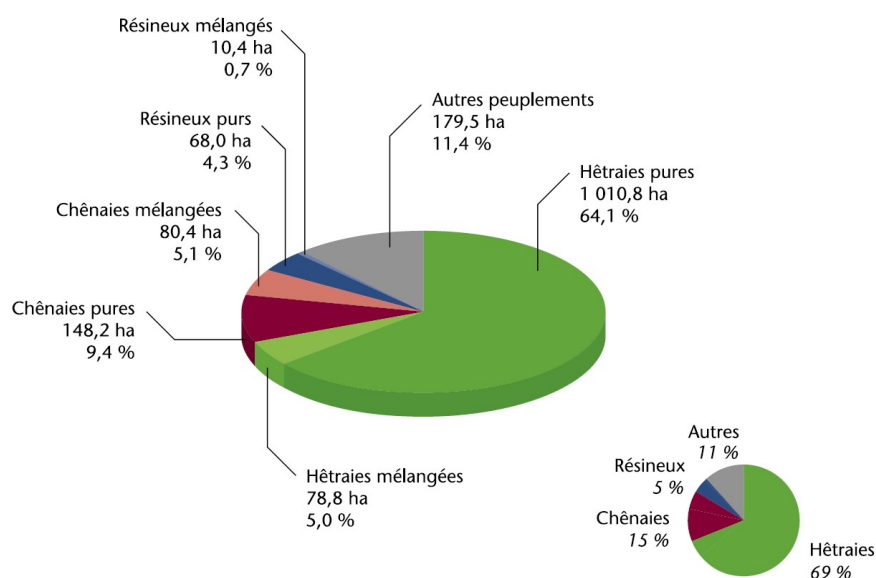
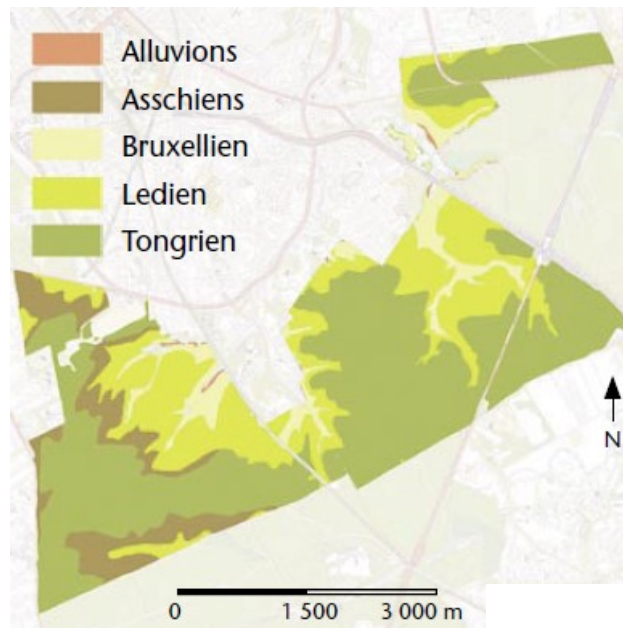


Figure 1: Proportion des types de peuplements en forêt de Soignes bruxelloise (Braem *et al.*, 2010)

#### 3.2. Sols

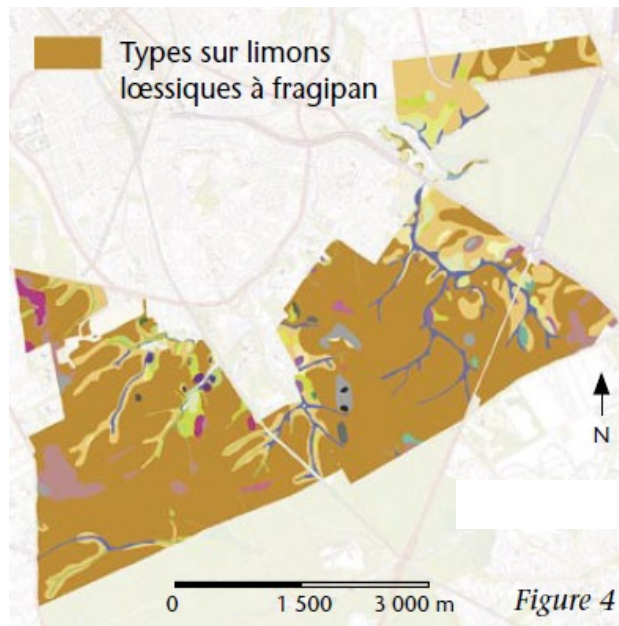
Le sous-sol, est constitué de sable (*bruxellien* et *lédien*) pour un tiers de la surface et d'argile (*asschien* et *tongrien*) sur deux tiers de la superficie (voir Figure 2). Ces argiles, et plus particulièrement les argiles du *tongrien*, entraînent la formation d'une nappe d'eau perchée responsable, pour une forte part, de la mauvaise stabilité du hêtre en forêt de Soignes (Vanwijnsberghe, 2003). Ces substrats sont recouverts d'une couche de loess éolien de texture limoneuse, dont l'épaisseur varie selon le relief. Au contact avec le substrat sous-jacent, les deux matériaux sont parfois mélangés sur une épaisseur de plusieurs dizaines de centimètres



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

Les sols soniens sont de type limoneux non gleyfiés sur près de 85% de la surface. Ces sols sont acides suite à la décarbonatation naturelle des limons de surface. Ce processus limite le développement de la pédofaune qui est nécessaire à une bonne structuration des sols (capacité de filtration et aération). Ils ont également subi un processus de lessivage d'argile conduisant à la formation d'un horizon appauvri en argile en surface, ce qui les rend très sensibles au tassement. Cette fragilité structurale accentuée par la surfréquentation et l'exploitation forestière a un effet dommageable sur les systèmes racinaires des ligneux et est à l'origine d'une réduction de leur pouvoir d'absorption en eau et en éléments nutritifs (Froehlich, 1990). En outre, dans ces sols à faible activité biologique, la restauration structurale spontanée est extrêmement lente (Herbauts *et al.*, 1998).

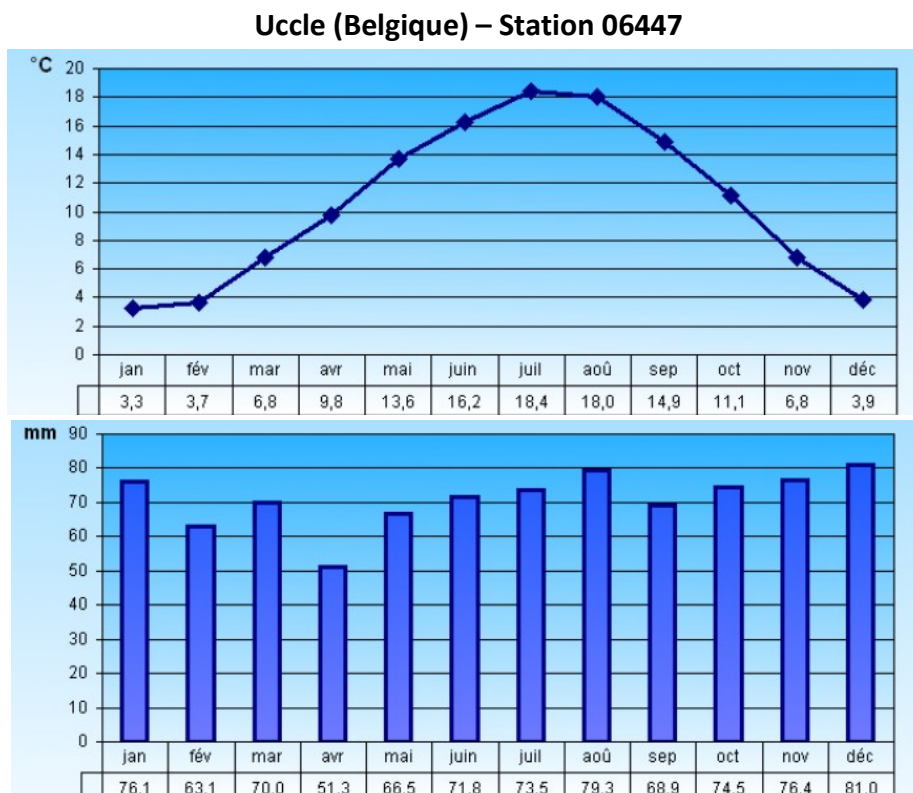
Par ailleurs, la fertilité chimique du sol est très faible en surface (pH H<sub>2</sub>O de l'ordre de 3,5 à 4,5) et plus élevée entre 2 et 4 mètres de profondeur (pH H<sub>2</sub>O de l'ordre de 5 à 7). Sur toute la surface de la forêt, à des profondeurs variables selon les endroits (de 40 à 120 cm de profondeur), se trouve un horizon induré appelé *fragipan* (Figure 3) : horizon d'accumulation des argiles par lessivage, qui a été fortement compacté par l'action du gel lors des dernières glaciations. Cette compaction n'est pas le résultat d'un tassement, mais d'une floculation (« contraction ») extrême des argiles suite à la très forte dessiccation liée à la ségrégation de l'eau dans des lentilles de glace. Au niveau du fragipan, les racines ne peuvent pénétrer que par des interstices plus meubles qui forment des polygones. Les racines qui parviennent à traverser l'horizon induré (au-delà de 120 cm) se ramifient de nouveau et permettent de puiser l'eau et les éléments nutritifs nécessaires aux arbres (Langohr, 2010). Par contre, à long terme, certaines de ces racines rencontrent une telle résistance latérale qu'elles ne peuvent grossir et sont progressivement asphyxiées.



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

### 3.3. Climat

Le climat belge est de type tempéré atlantique. Sur base des moyennes calculées de 1981 à 2010, à Uccle, la température moyenne annuelle est de 10.5°C et les précipitations annuelles s'élèvent à 852 mm. Les températures du mois le plus chaud et le plus froid atteignent respectivement une moyenne de 18.4°C en juillet et de 3.3°C en janvier. Les précipitations mensuelles oscillent entre 51.3 mm et 81 mm comme illustré à la Figure 4.



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

Les valeurs météorologiques mesurées à Uccle durant la période de végétation de 2018 sont présentées au

Tableau 2. Par rapport aux normales mensuelles observées de 1981 à 2010, les températures sont anormalement élevées en avril, mai et juillet. Les précipitations sont très anormalement basses en mai et juin, et anormalement basse en juillet. Elles sont également sous la normale en août et septembre. Globalement, la période de végétation 2018 a été exceptionnellement chaude et sèche.

Tableau 2 : Valeurs climatiques mesurées en saison de végétation 2018 comparées aux normales mensuelles calculées sur la période 1981-2010 (IRM, Uccle)

	P (mm)	P normale (mm)	T moy (°C)	T normale (°C)
Avril 2018	66.3	51,3	13.0	9,8
Mai 2018	13.9	66,5	16.3	13,6
Juin 2018	15.8	71,8	18.1	16,2
Juillet 2018	49.7	73,5	22.0	18,4
Août 2018	69.2	79,3	19.4	18
Sept. 2018	65.3	68.9	15.4	14.9



## 4. Mise en place de la campagne du suivi sanitaire de 2018

Les activités suivantes ont été réalisées en 2018 :

- (i) Le suivi de l'état sanitaire de 22 placettes de la forêt de Soignes, incluant :
  - a. La mise à jour du plan d'échantillonnage
  - b. Les observations réalisées par les adjoints forestiers conformément au protocole *ICP Forests*
  - c. La mise en place du suivi photographique des houppiers
- (ii) Le contrôle qualité, comprenant
  - a. La formation pratique des adjoints forestiers le 29 juin 2018
  - b. La revisite de 7 placettes du suivi sanitaire par l'UCL
- (iii) Le traitement et l'interprétation des données

### 4.1. Plan d'échantillonnage

Dans un souci de représentativité des peuplements de la forêt de Soignes bruxelloise (§ 3.1.), les 34 placettes de suivi sanitaire sont situées exclusivement dans les peuplements de chênes et de hêtres, purs ou mélangés, de plus de 60 ans. L'âge et le type de peuplement sont issus de la carte des peuplements élaborée par Grégory Timal (Centre de Développement Agro-Forestier à Chimay) en 2006. Les placettes sont positionnées sur la grille systématique de l'Inventaire du Patrimoine Forestier de la Région de Bruxelles-Capitale, mis en place par Alderweireld (2007). Cette grille a une maille de 400m x 400m minimum. Pour réduire la charge de travail des adjoints forestiers, la grille des 34 placettes du suivi sanitaire a été partagée en trois sous-échantillons (Braem, 2009). Le premier, visité tous les ans, est constitué des 6 placettes en chênaie. Les deux autres ont été formés en scindant la grille des 28 placettes en hêtraie et en ne retenant qu'une rangée de placettes d'alignement nord-sud sur deux. Ces deux sous-échantillons comportent chacun une quinzaine de placettes et sont visités alternativement d'une année à l'autre (Tableau 3 et Figure 5).

Les placettes observées en 2018 n'ont subi aucune coupe importante au cours de ces 2 dernières années d'observations. Le plan d'échantillonnage n'a donc pas été modifié.

Dans un souci de continuité, nous nous basons sur le plan d'échantillonnage suivi lors des années précédentes. Dans ce protocole, les visites en hêtraie ont été planifiées en alternant 2 sous-échantillons de placettes sur une base bisannuelle. Cette alternance permet de disposer d'un échantillon largement représentatif des situations (sol, âge, ...), tout en limitant le travail de terrain. Toutefois, cette alternance engendre des soucis pour les analyses statistiques relatives à l'évolution inter-annuelle, ainsi que et pour l'interprétation des résultats du suivi photographique.

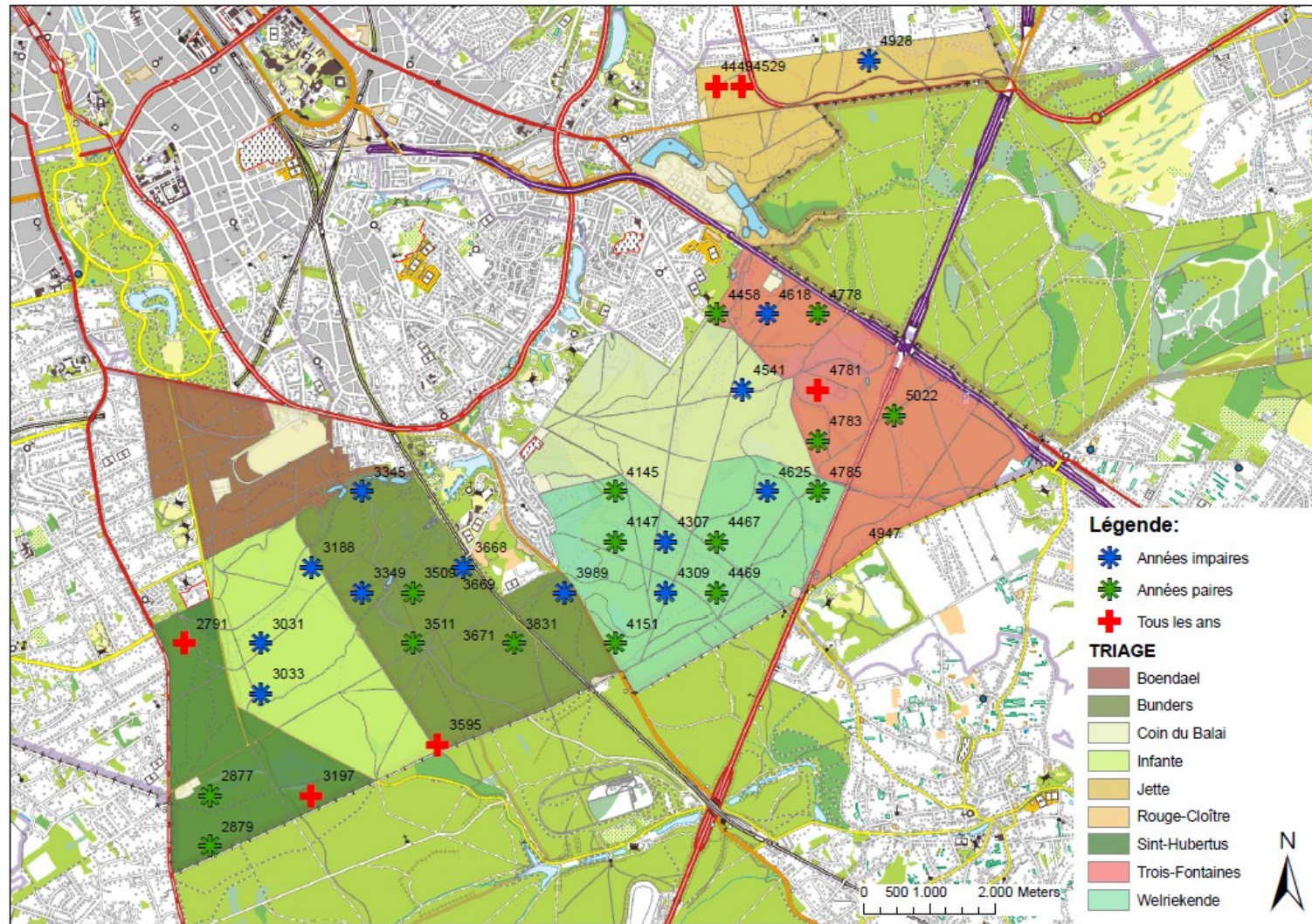
Nous avons donc proposé d'instaurer un suivi annuel (bisannuel jusqu'alors) sur les hêtres faisant l'objet du suivi photographique (cf Annexe) soit 30 arbres. Cet échantillon, déjà sélectionné pour être représentatif de l'échantillon global, permettra d'établir une continuité des observations et servira de lien entre les deux sous-échantillons « années paires » et « années impaires » pour les analyses de tendances.

Afin de ne pas engendrer de travail supplémentaire pour les agents, l'intensification du suivi (transition de bisannuel à annuel) pour ces 30 arbres doit être compensé par l'abandon du suivi (bisannuel) de certaines placettes totalisant environ 30 arbres : les 3188, 3509, 3511, 4151, 4307 et 4625. Ces dernières sont représentatives de l'ensemble de l'échantillon et sont réparties sur les deux brigades ainsi que dans les deux groupes (paires et impaires).

Pour les hêtres non sélectionnés pour le suivi photographique, l'évaluation continuera à être effectuées selon une alternance bisannuelle comme indiqué dans la table ci-dessous.

**Tableau 3 : 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, 3831, 4145, 4147, 4458, 4467, 4469, 4778, 4783, 4785, 5022	3031, 3033, 3345, 3349, 3668, 3989, 4309, 4541, 4618, 4928
<b>Placettes en chênaie</b>	2791, 3197, 3595, 4449, 4529, 4781 (6 placettes)	
<b>Arbres du suivi photo</b>	3031 (2, 4, 5, 6, 9), 3345 (2, 4), 3349 (2, 3), 3989 (2), 4309 (1, 2, 3, 4, 5), 4618 (7, 12)	2877 (5, 7, 8, 9, 10), 2879 (1), 4145 (1, 8), 4147 (18, 19, 20), 4469 (2, 3, 4), 4778 (15), 5022 (2)



Author: A. Delente (2013)

Figure 5: Localisation des placettes en hêtraie (étoiles bleues et vertes) et chênaie (croix rouges)

Les arbres sélectionnés pour le suivi de l'état sanitaire sont :

- les individus ayant une circonférence à 1m50 égale ou supérieure à 80 cm. Chaque année, les arbres atteignant ce seuil de circonférence sont localisés et observés (4 cette année).
- les arbres dominants ou co-dominants dont le houppier capte la lumière directe. Les arbres surcimés ne sont donc pas pris en compte car ils sont trop influencés par la concurrence.

Le protocole prévoit qu'en hêtraie, 10 arbres (hêtres ou chênes) au plus soient considérés dans un rayon maximum de 18 m à partir du centre de la placette. En chênaie, par contre, l'effectif ne doit pas excéder 15 chênes indigènes dans un rayon maximum de 30 m. De plus grandes placettes sont établies en chênaies afin de renforcer les effectifs en chênes et d'obtenir un échantillon représentatif de la forêt de Soignes bruxelloise.

Toutefois, avant 2013, le nombre d'arbres observés dans certaines placettes était supérieur à celui préconisé par le protocole. Par conséquent, la règle précédemment citée est appliquée uniquement pour les nouvelles placettes de remplacement depuis 2013. Les anciennes placettes, quant-à-elles conservent les mêmes effectifs afin, d'une part, de poursuivre le suivi de l'ensemble des arbres et, d'autre part, de bénéficier d'un échantillon plus large qui permet d'augmenter la confiance que l'on tire de la généralisation des résultats. Le fait d'avoir des effectifs différents selon les placettes n'est pas problématique car l'objectif de l'étude n'est pas la comparaison inter-placette

En 2018, la campagne d'observation a été coordonnée par MM. Bram Aertsen et Bart Swerts désignés correspondants-observateurs parmi les adjoints forestiers.

## **4.2. Protocole d'évaluation**

Le protocole suivi lors de la campagne a été conçu dans le cadre du programme international concerté sur les forêts (*JCP Forests*). L'objectif est d'évaluer différents critères tels que la défoliation, la décoloration, la fructification, les dommages afin d'estimer la vitalité de l'arbre. Pour chacun des arbres, trois types d'observations sont réalisées : (i) la description des conditions d'observation, (ii) l'évaluation de l'état du houppier et (iii) la description des dommages (Eichhorn *et al.*, 2010).

Chaque arbre observé porte un numéro et se localise grâce à l'azimut et à la distance mesurés à partir du centre de la placette. Les observations sont notées sous forme de codes chiffrés sélectionnés parmi une liste de choix multiples, repris dans le document de terrain « aide-mémoire ». L'évaluation de l'état du houppier est effectuée dans la partie appelée « couronne observable », définie par la partie du houppier non concurrencée par les arbres voisins, ni par la partie supérieure de ce même houppier. Les dommages sont, quant à eux, estimés sur les différentes parties de l'arbre (houppier, tronc, collet).

## **4.3. La défoliation, indicateur de vitalité des arbres**

La défoliation et la transparence de la couronne sont les indicateurs généralement utilisés pour estimer la vitalité des arbres dans les programmes de monitoring (Dobbertin, 2005). En effet, la défoliation est un critère intégrateur qui reflète l'influence des conditions stationnelles (sol, historique du site, etc.), des caractéristiques individuelles (âge, provenance), des fluctuations

climatiques (sécheresse), des facteurs de stress (champignons, insectes), des facteurs anthropiques (exploitation, coupes, etc.). En revanche, il faut garder à l'esprit que la défoliation est un bon indicateur reflétant la perte de vitalité mais il ne permet pas à lui seul de mettre en évidence l'ensemble des facteurs affectant la santé de l'arbre. De plus, la réduction de la biomasse foliaire peut être considérée comme un mécanisme de régulation transitoire et non comme un mécanisme de dépérissement lorsque cette diminution est réversible. Notons toutefois une exception, celle du rabotage de cime qui est un processus de réversibilité « apparente » puisqu'il ne reflète pas un regain de vitalité.

Par ailleurs, il faut rester prudent dans l'interprétation des résultats car l'évaluation de la défoliation présente certaines faiblesses, présentées ci-dessous.

La cime observable évolue dans le temps car d'une part, (i) les coupes réalisées au sein des placettes modifient l'état de concurrence des cimes et donc les conditions de visibilité qui influencent, selon les cas, la note de défoliation et d'autre part, (ii) la cime est reconstituée par le développement de branches basses lorsque, par un phénomène de descente de cime, les branches situées au sommet de la couronne perdent leur vitalité, meurent et tombent sous l'effet du vent. Le suivi photographique des houppiers à partir du sol, mis en place en 2015 sur une sous-échantillon de 40 arbres, pourrait notamment permettre de suivre l'évolution de la cime observable et de mieux comprendre les évolutions de la défoliation.

D'autre part, la cotation d'un arbre laisse place à une certaine subjectivité qui varie d'un observateur à l'autre. C'est pourquoi, des séances d'inter-calibration sont indispensables pour minimiser le biais causé par l'effet observateur.

A une échelle plus large, la sélection de nouvelles placettes plus ou moins jeunes peut faire varier la distribution des arbres en termes de circonférence et introduire un biais dans l'analyse de l'évolution de l'état sanitaire. De fait, les arbres d'intérêt diffèrent d'une année à l'autre suite notamment au remplacement des placettes régénérées. De plus, une diminution du déficit foliaire moyen pourrait être due à l'enlèvement préférentiel d'arbres dépérissants lors des éclaircies. L'évolution dans le temps de la moyenne globale doit donc être interprétée avec prudence. Afin d'éviter ces biais, il est possible d'étudier l'évolution d'un sous-échantillon d'arbres dont l'état sanitaire a été évalué sur l'ensemble de la période considérée. Toutefois, cette approche peut induire un biais en sens opposé puisque les arbres présentant une défoliation importante en début de période ont plus de chance d'être exclus de l'échantillons.

#### 4.4. Caractéristiques des arbres observés

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

Depuis 2012, aucun remplacement de placette n'est intervenu, mais les effectifs sont en diminution progressive (Tableau 4). Certaines placettes ont en effet subi des éclaircies après identification des arbres d'avenir, avec comme corollaire, l'enlèvement de quelques arbres dans les placettes du suivi sanitaire. Ces coupes étant faibles et réparties sur l'ensemble de la forêt, la bonne représentativité de l'échantillonnage au niveau de la forêt de Soignes bruxelloise est maintenue. De plus certains arbres ne sont plus inclus dans l'échantillon à partir du moment où ils sont dominés. D'autres part, certains nouveaux arbres (3 hêtres et un chêne pédonculé) ont été inclus dans l'échantillon cette année car ils ont atteint la circonférence de 80 cm, considérée comme le seuil de sélection.

**Tableau 4 : Effectifs (placettes, arbres) lors des campagnes d'observation de 2009 à 2018**

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
<b>Placettes</b>	34	21	19	21	19	21	19	21	19	22
<b>Chênes pédonculés</b>	9	68	1	37	47	45	45	44	43	40
<b>Chênes sessiles</b>	1	7		10	7	10	8	8	7	10
<b>Chênes non déterminé</b>	2	1					1		1	
<b>Hêtre</b>	119	115	70	111	102	124	106	119	106	109
<b>Total arbres</b>	131	191	71	161	157	179	160	171	157	159

Parmi ces arbres, certains n'ont pas reçu de cotation pour la défoliation en raison d'une visibilité trop réduite. Dès lors, les analyses statistiques pour 2018 portent sur un échantillon de 85 hêtres, 33 chênes pédonculés et 10 chênes sessiles.

La ventilation des effectifs retenus selon les classes de circonférence est illustrée à la Figure 6.

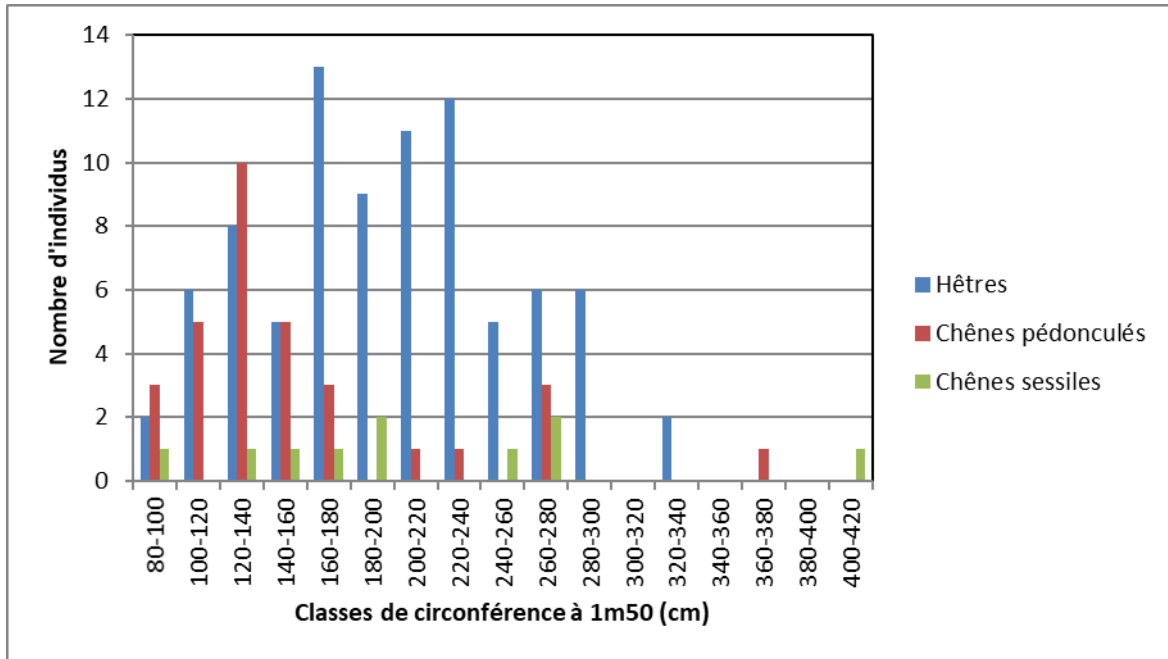


Figure 6 : Distribution des arbres de l'échantillon analysé en 2018 selon les classes de circonférence

#### 4.4.2. Concurrence – Indice d’ombrage

La concurrence donne une indication quant à l’espace disponible pour le développement de la couronne. L’indice d’ombrage observé sur le terrain reflète donc la fermeture locale du couvert grâce à l’évaluation du nombre de côtés du houppier en contact avec d’autres cimes. Cet indice est distribué en 5 classes allant de « croissance libre » à « couronne touchée par quatre côtés ». Les arbres en sous-étage sont exclus de cet échantillon. Il est important de mentionner que ce critère ne concerne que la situation actuelle ; les arbres en croissances libres ou faiblement concurrencés ont souvent été débarrassés de leurs concurrents lors de récentes coupes d’éclaircies.

La plupart des hêtres et des chênes pédonculés sont touchés par 3 ou 4 côtés, tandis que les chênes sessiles sont moins concurrencés ; la plupart d’entre eux sont en contact avec les houppiers voisins sur 2 côtés.

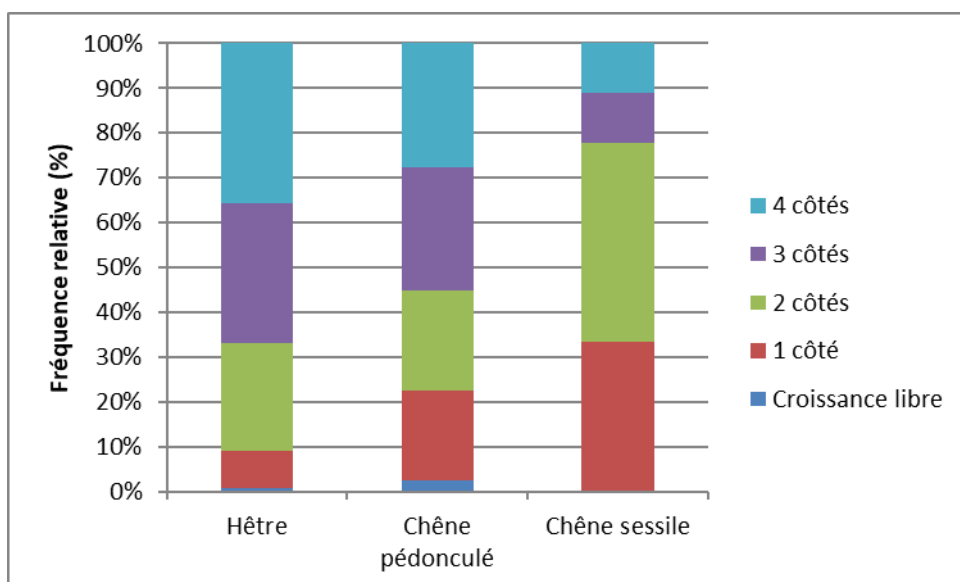


Figure 7 : Distribution des arbres selon le degré de concurrence pour l’échantillon analysé en 2018

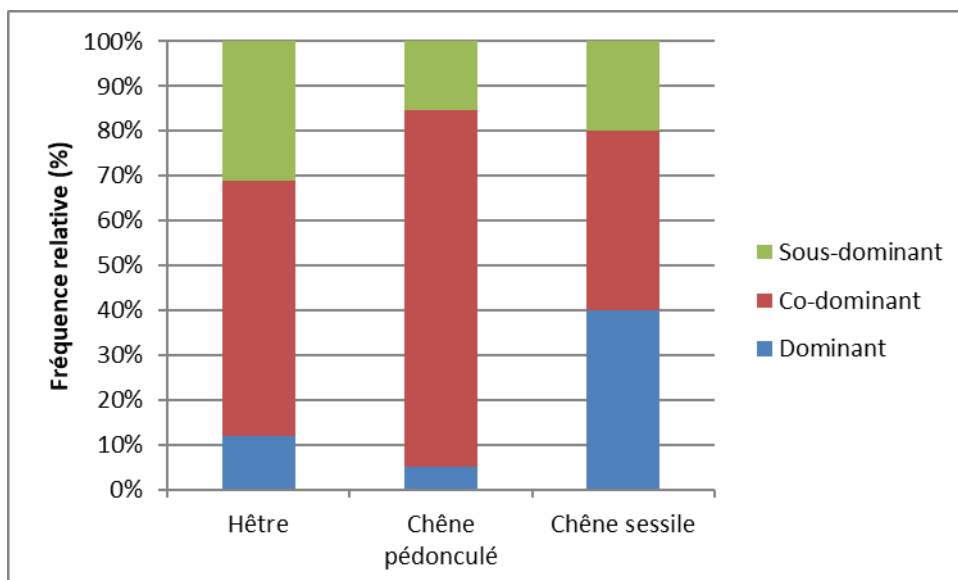


#### 4.4.3. Statut social

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 actuellement en croissance libre ;
- ii. Codominant : arbre dont la couronne s'insère dans le niveau moyen de la canopée ;
- iii. Sous-dominant : arbre dont la couronne, bien qu'insérée dans la canopée, est légèrement en dessous de la hauteur moyenne de la canopée ;
- iv. Dominé : arbre largement surcimé par les houppiers voisins et ne recevant aucune lumière directe. Ces arbres ne sont pas inclus dans l'échantillon.

Comme l'indique la Figure 8, le statut « arbre codominant » est le mieux représenté : 80% des chênes pédonculés, 60% des hêtres et 40% des chênes sessiles sont co-dominants.



**Figure 8 : Proportion des statuts sociaux en fonction des essences pour l'échantillon analysé en 2018**

#### 4.4.4. Visibilité

La visibilité concerne la possibilité d'observer le houppier de façon optimale, soit en vue latérale, sous un angle d'environ 45°. Quatre catégories sont définies :

- i. Couronne entièrement visible ;
- ii. Couronne partiellement visible ;
- iii. Couronne partiellement visible mais à contre-jour ;
- iv. Couronne non visible due à la présence des houppiers voisins : le houppier est observable uniquement par le dessous.

La visibilité est un facteur limitant et une source d'erreur pour la caractérisation de la couronne. De fait, lorsque la visibilité de la couronne est réduite à cause des houppiers voisins, la partie observable est extrapolée à l'ensemble de la couronne. Dans certains cas de non visibilité, les observateurs se sont abstenus de toutes cotations relatives à la défoliation, à la décoloration et la fructification. Les arbres concernés sont exclus de cet échantillon.

La Figure 9 indique que parmi les arbres cotés pour la défoliation (constituant l'échantillon pour les analyses statistiques), seuls 12% des chênes sessiles, et 28% des chênes pédonculés et 42% des hêtres présentent une couronne bien visible. Pour 10% des hêtres et 32% des chênes sessiles, la couronne est non visible latéralement, ce qui signifie que ces arbres ont été observés par le bas.

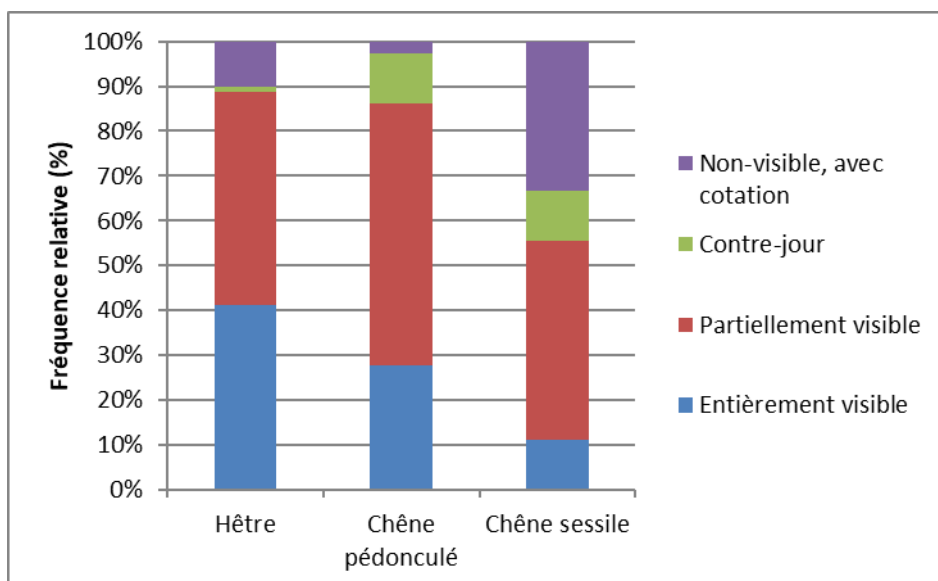
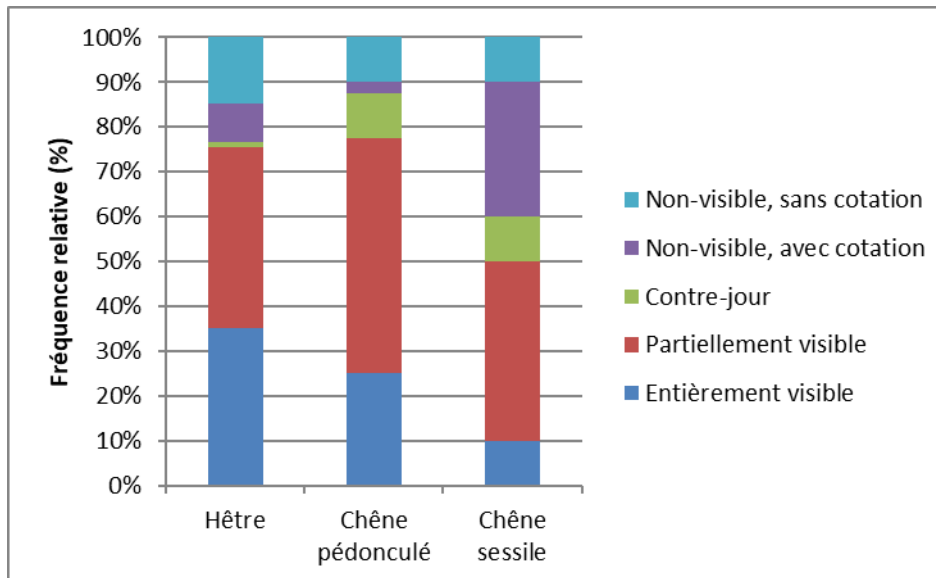


Figure 9: Distribution des arbres en fonction de la visibilité et de l'essence pour l'échantillon analysé en 2018

Si l'on se réfère à l'ensemble des arbres observés non dominés, nous constatons qu'une proportion significative d'arbres (15% des hêtres et 10% des chênes) n'ont pas reçu de cotation pour la défoliation en raison de leur très mauvaise visibilité (Figure 10). Vu qu'il s'agit essentiellement de jeunes arbres dans des peuplements encore denses, nous pouvons suspecter que leur exclusion provoque un biais dans les résultats : valeurs de défoliation moyennes surestimées. Toutefois, l'attribution d'une cote de défoliation dans ces conditions est extrêmement délicate.



**Figure 10 : Distribution des arbres selon la visibilité pour l'ensemble des arbres non dominés observés en 2018.**

#### 4.5. Encodage et traitement des données

L'ensemble des données recueillies durant la campagne 2016 ont été encodées dans la base de données MS Access, puis exportées en *MS Excel* pour préparer les traitements statistiques (logiciel *JMP pro 12.2*).

#### 4.6. Contrôle-qualité

La méthode de diagnostic de l'état sanitaire étant basée sur des observations visuelles, le résultat est fortement influencé par l'appréciation et l'expérience de l'observateur. Afin de s'assurer de la fiabilité des données dans ces conditions, le protocole prévoit des mécanismes d'ajustement qui s'effectuent à deux niveaux : (i) en amont, la « calibration » des observateurs avant la campagne d'observation ; (ii) en aval, le « contrôle » des observations de terrain par une équipe de référence qui participe elle-même à des calibrations au niveau européen.

Les adjoints forestiers BE-IBGE sont formés chaque année depuis 2009. Depuis 2012, la formation se focalise sur l'application du protocole *ICP Forests* plutôt que sur l'aspect théorique. Les arbres d'entraînement sont les mêmes qu'en 2016, sélectionnés sur la 2<sup>e</sup> brigade. Cette méthode assure

l'observation d'arbres présentant des morphologies et des états sanitaires variés en minimisant le temps de déplacement.

Pour assurer le contrôle-qualité des données, l'équipe de référence de l'UCL a revisité 7 placettes réparties sur les deux brigades durant le mois de juillet : 5 placettes en hêtraie (n° 2877, 2879, 3197, 4147, 4785) et 2 placettes en chênaie (n° 2791 et 4781). Au sein de ces placettes de contrôle, l'ensemble des observations se rapportant aux conditions d'observation, à l'état du houppier et à l'évaluation des dommages et symptômes a été relevé.

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

Un total de 57 arbres a été contrôlé, comprenant 35 hêtres, 12 chênes pédonculés et 10 chênes sessile, soit respectivement 41%, 36% et 100% des effectifs retenus pour le diagnostic sanitaire (voir Tableau 1).

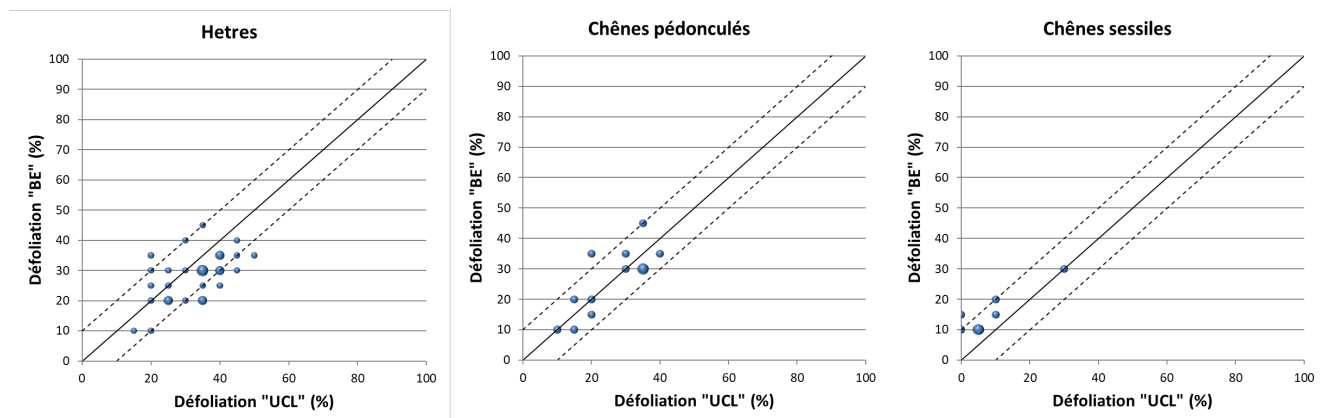
Toutefois, des différences anormales ont été notées pour les arbres de la placette 4147, et l'observateur de l'UCL a signalé des difficultés pour identifier les arbres, car les arbres repères ont été remplacés sur cette placette suite à une éclaircie l'année dernière. Les résultats relatifs à cette placette ne seront donc pas considérés dans le contrôle qualité, et il est important d'y prévoir une visite conjointe avant la prochaine saison d'observation afin de garantir une bonne identification des arbres. Pour l'analyse statistique, le nombre d'arbres retenus est donc de 29 hêtres, 12 chênes pédonculés et 7 chênes sessiles, représentant respectivement 34%, 36% et 70% des effectifs, ce qui reste largement supérieur au quota spécifié dans la méthode (5%).

La proportion de cote de défoliation ne variant pas de plus de 10% près entre les deux équipes atteint 79% pour les hêtres, 92% pour les chênes pédonculés et 86% pour le chêne sessile. Le critère de qualité est donc rencontré pour les 3 essences.

**Tableau 5 : Moyenne des écarts de défoliation par essence observée en 2018 et résultats des tests t de Student**

	Effectif de contrôle	Proportion contrôlée (%)	Défoliation moyenne UCL (%)	Défoliation moyenne BE- (%)	Moyenne des écarts BE – UCL(%)	Résultat test t de Student
<b>Hêtres</b>	29	34	32.2	27.9	-4.3	Prob.>  t  = 0.01*
<b>Chênes pédonculés</b>	12	36	25.4	26.2	0.8	Prob.>  t  = 0.67
<b>Chênes sessiles</b>	7	70	8.6	15.7	7.1	Prob.>  t  = 0.008*

D'autre part, nous observons que la moyenne des écarts de défoliation entre IBGE et l'UCL est de -4.3 % pour les hêtres, de +1% pour les chênes pédonculés et de +7% pour les chênes sessiles (Tableau 5). Les tests appariés (Student) ainsi que les graphes comparatifs (Figure 11) montrent que les écarts observés pour les hêtres et les chênes sessiles sont significatifs. En ce qui concerne les hêtres, les résultats sont très proches de ceux de 2016, qui était aussi une année de fructification abondante. La présence de faines en grand nombre complique en effet l'évaluation de la défoliation. En ce qui concerne les chênes sessiles, il convient de signaler que la plupart des arbres sont très peu visibles et uniquement observables par le bas, ce qui conduit généralement à une surestimation dans le cas des chênes.



**Figure 11 : Comparaison des valeurs de défoliation selon les équipes BE et UCL en 2018 ; la surface des bulles illustre le nombre de points de mêmes coordonnées ; la droite continue correspond au rapport 1:1 ; les droites pointillées correspondent aux seuils de +/- 10 %.**

Globalement, nous pouvons conclure que les résultats du contrôle sont satisfaisants, mais qu'il faudra vérifier l'identification des arbres sur la placette 4147 début 2019 et s'entraîner à l'évaluation de la défoliation sur des hêtres chargés de faines lors de la prochaine fructification abondante.

## 5. Résultats et discussions

### 5.1. Défoliation

La plupart des résultats concernant la défoliation sont présentés sous forme de « box-plots ». Les informations disponibles dans ce type de représentation sont expliquées à la Figure 12.

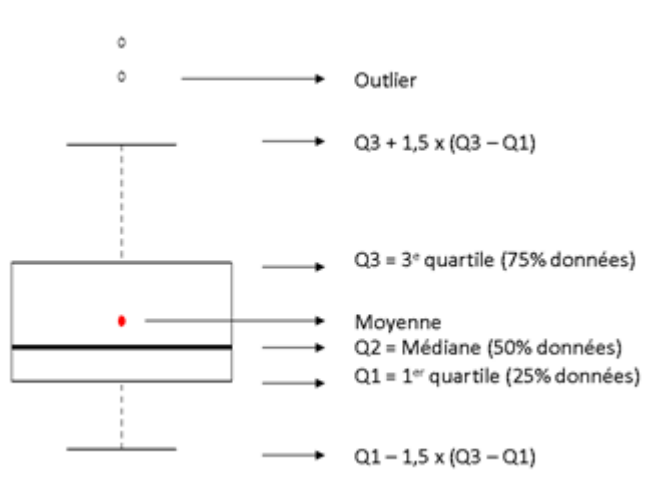
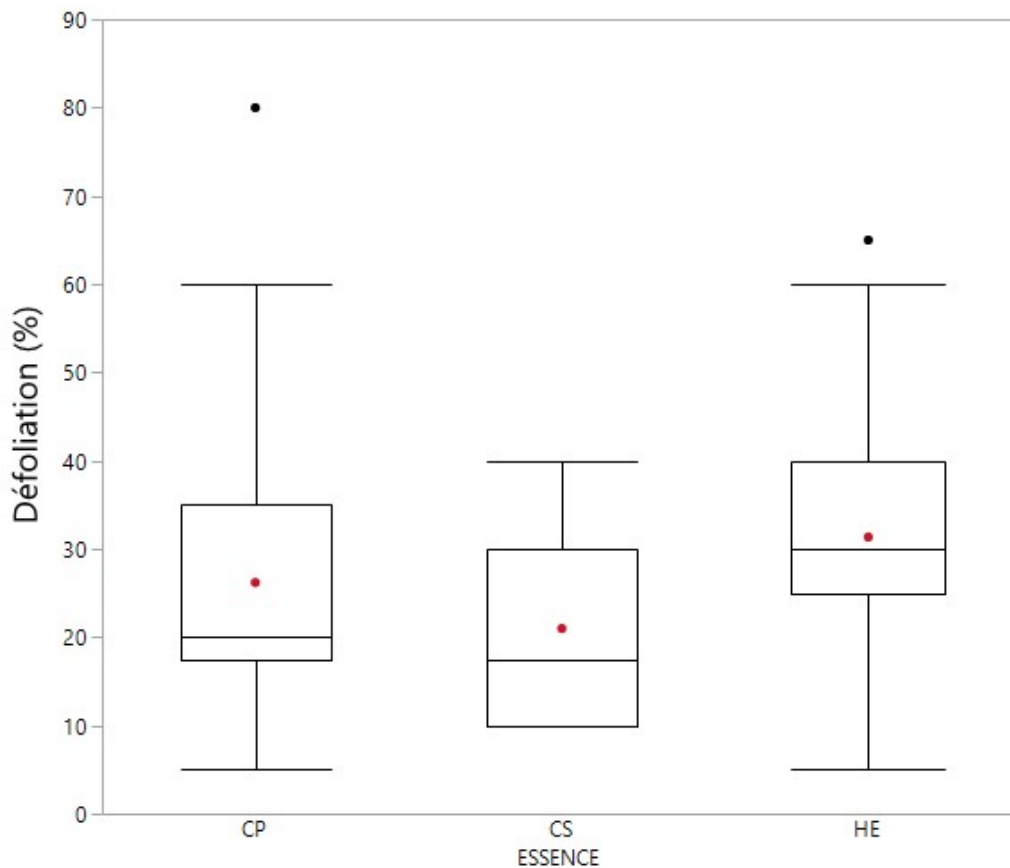


Figure 12 : Informations dérivées des graphiques en boîtes à moustaches (box-plot)

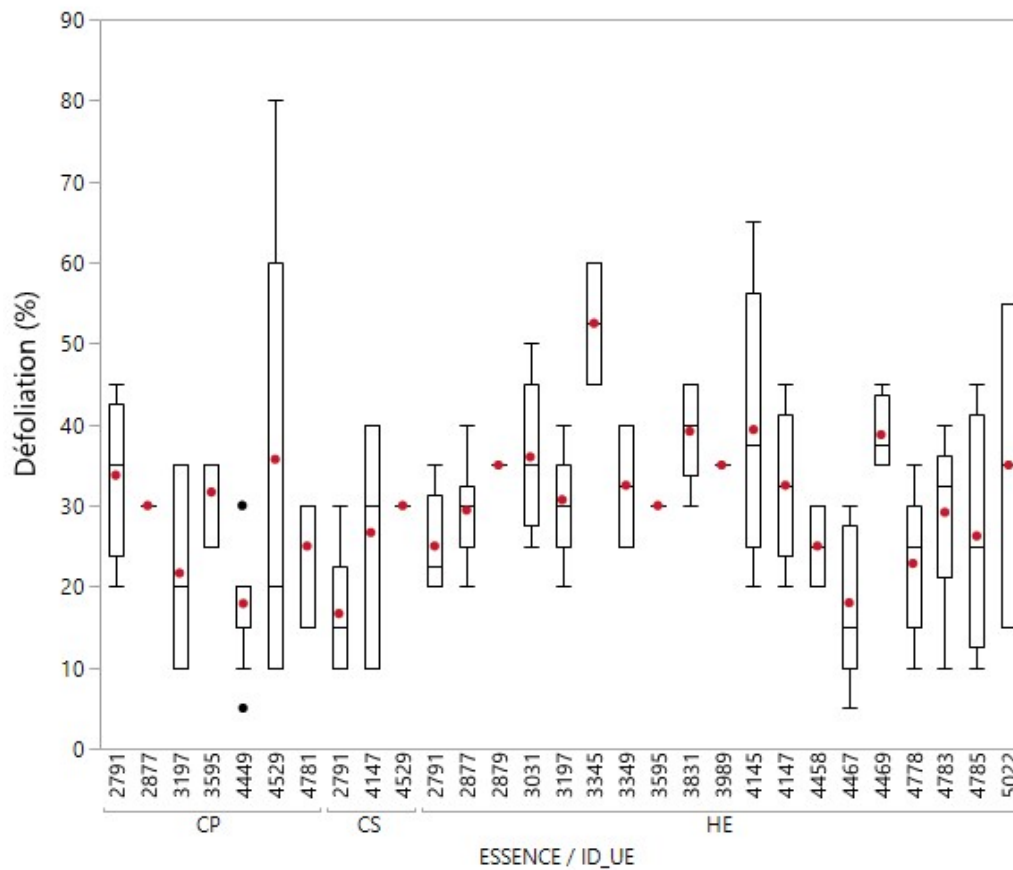
### 5.1.1. Défoliation moyenne des arbres de la campagne 2018

La Figure 13 présente la distribution des valeurs de défoliation pour les échantillons de 43 chênes et les 85 hêtres répartis au sein des 29 placettes. La défoliation moyenne est de 26% pour les chênes pédonculés, 21% pour les chênes sessiles et de 31% pour les hêtres. La proportion d'arbres dont la défoliation est supérieure à 25%, considéré comme un seuil de vigilance, permet également de quantifier l'état sanitaire global. Cette proportion s'élève cette année à 63% pour les hêtres, 39% pour les chênes pédonculés et 40% pour les chênes sessiles. Il est clair que la proportion est très élevée pour les hêtres, mais n'est pas jugée alarmante, car nous cette année est marquée par une fructification intense, qui peut occasionner de fortes dégradations temporaires du houppier. Cet effet sera discuté ci-dessous.



**Figure 13 : Défoliation des chênes et des hêtres en 2018 (CP= chênes pédonculés ; CS = chênes sessiles ; HE = hêtres) ; les moyennes sont représentées par un point rouge et les valeurs extrêmes par des points noirs**

Les taux de défoliation par placette sont présentés à la Figure 14. La comparaison statistique entre les placettes ne peut être effectuée car la stratégie d'échantillonnage n'a pas été conçue dans ce but. Néanmoins, nous observons d'importantes différences entre placettes, tant au niveau des moyennes que de la dispersion des valeurs au sein de la placette. Les différences entre placettes s'expliquent principalement par l'âge du peuplement.



**Figure 14 : Défoliation des chênes (CP= chênes pédonculés ; CS = chênes sessiles) et des hêtres (HE) par placette. Certains box-plots sont incomplets en raison du nombre réduit d'effectifs (c'est le cas lorsque des chênes sont présents en hêtraie, ou inversement)**



### 5.1.2. Evolution de la défoliation moyenne de 2009 à 2018

L'évolution moyenne de la défoliation des arbres non dominés est présentée à la Figure 15. Les valeurs moyennes sont reprises dans le Tableau 6. Notons que les effectifs varient d'une année à l'autre en raison de l'alternance bisannuelle (hêtres), d'amélioration ou de détérioration de la visibilité, de coupes, d'éclaircies, d'inclusion d'arbre ayant atteint le seuil de circonférence de 80 cm et de la détermination tardive de l'espèce pour certains individus de chênes (non pris en compte avant détermination). Il n'est donc pas pertinent d'effectuer des comparaisons statistiques sur ce jeu de donnée complet. Nous nous limitons à une interprétation visuelle du graphique.

Les hêtres présentent des pics de défoliation en 2011, 2016 et 2018, qui sont caractérisés par une fructification particulièrement abondante. Ces observations mettent en évidence l'effet de la fructification, mais nous ne sommes pas en mesure de le quantifier, en raison de l'alternance bisannuelle des observations en hêtraie. A partir de cette année, les arbres du suivi photographique seront suivis annuellement, ce qui permettra à terme ce type d'évaluation.

Pour les chênes, nous observons une nette augmentation de 2017 à 2018.

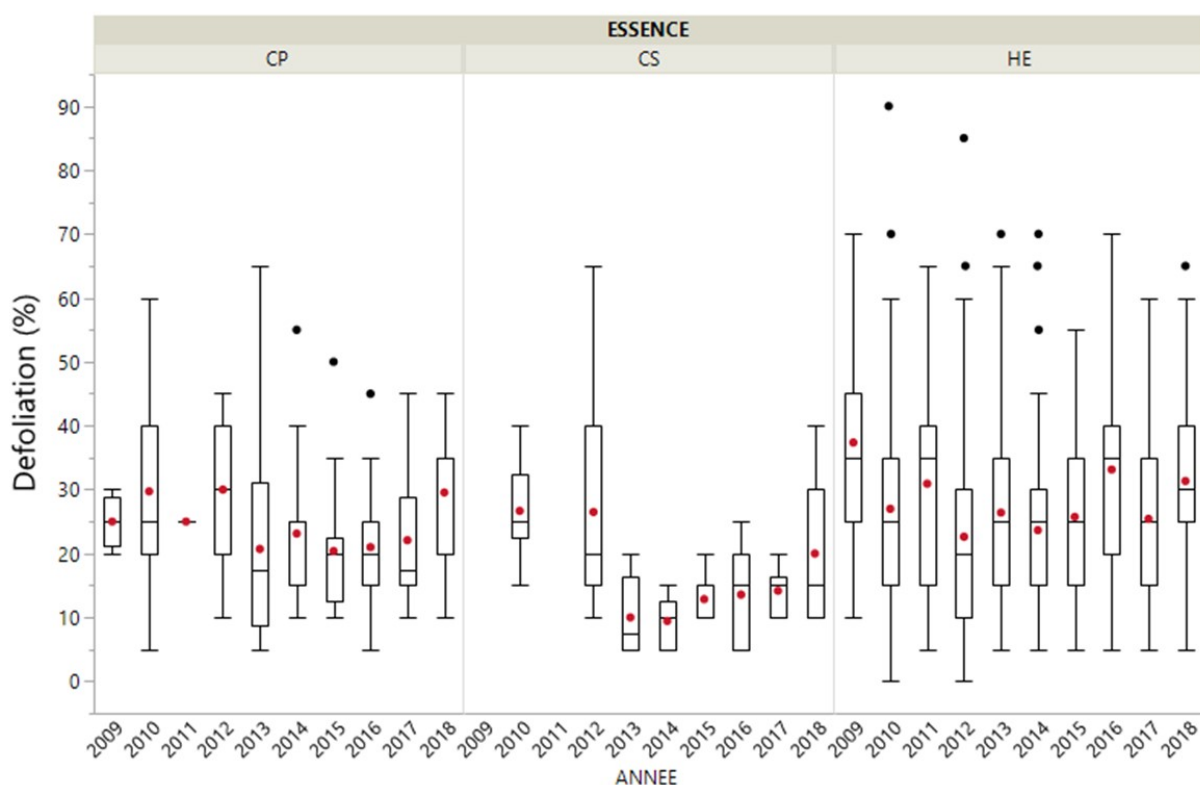


Figure 15 : Evolution de la défoliation des chênes pédonculés (CP), des chênes sessiles (CS) et des hêtres (HE) de 2009 à 2018

**Tableau 6: Valeurs moyennes de défoliation par année et par essence (les effectifs sont repris entre parenthèses)**

	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>
<b>Chênes pédonculés</b>	27% (n=8)	29% (n=49)		21% (n=29)	22% (n=44)	19% (n=37)	26% (n=38)	22% (n=40)	19% (n=39)	26% (n=33)
<b>Chênes sessiles</b>	30% (n=1)	27% (n=6)		20% (n=6)	12% (n=6)	11% (n=6)	14% (n=7)	13% (n=8)	14% (n=7)	21% (n=10)
<b>Hêtres</b>	37% (n=143)	27% (n=107)	29% (n=105)	22% (n=112)	27% (n=88)	23% (n=100)	26% (n=81)	33% (n=97)	27% (n=87)	31% (n=85)

### 5.1.3. Evolution de la défoliation d'un même échantillon d'arbres

Etant donné que les échantillons d'arbres observés ne sont pas identiques chaque année, nous avons sélectionné un sous-échantillon de tous les arbres observés chaque année pour le chêne (31 chênes pédonculés et 7 chênes sessiles) et toutes les années paires depuis 2012 pour les hêtres (60 arbres). Ce sous-échantillon est certes moins représentatif de la zone étudiée, mais ne présente pas de biais inter-annuel.

Nous avons présenté les résultats sous forme de box-plots au-dessous desquels figurent les résultats des tests de Student (Figure 16 à Figure 18): la présence d'une lettre commune pour deux années signifie que les moyennes associées ne sont pas significativement différentes ( $\alpha = 0.05$ ).

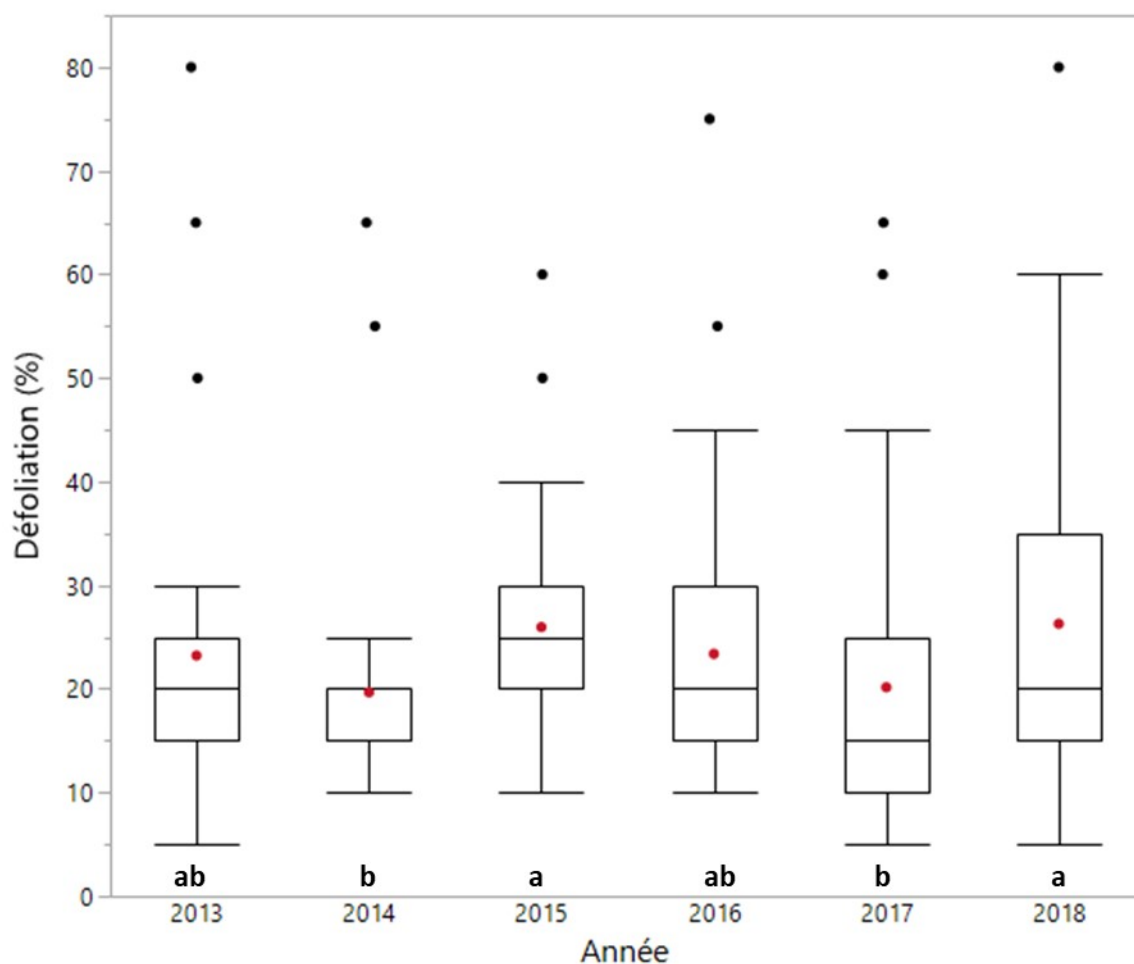
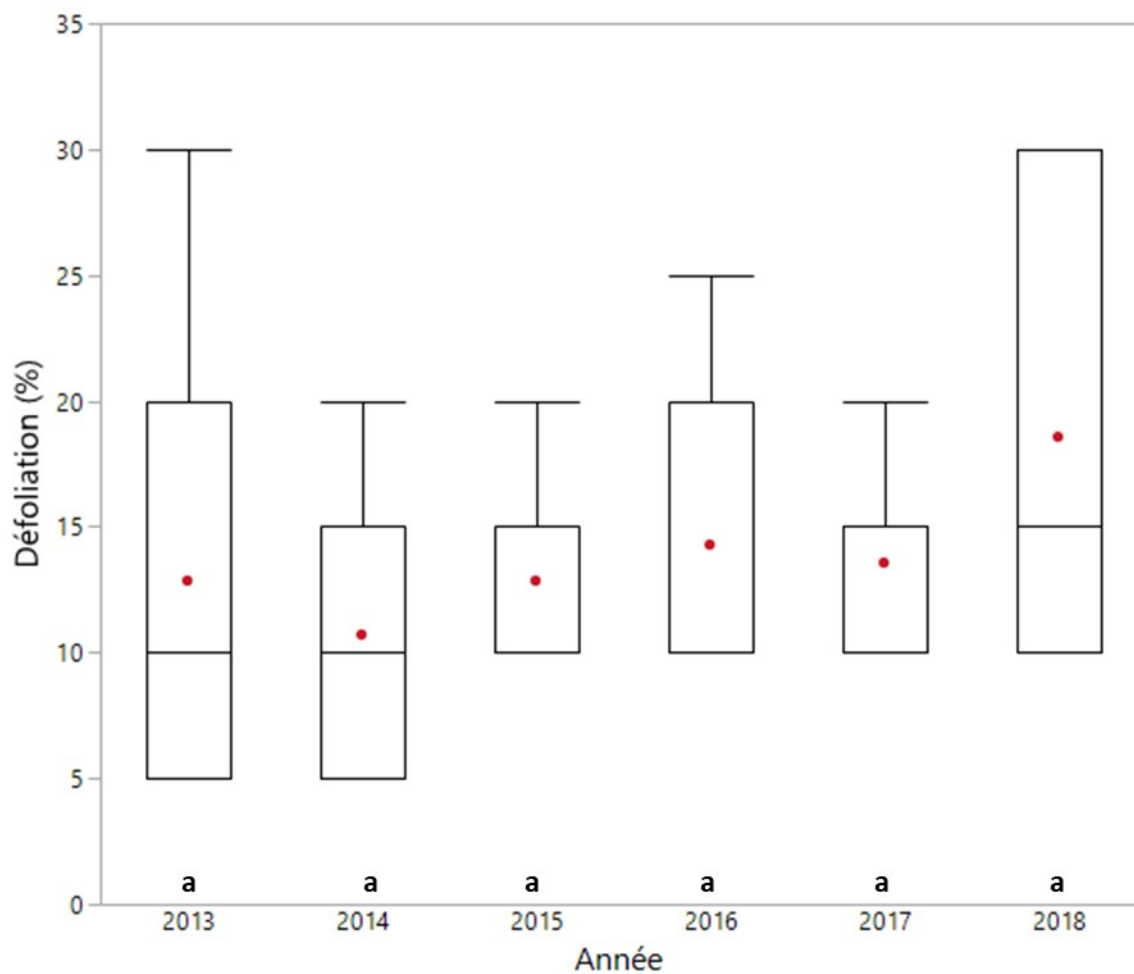
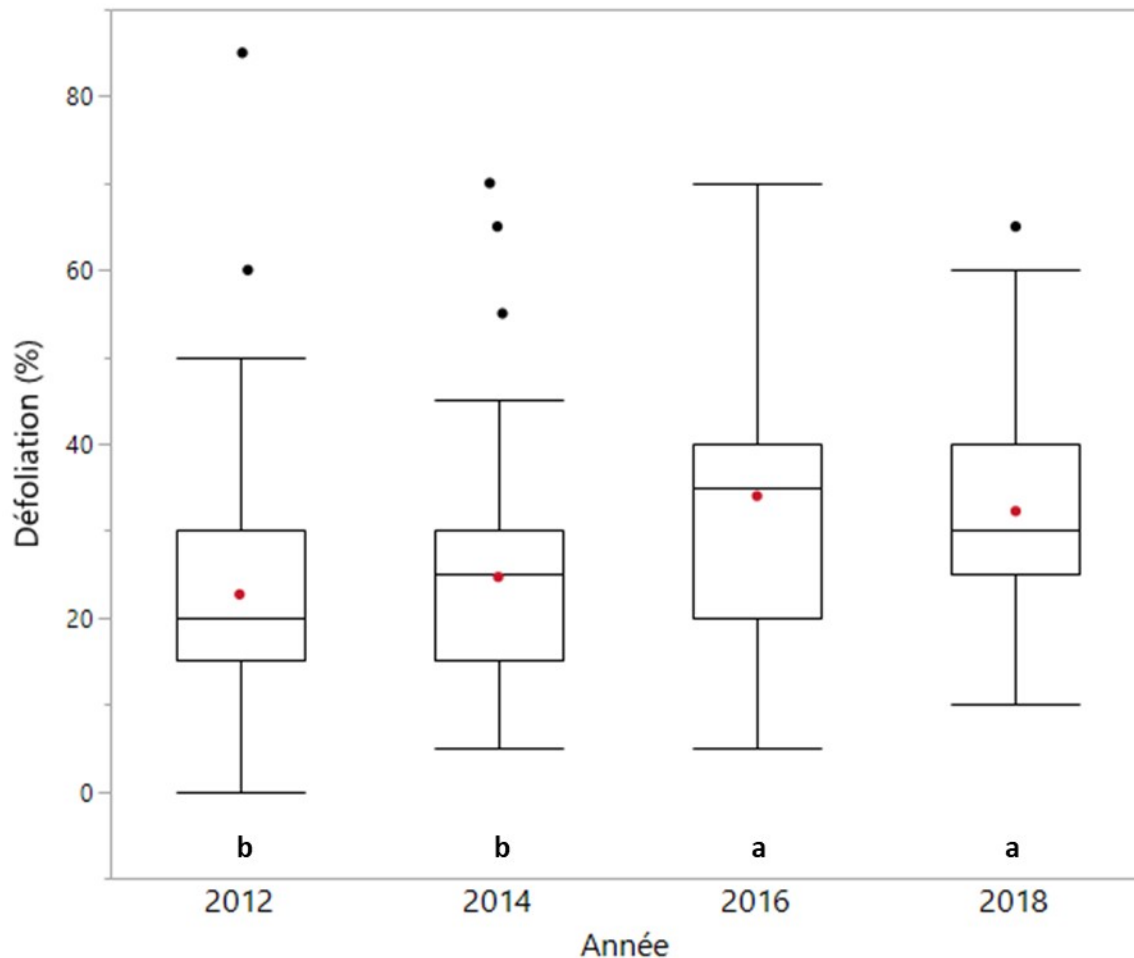


Figure 16 : Evolution de la défoliation des 31 chênes pédonculés observés durant les 5 campagnes de 2013 à 2018 ; la présence d'une lettre commune à deux années signifie que les moyennes associées ne sont pas significativement différentes ( $\alpha = 0.05$ ).



**Figure 17 : Evolution de la défoliation des 7 chênes sessiles observés durant les 5 campagnes de 2013 à 2018 ; la présence d'une lettre commune à deux années signifie que les moyennes associées ne sont pas significativement différentes ( $\alpha = 0.05$ )**

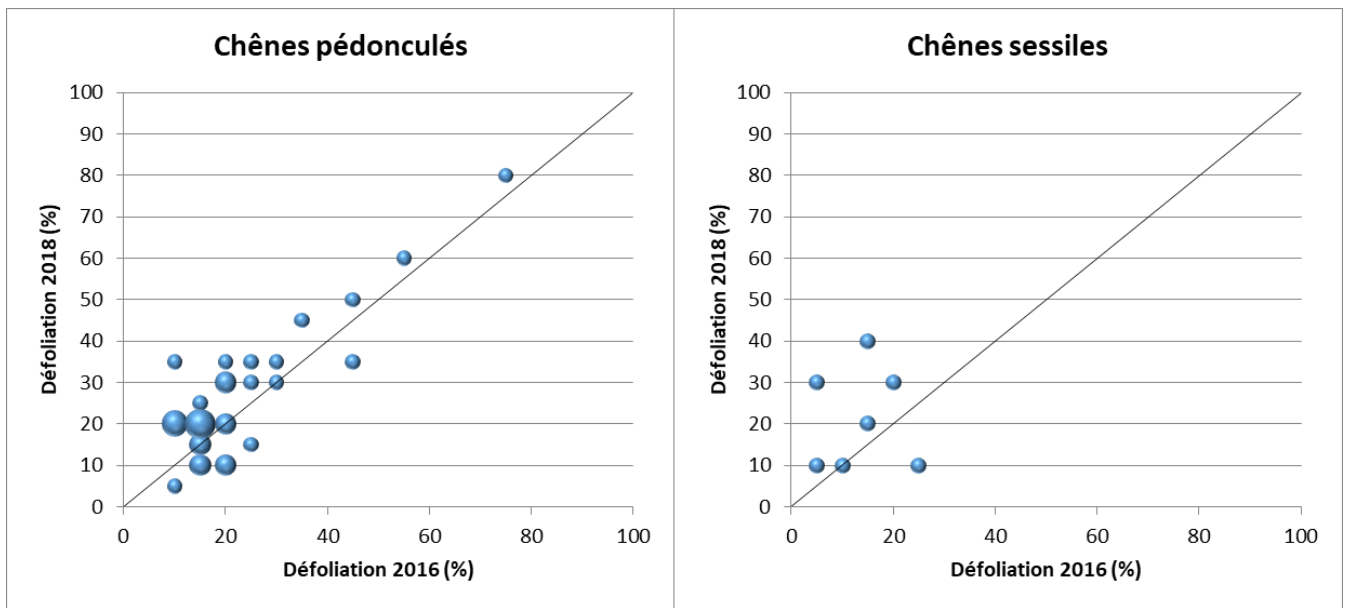
Nous observons pour les chênes pédonculés une augmentation de la défoliation moyenne entre 2017 et 2018, qui fait suite à une diminution de 2015 à 2017. Pour les chênes sessiles, l'augmentation observée n'est pas significative.



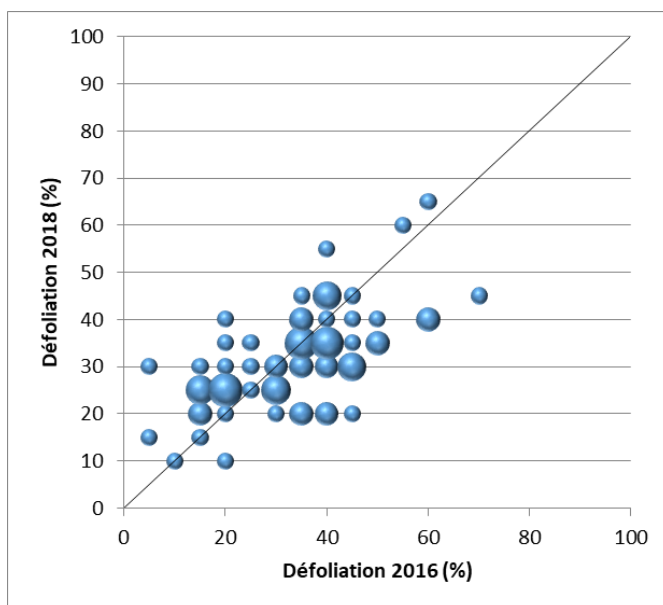
**Figure 18 : Evolution de la défoliation des 60 hêtres observés tous les deux ans depuis 2012 ; la présence d'une lettre commune à deux années signifie que les moyennes associées ne sont pas significativement différentes ( $\alpha = 0.05$ )**

En ce qui concerne les hêtres, les valeurs observées en 2016 et 2018 sont significativement plus élevées que les valeurs de 2012 et 2014. Cette différence est très vraisemblablement liée à la fructification très abondante observée en 2016 et 2018, contrairement à 2012 et 2014.

Afin d'étudier plus en détail cette évolution entre 2016 et 2018, nous avons comparé l'évolution de chacun des arbres. Les résultats sont présentés sous forme de graphes à bulles (Figure 19 et Figure 20), permettant de visualiser les points qui se superposent (données catégorielles).



**Figure 19 : Comparaison des classes de défoliation de 2016 et 2018 pour les 31 chênes pédonculés et 8 chênes sessiles observés ces deux années (la taille des bulles correspond au nombre de points ayant les mêmes coordonnées)**



**Figure 20 : Comparaison des classes de défoliation de 2016 et 2018 pour les 67 hêtres observés ces deux années (la taille des bulles correspond au nombre de points ayant les mêmes coordonnées)**

Les valeurs de défoliation individuelles des chênes pédonculés en 2018 sont globalement supérieures aux valeurs de 2016, mais les différences sont faibles, à l'exception d'un arbre. Les chênes sessiles présentant des évolutions plus importantes, généralement positives, mais les effectifs sont très réduits.

Les hêtres présentent des différences relativement marquées (dépassant souvent 10%) entre 2016 et 2018, mais le sens de ces évolutions est variable. Les dégradations touchent plus les arbres dont la défoliation était inférieure à 30% en 2016, tandis que les améliorations concernent plutôt les arbres dont la défoliation était supérieure à 30%.

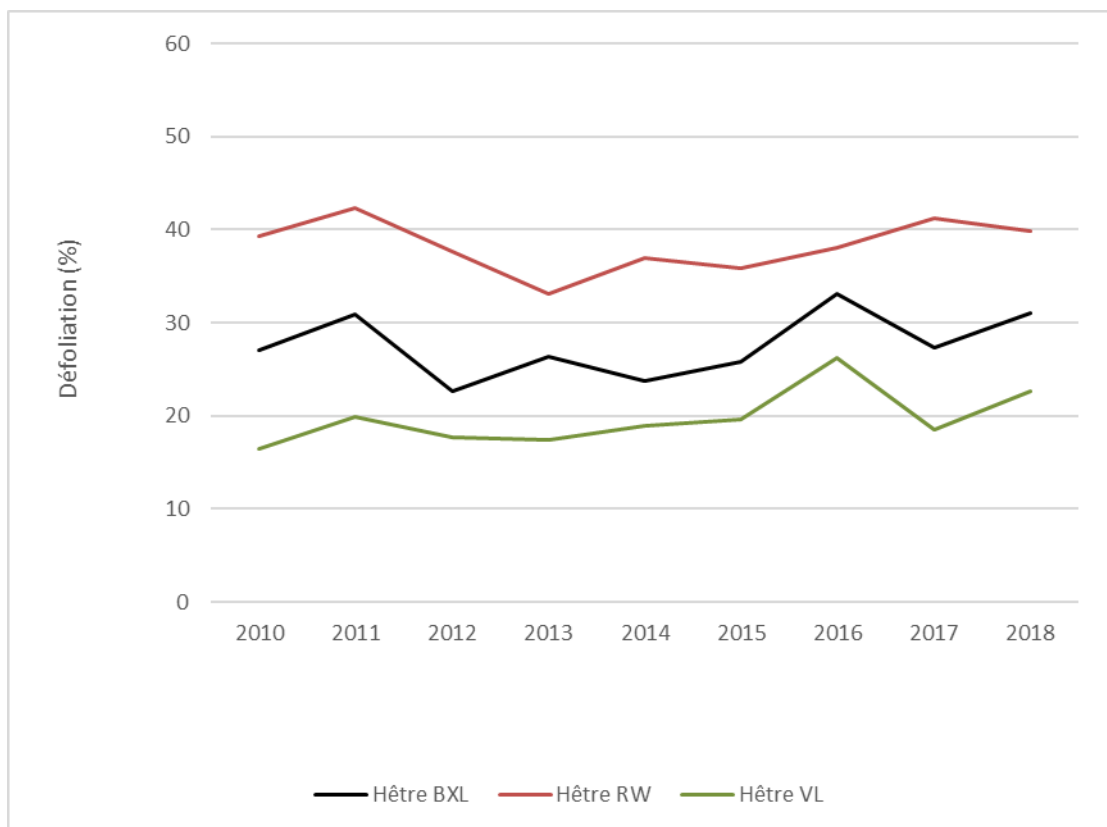
Globalement, nous n'observons pas de détérioration des arbres en 2018 par rapport à 2016, ni sur base de la moyenne, ni sur base des évolutions individuelles. Pour les hêtres, nous observons même une légère amélioration pour les arbres les plus dégradés. Nous n'observons donc aucun effet direct de la sécheresse très prononcée de cette année, ni même d'effet différé des sécheresses modérées de 2016 et 2017. Etant donné le caractère exceptionnel de la sécheresse 2018, il convient de suivre attentivement l'évolution sanitaire des arbres au cours des prochaines années.

#### **5.1.4. Comparaison avec la situation en Wallonie et en Flandre**

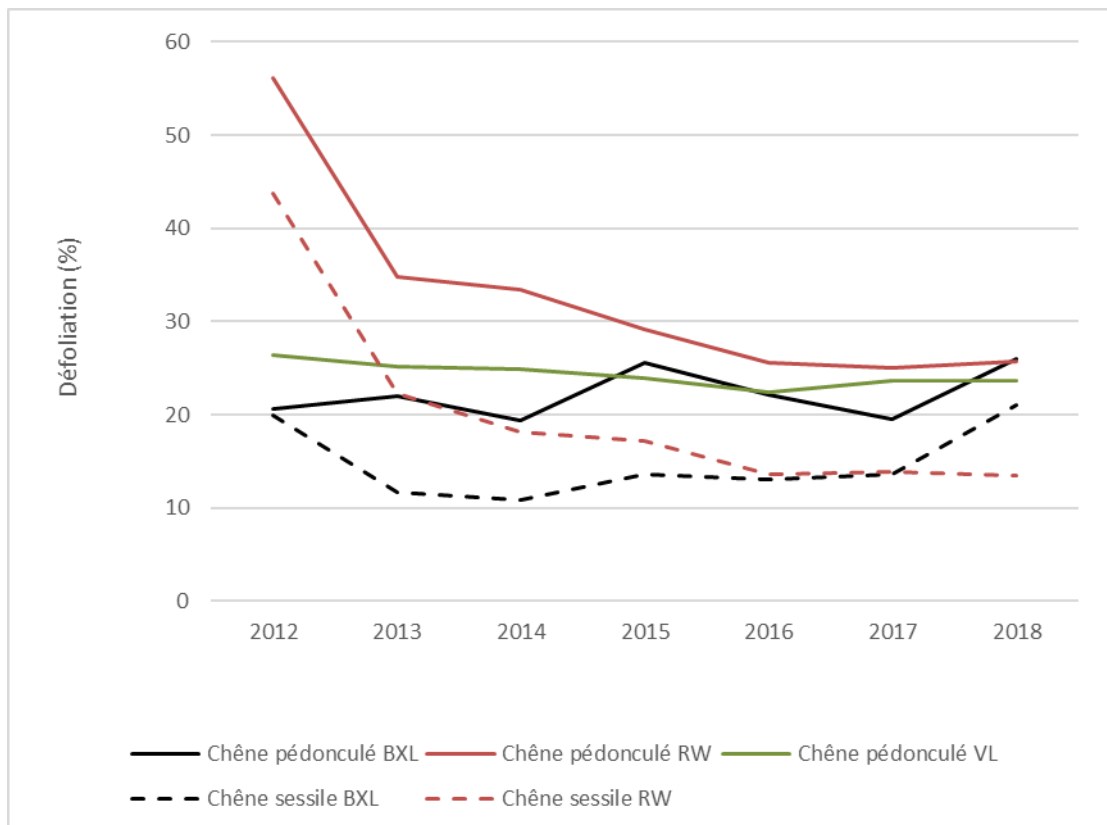
L'évolution de la défoliation moyenne de l'ensemble des arbres étudiés en forêt de Soignes (incluant donc les deux sous-échantillons de hêtre) a été comparée à l'évolution des arbres suivis en Wallonie (Figure 21). Le suivi en Wallonie est effectué sur 10 placettes en hêtraie, 10 placettes en chênaie et 10 placettes en forêt mixtes (chênes-hêtres), selon une méthode de cotation identique, mais sans alternance bisannuelle.

Pour le hêtre (Figure 21), les moyennes sont environ 10% plus basses en forêt de Soignes par rapport à la Wallonie et 10% plus élevées qu'en Flandres, mais l'évolution des courbes est remarquablement synchrone. Nous observons des pics moins importants en 2016 et 2018 en Wallonie, car l'intensité de la fructification est généralement moins marquée en Ardenne qu'en moyenne Belgique, or la majorité des placettes wallonnes est située en Ardenne.

En ce qui concerne les chênes (Figure 22), nous observons que les valeurs de défoliations sont nettement plus élevées en Wallonie avant 2013 et que cet écart diminue au fil des années, jusqu'à devenir nul pour le chêne sessile depuis 2016. Le pic observé en 2012 en Wallonie est lié à une forte attaque de chenilles en Ardenne, alors que les régions de plaine ont été épargnées. Les valeurs pour le chêne pédonculé en Flandre sont très semblables à celles de la forêt de Soignes, mais l'on observe moins d'oscillations.



**Figure 21 : Evolution comparée des défoliations moyennes de Hêtres en forêt de Soignes bruxelloise (BXL), en Wallonie (RW) et en Flandre (VL) depuis 2010.**



**Figure 22 : Evolution comparée des défoliations moyennes de chênes en forêt de Soignes bruxelloise (BXL), en Wallonie (RW) et en Flandre (VL) depuis 2010**



## 5.2. Fructification

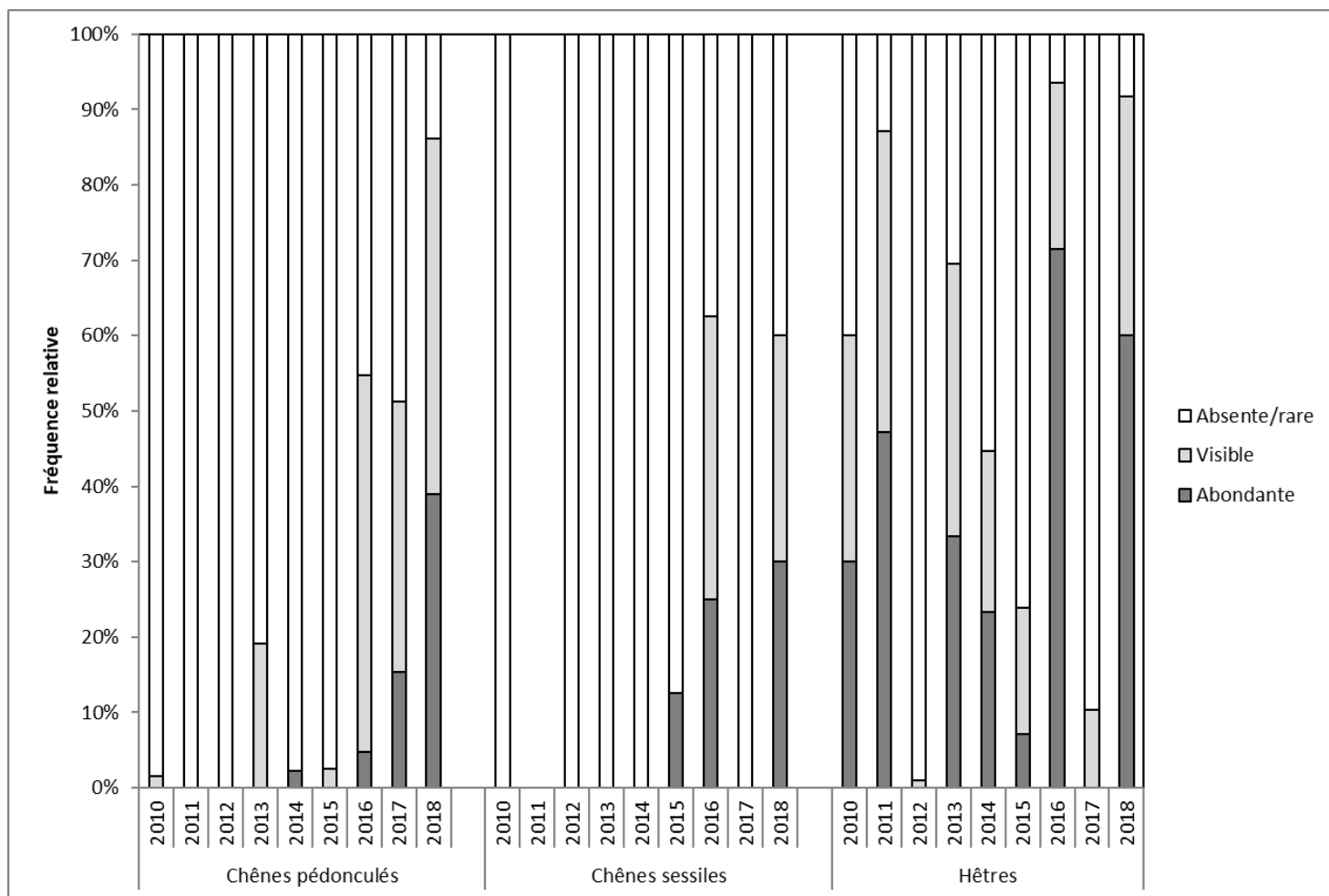
L'abondance de la fructification des arbres considérée dans ce point se réfère à la fructification évaluée au sein du houppier observable et non à celle estimée pour l'ensemble du houppier. La fructification est contrôlée par de nombreux facteurs (photopériode, humidité, température, pollinisation, etc.). Par ailleurs une fructification abondante est fréquemment constatée l'année qui suit une sécheresse (Nageleisen *et al.*, 2010).

Chez les hêtres, la fructification a été pratiquement aussi abondante qu'en 2016, année qui avait été qualifiée d'« exceptionnelle » (Figure 23). Ces observations sont en accord avec la tendance bisannuelle de la fructification du hêtre et l'impact positif d'une sécheresse printanière (2015 et 2017) sur la fructification de l'année suivante. A l'opposé, la sécheresse de 2016 n'a pas induit de forte fructification en 2017 car elle s'est produite en automne et parce que le hêtre ne peut fructifier abondamment deux années consécutives.

De plus, nous avons déterminé que la grande majorité des arbres qui ont fructifié abondamment en 2018 avaient déjà fructifié abondamment en 2016 (Tableau 7). De même, près de 60% des arbres ayant fructifié abondamment en 2016 ont également fructifié abondamment en 2018. Il n'y a donc pas de phénomène d'alternance ; les arbres sont capables de produire une quantité importante de fruits durant deux cycles consécutifs.

**Tableau 7 : Table de contingence relative aux classes de fructification des hêtres en 2016 et 2018**

Effectifs des arbres pour chaque combinaison		Abondance de la fructification en 2018		
		Absente/rare	Visible	Abondante
Abondance de la fructification en 2016	Absente/rare	0	2	3
	Visible	7	5	4
	Abondante	3	19	32



**Figure 23 : Evolution du degré de fructification de 2010 à 2018 pour les chênes et les hêtres**

Après une absence de fructification en 2017, les chênes sessiles présentent une fructification abondante en 2018, tout comme en 2016. Bien qu'inférieures aux niveaux atteints par les hêtres, ces observations sont néanmoins exceptionnelles pour les chênes.

**Les chênes pédonculés présentent une fructification exceptionnelle en 2018, atteignant pratiquement les abondances notées pour les hêtres. De plus, cette année fait suite à 2 années de fructification abondante. Il n'existe pas de cycle pluriannuel comme pour le hêtre, du moins pas au niveau de l'échantillon. La comparaison 2017-2018 (**

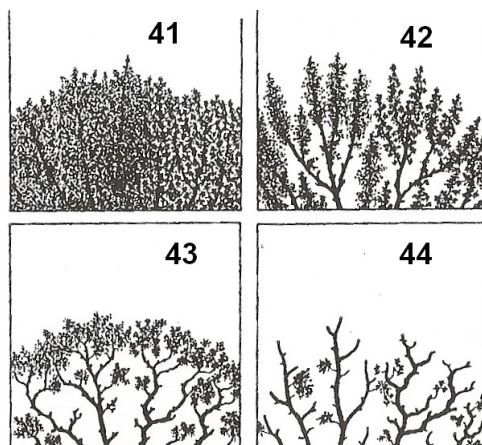
Tableau 8) nous apprend que 50% des arbres qui ont fructifié abondamment en 2018 n'avaient pas ou peu fructifié en 2017, mais que 25% d'entre eux avaient déjà abondamment fructifié. Inversement, la plupart des arbres qui ont fructifié abondamment en 2017 ont aussi fructifié abondamment en 2018. Il semble donc qu'il n'y a aucun lien, ni positif ni négatif, entre le niveau de fructification de deux années consécutives au niveau individuel. L'échantillon est malheureusement trop réduit pour confirmer cette hypothèse.

**Tableau 8 : Table de contingence relative aux classes de fructification des chênes pédonculés en 2017 et 2018**

Effectifs des arbres pour chaque combinaison		Abondance de la fructification en 2018		
		Absente/rare	Visible	Abondante
Abondance de la fructification en 2017	Absente/rare	4	4	7
	Visible	0	8	3
	Abondante	0	2	4

### 5.3. Structure de la couronne

D'après le protocole standardisé, la structure de la couronne est définie comme l'architecture des organes aériens de l'arbre. Celle-ci varie en fonction du stade de développement atteint par l'arbre et des stress subis au cours du temps. Afin d'évaluer la vitalité du houppier des chênes, quatre formes du houppier ont été définies (voir Figure 24) en fonction de la forme de la partie supérieure de la couronne et du développement de ces rameaux.



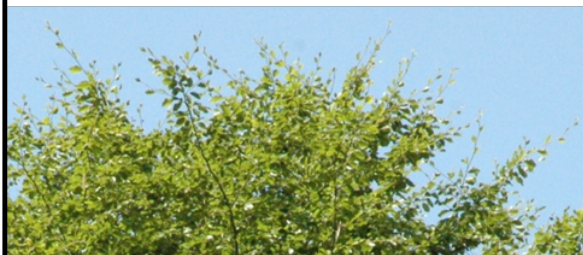
**Figure 24 : Les quatre formes de houppier des chênes, avec leurs codes (Eichhorn et al., 2010)**  
**41 : ramification dense ; 42 : simplification légère ; 43 : simplification importante ; 44 : déclin**

En ce qui concerne le hêtre, la forme du houppier était notée selon ces 4 classes, de manière similaire à celle du chêne jusqu'en 2013. En 2013, cette classification a évolué en 8 classes conformément au protocole *ICP Forests* afin d'analyser plus finement l'évolution de la ramification. Seule la partie sommitale du houppier doit être évaluée (rameaux apicaux). La Figure 25 illustre une fiche de terrain utile aux observateurs pour différencier les formes sur base de critères et de photos prises en Belgique.

## Architecture des rameaux apicaux

méthode: déterminer la forme **dominante** dans la **cime** sur base de 3 zones d'observation (« 11h », « 12h » et « 13h » sur horloge)

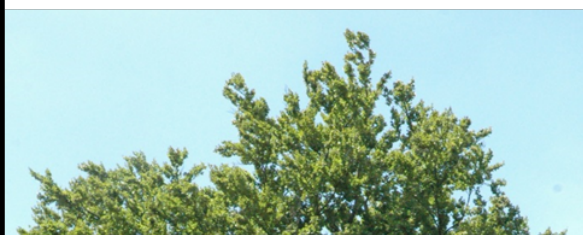
**Forme 1** : les pousses apicales et les bourgeons latéraux forment de longs rameaux en éventails



**Forme 2** : les rameaux latéraux se raccourcissent.



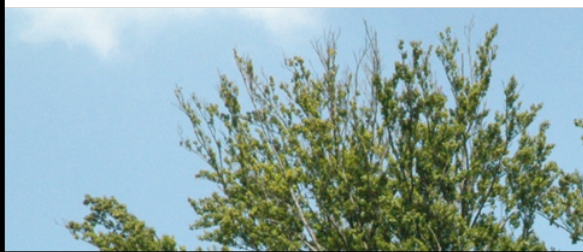
**Forme 3** : seules les pousses apicales forment de longs rameaux, les rameaux latéraux sont chétifs. Formation de baguettes, dagues



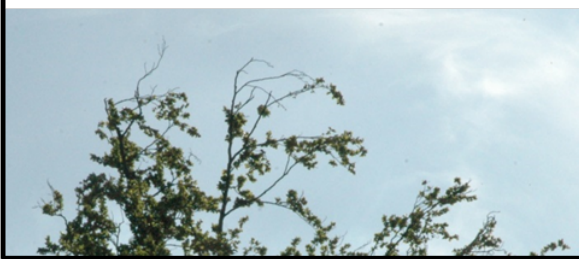
**Forme 4** : moindre croissance des rameaux latéraux dont la majorité n'est pas courbée en forme de « griffe ».



**Forme 5** : croissance unilatérale des rameaux sur la branche, les rameaux sont majoritairement courbés, « griffes »



**Forme 6** : présence de « griffes » et mortalité des rameaux apicaux et latéraux



**Forme 7** : mortalité



**Forme 8** : récupération (« gourmands »)

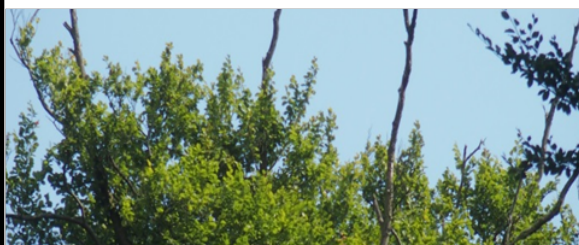


Figure 25: Fiche de terrain différenciant les 8 formes du houppier du hêtre

Nous observons une dégradation de la structure des chênes de 2017 à 2018, avec pour la première fois depuis le début du suivi, un chêne pédonculé présentant une « mortalité très importante » des branches de la cime et un chêne sessile présentant une simplification importante (Figure 26). Toutefois, la proportion des classes « ramification dense » reste dominante pour les deux espèces et proche des valeurs des années précédentes pour le chêne pédonculé.

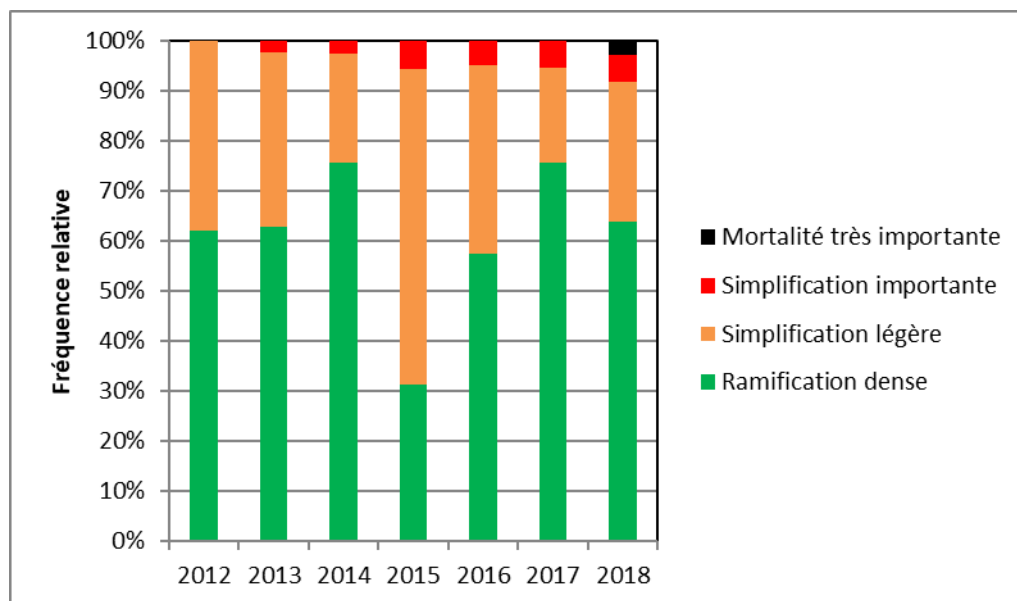


Figure 26 : Distribution des chênes pédonculés selon la structure de la couronne (n= 33)

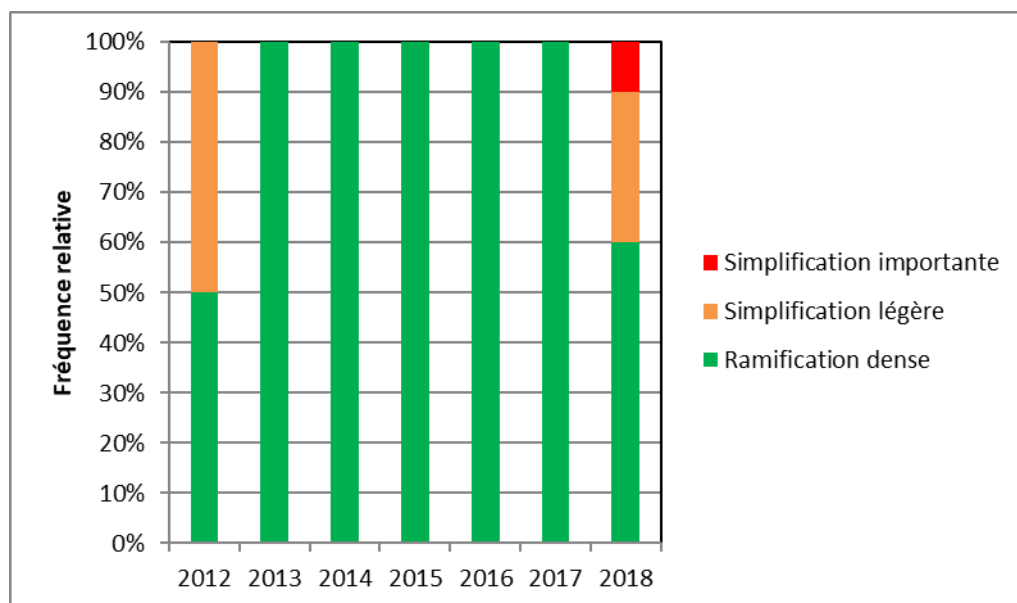


Figure 27 : Distribution des chênes sessiles selon la structure de la couronne (n=10)

Suite à l'instauration de nouvelles classes pour le hêtre en 2013, les résultats antérieurs ne sont pas présentés. Les observations de 2018 sont comparées aux années 2014 et 2016 en raison de l'alternance bisannuelle des placettes visitées. Par rapport à 2014, nous observons une nette diminution des classes les moins dégradées (1 et 2) et une augmentation de la fréquence des classes intermédiaires (3 et 4) (Figure 28). La fréquence cumulée des classes les plus dégradées (5 à 7) n'est toutefois que de 11%. Ce chiffre est stable depuis 2016, après une augmentation par rapport à 2014.

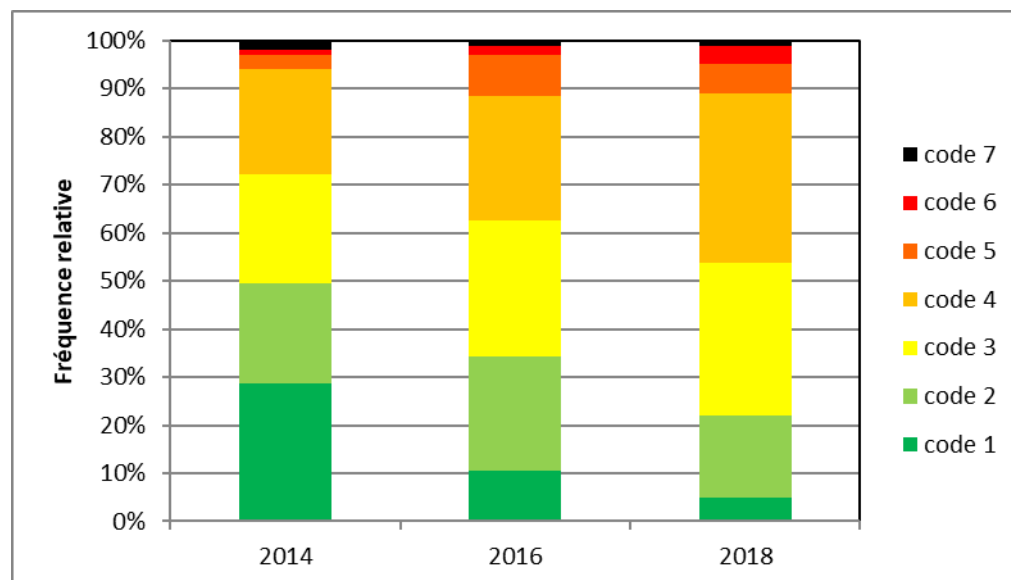


Figure 28 : Distribution des hêtres selon la structure de la couronne (n=85) ; les codes se réfèrent à la Figure 25.

## 5.4. Pousses épïcormiques

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

La présence de pousses épïcormiques est plus généralement observée chez les chênes pédonculés, et présente une légère augmentation depuis 2017 (Figure 29). Pour les chênes sessiles, aucun arbre présentant des pousses épïcormiques abondantes n'a été mentionné depuis 2013, mais la fréquence d'arbres présentant de rares pousses épïcormiques s'élève à 60% en 2018 alors qu'elle variait précédemment entre 10 et 30%. Chez les hêtres, les gourmands sont peu fréquents et en lente diminution.

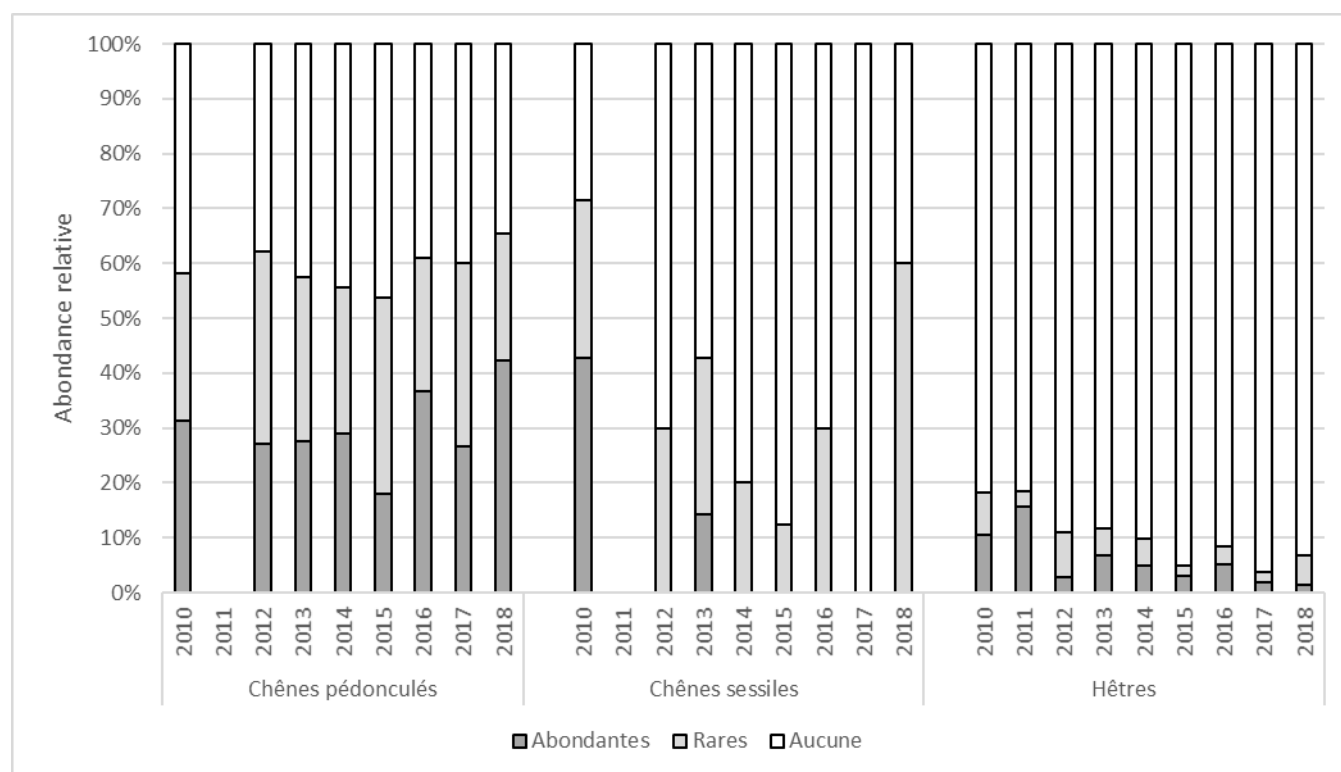


Figure 29 : Distribution des arbres selon l'abondance des pousses épïcormiques



## 5.5. Décoloration des feuilles

La décoloration est définie dans le protocole comme toute altération de la couleur normale du feuillage. Ce critère est noté en pourcent et correspond à la proportion du feuillage atteint par rapport à la totalité du houppier observable.

En 2018, aucun arbre ne présentait de décoloration, alors que le phénomène concernait presque 40 % des hêtres en 2017 (Figure 30). Le pic de 2017 avait été interprété comme le signe d'un possible début de dégradation de l'état sanitaire, lié à la sécheresse 2016-2017. Les observations de défoliation de 2018 contredisent cette hypothèse : il n'y a aucune dégradation visible en dehors de l'effet réversible de la fructification.

Par contre, il est possible que cette décoloration soit la conséquence d'une carence induite par la forte fructification de 2016. La production de fruits s'accompagne en effet d'une forte mobilisation de nutriments, particulièrement de P, qui pourrait affecter temporairement l'équilibre nutritif des arbres.

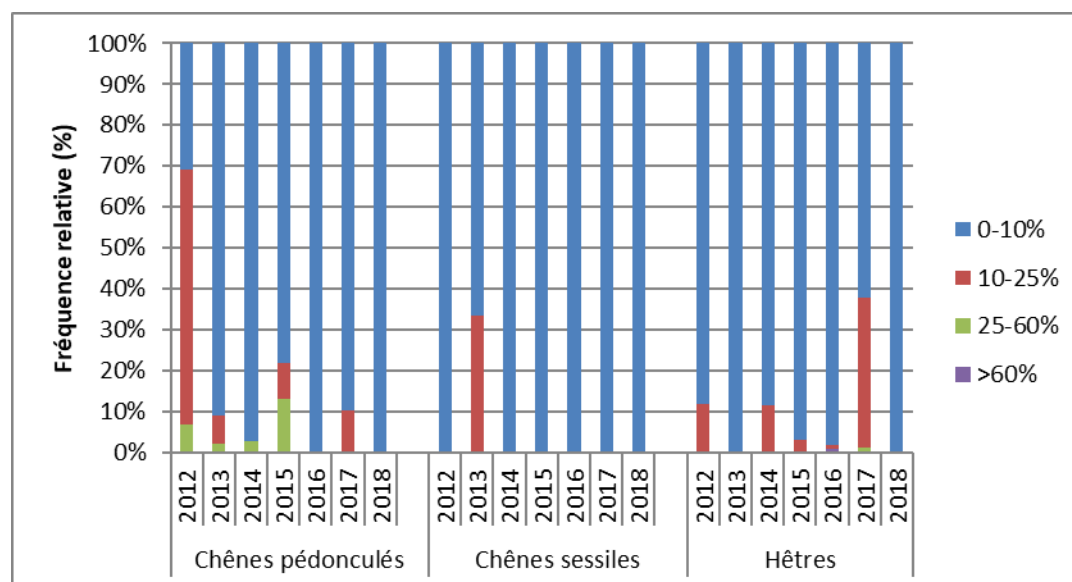


Figure 30 : Distribution des arbres selon le pourcentage de décoloration du feuillage

## 5.6. Lien entre la défoliation et d'autres variables

### 5.6.1. Analyses statistiques

Dans le but de mettre en évidence certains facteurs explicatifs de la défoliation, les relations entre la défoliation et divers critères ont été analysées statistiquement. Afin d'améliorer la confiance dans l'interprétation des résultats, les relations entre variables sont testées depuis 2009. Différents tests statistiques ont été réalisés en fonction du caractère continu ou catégoriel de la distribution des variables.

Le **coefficient de corrélation** est bien adapté aux données quantitatives continues. Sa valeur est comprise entre -1 et 1, et il mesure le niveau de relation linéaire entre deux variables. Les p-valeurs calculées pour les coefficients de corrélation permettent de tester l'hypothèse nulle de corrélation non significativement différente de zéro entre les variables.

L'**ANOVA** a pour objectif de tester l'hypothèse nulle d'égalité des moyennes entre les distributions. Si les moyennes sont significativement différentes et les effectifs suffisants, un test de comparaison multiple est appliqué : le **test de Tukey** (HSD : Honestly Significant Difference). Le but est de vérifier si les paramètres correspondant aux différentes modalités d'un facteur sont significativement différents ou non.

Le principe de la **régression linéaire** est de modéliser une variable dépendante quantitative Y, au travers d'une combinaison linéaire de p variables explicatives quantitatives, X1, X2, ..., Xp. Le coefficient 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 et sont indépendantes.

## 5.6.2. Défoliation et circonférence

Le Tableau 9 reprend le niveau de corrélation existant entre la défoliation et la circonférence des chênes et des hêtres, mesurée à 1m50. Les coefficients en gras et marqués d'un astérisque indiquent que la corrélation est significative au seuil  $\alpha = 0.05$ . Nous pouvons donc conclure que les niveaux de défoliation des hêtres augmentent à mesure que la circonférence s'accroît. Par contre, cette relation n'est pas vérifiée pour les chênes quelle que soit la campagne.

**Tableau 9 : 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	0,1613 (n=45)		<b>0,428*</b> (n=107)
2011	-0,211 (n=39)		<b>0,518*</b> (n=102)
2012	0,2051 (n=63)		<b>0,384*</b> (n=112)
	Ch. pédonculé	Ch. sessiles	Hêtres
2013	0,150 (n=48)	0,620 (n=7)	<b>0,314*</b> (n=88)
2014	0,206 (n=45)	0,167 (n=10)	<b>0,380*</b> (n=100)
	Chênes		Hêtres
2015	-0.173 (n=48)		<b>0.302*</b> (n=81)
	Ch. pédonculé	Ch. sessiles	Hêtres
2016	-0.05 (n=40)	-0.59 (n=8)	<b>0.218*</b> (n=97)
2017	0.15 (n=39)	-0.02 (n=7)	<b>0.42*</b> (n=87)
2018	0.01 (n=33)	0.20 (n=10)	<b>0.38*</b> (n=85)

Les régressions linéaires illustrant la relation entre la défoliation et la circonférence ont dès lors été réalisées pour les hêtres uniquement (Tableau 10).

**Tableau 10: Résultats des régressions linéaires entre la circonférence (y ; cm) et la défoliation (x) par année**

Année	Essence	n	équation	R <sup>2</sup>	P valeur> t
2009	Hêtres	143	$y=0,0987x+17,24$	0,1397	<b>&lt;0,0001*</b>
2010	Hêtres	107	$y=0,1065x+7,35$	0,1693	<b>&lt;0,0001*</b>
2011	Hêtres	102	$y=0,1295x+7,05$	0,2683	<b>&lt;0,0001*</b>
2012	Hêtres	112	$y=0,1024x+3,01$	0,143	<b>&lt;0,0001*</b>
2013	Hêtres	88	$Y=0,0674x+14,7$	0,0902	<b>0,0045*</b>
2014	Hêtres	100	$Y=0,0822x+7,61$	0.1444	<b>&lt;0,0001*</b>
2015	Hêtres	81	$Y=0.056x+15.01$	0.091	<b>0.0061</b>
2016	Hêtres	97	$Y=0.051x+23.2$	0.045	<b>0.0367*</b>
2017	Hêtres	87	$Y =0.099x+9.72$	0.173	<b>&lt;0.0001*</b>
2018	Hêtres	85	$Y=0.0759+16.49$	0.142	<b>0.0003*</b>

La Figure 31 illustre la distribution des valeurs de défoliation des hêtres en 2018 en fonction de la circonférence à 1m50 mesurée au même moment. Le coefficient de pente est proche de 0,1. En d'autres termes, sur base des données de 2018, la défoliation augmenterait de 10% lorsque la circonférence d'un hêtre augmente de 100 cm.

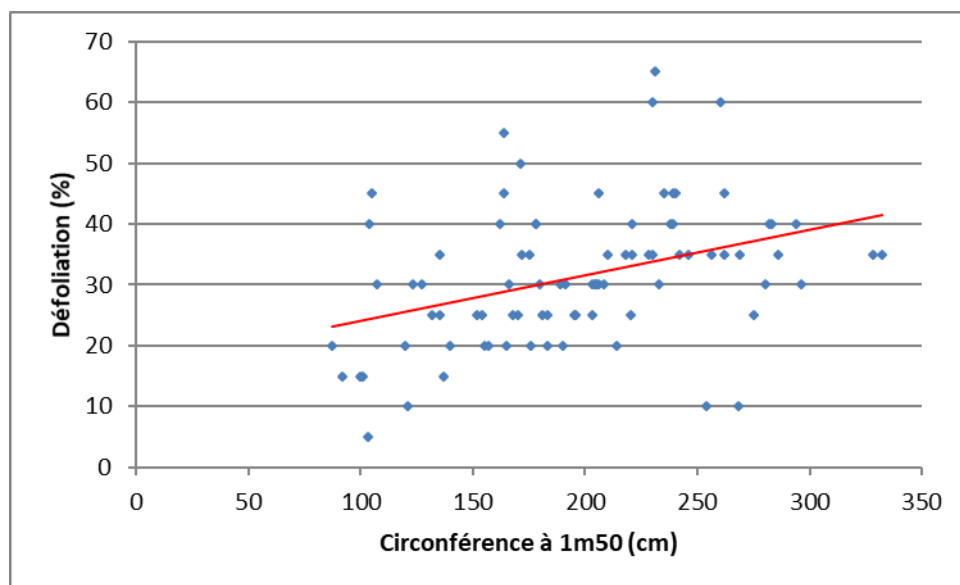
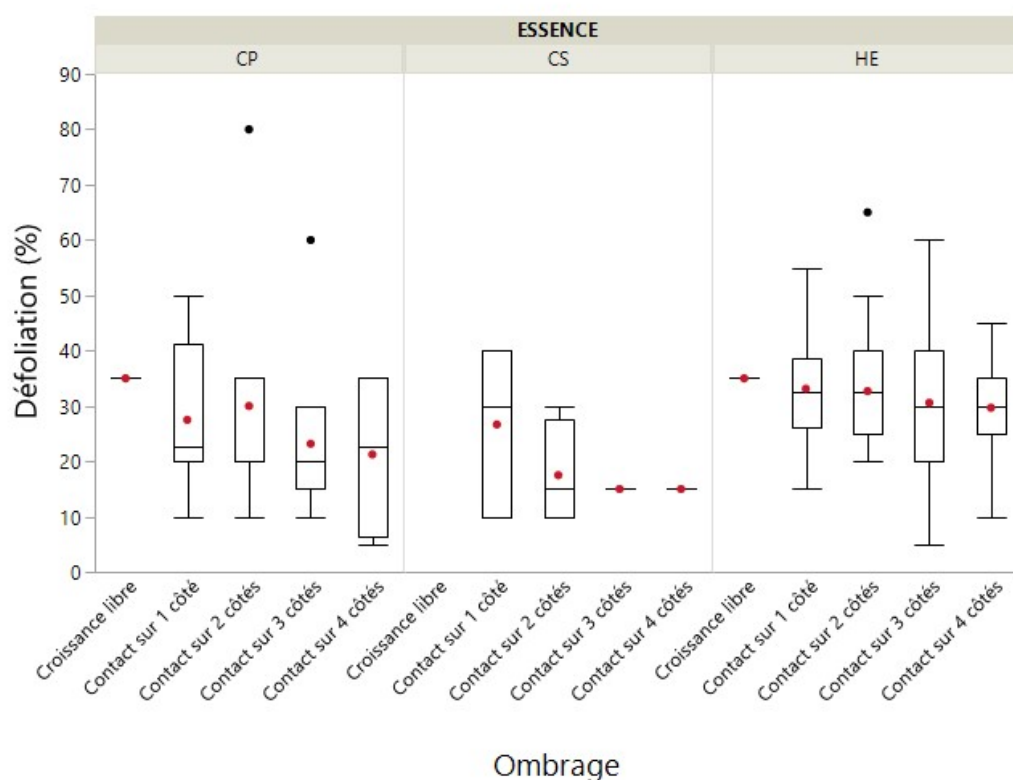


Figure 31 : Régression linéaire de la défoliation des hêtres en fonction de la circonférence en cm (C150) en 2018

### 5.6.3. Défoliation et concurrence

La concurrence est estimée à l'aide de l'indice d'ombrage, qui renseigne sur le nombre de côtés du houppier qui sont touchés par d'autres cimes. Pour rappel, cet indice est distribué en 5 classes allant de « couronne en croissance libre » à « arbre dominé », qui reflète un degré maximum de concurrence. Pour rappel, les arbres appartenant à cette dernière classe sont exclus de l'échantillon étudié.

La Figure 32 indique que pour les hêtres et les chênes pédonculés, les couronnes les plus soumises à la concurrence présentent une défoliation plus faible par rapport aux autres situations. Cet effet doit être en partie lié à l'âge du peuplement, qui augmente parallèlement à l'ouverture du couvert (éclaircies).



**Figure 32 : Défoliation des chênes indigènes (CP :chêne pédonculé ; CS :chêne sessile) et des hêtres (HE) selon l'indice d'ombrage en 2018**

#### 5.6.4. Défoliation et décoloration

Aucune décoloration n'a été observée cette année, mais nous avons testé si la décoloration observée en 2017 avait un effet sur la défoliation de cette année (Figure 33). Pour les hêtres, cette comparaison se base sur les arbres du suivi photographique, qui sont désormais observés chaque année.

Nous n'observons aucune différence entre les classes de décoloration pour les hêtres. Ceci confirme que la décoloration observée chez un nombre significatif de hêtres en 2017 ne constituait pas le signe d'un début de dégradation.

Par contre, nous observons que les 4 chênes pédonculés décolorés en 2017 présentent en 2018 une défoliation plus élevée que les arbres qui ne présentaient aucune décoloration (Figure 33). Or, ces 4 mêmes arbres présentaient en 2017 une défoliation nettement plus basse que le reste de l'échantillon. Ils ont donc subi une forte détérioration de 2017 à 2018 (Figure 34) : +24% pour les arbres décolorés en 2017 contre seulement +4% pour les autres. Bien que le nombre d'arbres concerné soit très limité, il serait intéressant (1) d'étudier systématiquement cette relation inter-annuelle à l'avenir et (2) de poursuivre le suivi de ce groupe, en recherchant de façon ciblée la présence de pathogènes/ravageurs et l'impact possible d'une contrainte abiotique, voire d'une carence liée à la fructification.

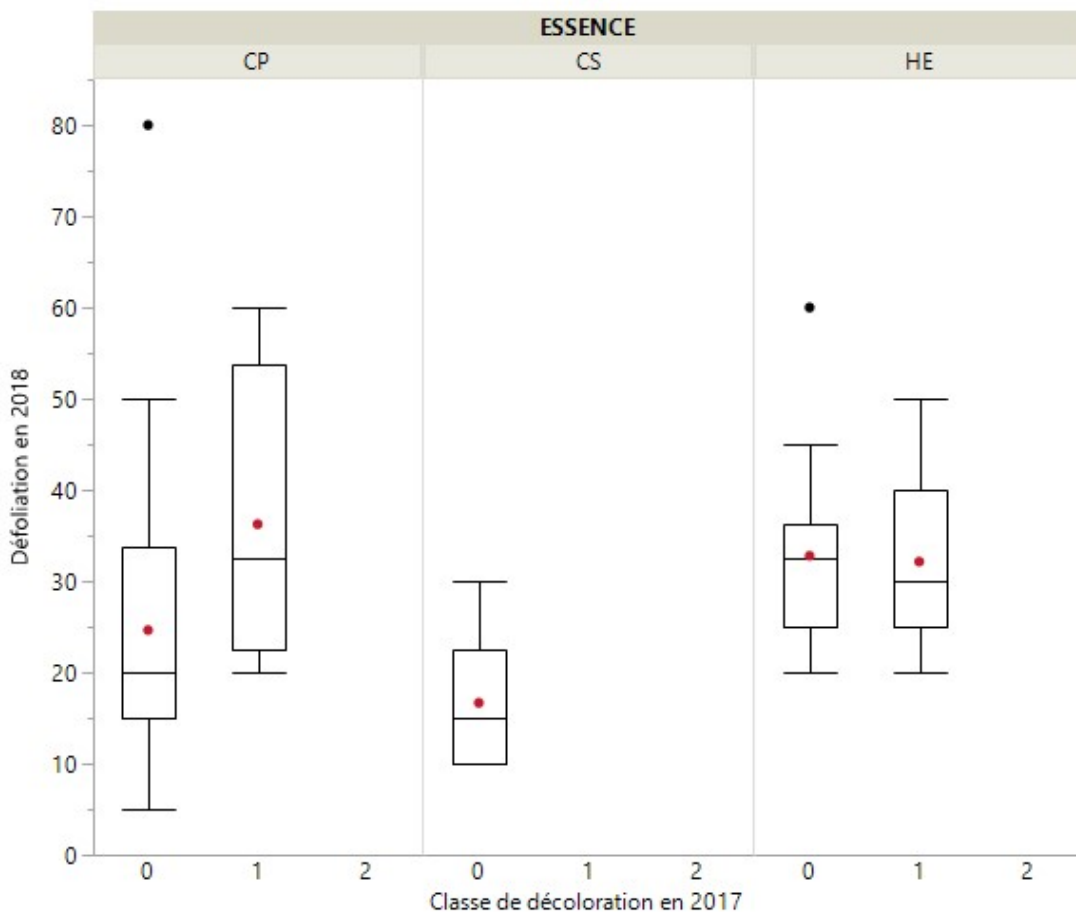


Figure 33 : Défoliation des chênes indigènes (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles) et des hêtres (HE) en 2018 selon l'intensité de la décoloration en 2017

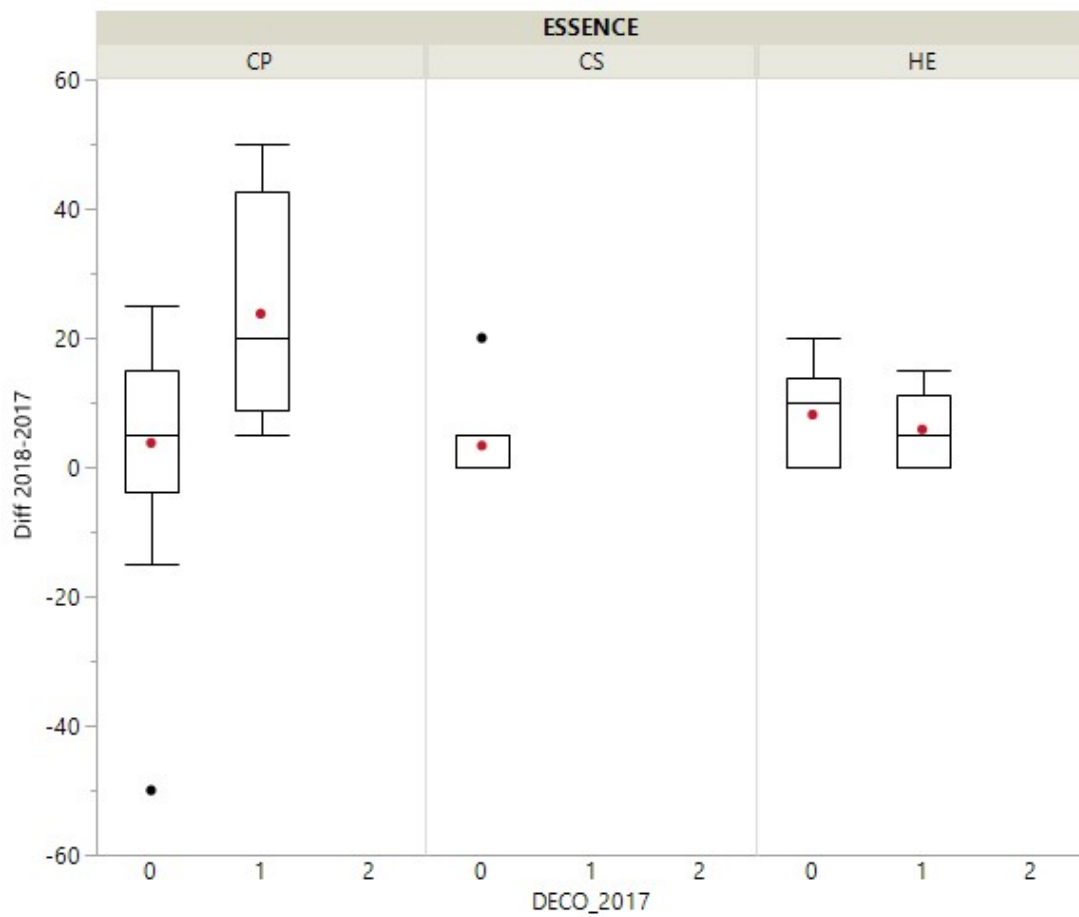


Figure 34 : Evolution de la défoliation de 2017 à 2018 selon l'intensité de la décoloration en 2017 (CP : chêne pédonculé ; CS : chêne sessile ; HE : hêtre)

### 5.6.5. Défoliation et fructification

Pour le hêtre, nous observons un impact de la fructification sur la défoliation, bien que la variabilité soit élevée pour la classe « absente ou rare », qui ne compte que 5 individus. Ces différences entre classes expliquent donc une partie de la variabilité intra-annuelle. D'autre part, nous avons évoqué ci-dessus l'effet du cycle de fructification sur les fluctuations inter-annuelles de la défoliation. Lorsque nous disposerons de plusieurs années de suivi consécutifs sur un sous-échantillon représentatif d'arbres (arbres du suivi photo), nous pourrions modéliser de façon plus rigoureuse les interactions entre ces paramètres, à la fois sur les niveaux inter-annuel et intra-annuel.

Pour la première fois, nous observons un effet positif de la fructification sur la défoliation chez les chênes sessiles, mais l'effectif est très réduit. Par contre, nous n'observons aucun effet chez les chênes pédonculés.

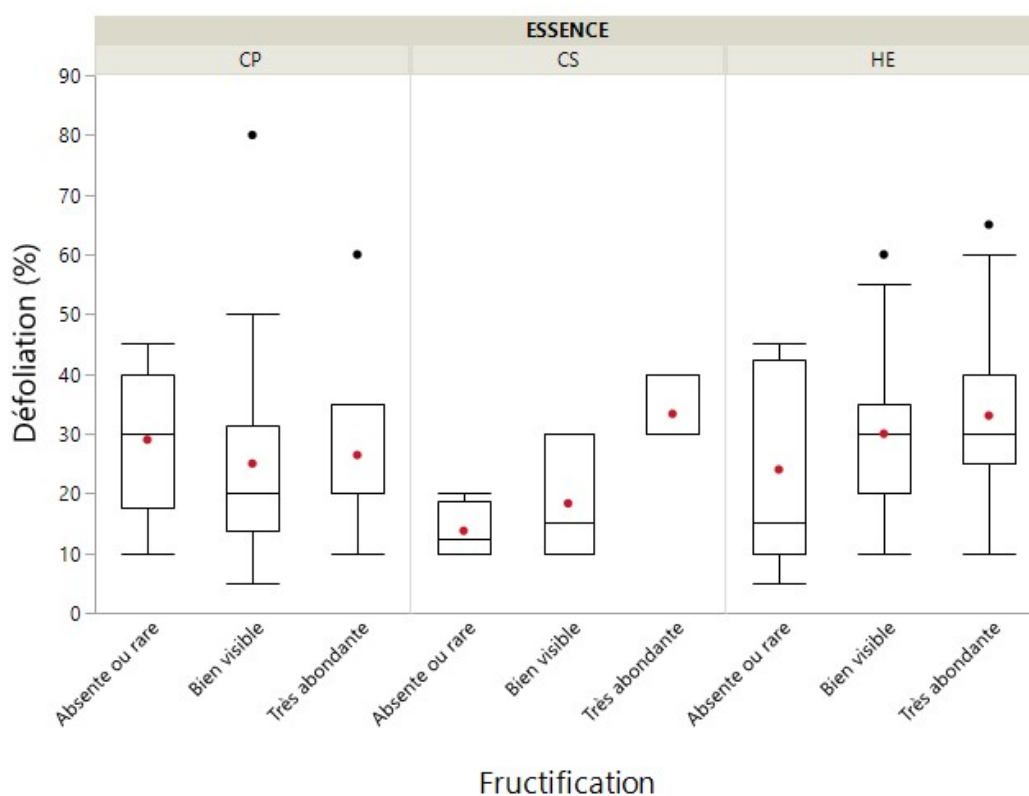


Figure 35 : Distribution de la défoliation des chênes (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles) et des hêtres (HE) selon l'abondance de la fructification en 2018



### 5.6.6. Défoliation et structure du houppier

Chez les chênes pédonculés et les hêtres, il existe une relation très claire entre la défoliation et la structure de la partie supérieure de leur houppier (Figure 36). Cette relation se justifie par le fait que la simplification de la ramification, la diminution de la longueur des rameaux, et l'augmentation de la mortalité des brins entraînent inévitablement une réduction du volume foliaire. Le caractère très marqué de cet effet suggère que la simplification de la structure serait le principal mécanisme conduisant à une augmentation de la défoliation dans le contexte de cette étude.

Pour les chênes sessiles, une relation similaire semble exister, mais les classes 42 et 43 ne comportent qu'un individu chacune.

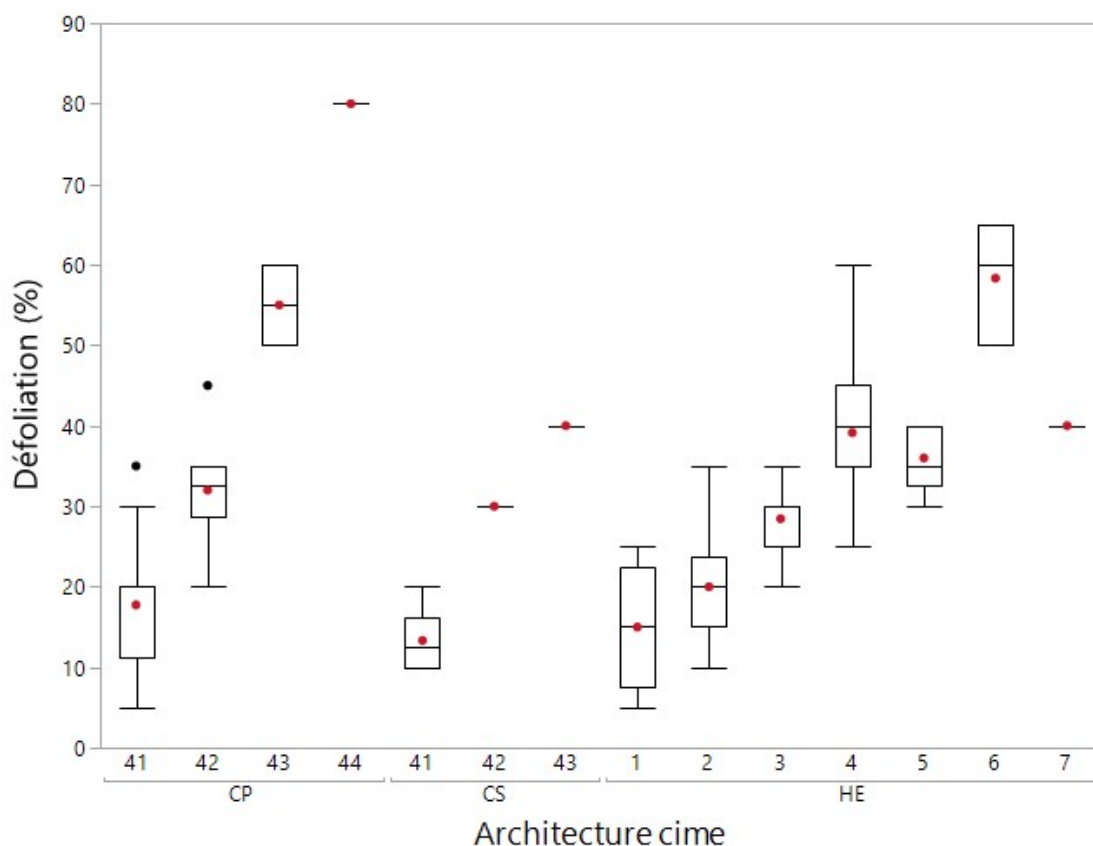


Figure 36: Distribution de la défoliation des chênes (CP : chênes pédonculés ; CS : chênes sessiles) et des hêtres (HE) selon la forme du houppier en 2018 (la signification des codes est indiquée aux Figure 24 et Figure 25)

## 5.7. Dommages

Les dommages sont recherchés pour chacun des arbres observés. Les différentes parties de l'arbre (feuilles, branches et tronc) sont diagnostiquées pour chacun des symptômes.

Aucune attaque d'insectes défoliateurs n'a été observée, ni pour les chênes, ni pour les hêtres.

Pour les chênes pédonculés, la présence de taches rouge-brune a été notée sur 3 arbres (9% des effectifs). Il pourrait s'agir d'un effet de la sécheresse et/ou de la chaleur. Ces taches n'affectent pas suffisamment la couleur globale des feuilles pour être comptabilisées dans la cotation de la décoloration.

**Tableau 11: Symptômes et dommages observés sur les chênes pédonculés et proportion des arbres affectés**

Partie affectée	Symptôme	Pourcentage d'arbres affectés
Tronc	Ecoulement de sève	3 %
Feuilles	Rouge à brun	9%
	Bronze	3%

Pour le hêtre, le principal dommage observé est la mortalité de branches (10% des arbres affectés).

**Tableau 12: Symptômes et dommages observés sur les hêtres et proportion des arbres affectés**

Partie affectée	Symptôme	Pourcentage d'arbres affectés
Branches de diamètre variable	Mortes ou mourantes	1 %
Branches fines	Mortes ou mourantes	9%
Branches de $\phi \geq 10\text{cm}$	Cassées	1%

## 6. Suivi photographique des houppiers à partir du sol

Les photographies prises cet été confirment l'effet très prononcé de la fructification (Figure 37).

Après 4 ans de suivi, il est également possible de visualiser les évolutions de la défoliation au-delà de l'effet « fructification ». Nous observons que certains arbres présentent de fortes oscillations interannuelles de la défoliation qui ne semblent pas directement liées aux épisodes de forte fructification (Figure 38). Dans d'autres cas, l'effet de la fructification est perceptible, mais les évolutions sur une échéance de 2 ans sont très faibles (Figure 39 et Figure 40).

Les photos permettent également de se rendre compte de phénomènes qui ne sont pas reflétés par l'évolution de la défoliation. Ainsi, l'arbre présenté à la Figure 40 est caractérisé par une défoliation élevée, mais stable, ainsi qu'une quantité de branches mortes stable. Toutefois, l'observation attentive des photographies révèle que de nouvelles branches meurent chaque année et tombent endéans les 2 ans. L'observation des chiffres suggère que la situation est stable, mais les photos montrent alors que la cime continue à se dégrader. Notons que qu'un tel phénomène n'a pas été observée pour les arbres moins dégradés. Ce phénomène devra être pris en compte dans l'interprétation des résultats globaux.



**Figure 37 : Exemples d'augmentation de la défoliation de 2017 à 2018 liée à une fructification intense**



**Figure 38 : Exemple de forte fluctuation inter-annuelle de la défoliation non liée aux épisodes de fructification (2016 et 2018)**



**Figure 39 : Exemple de faible évolution de la défoliation sur la période 2015-2018**

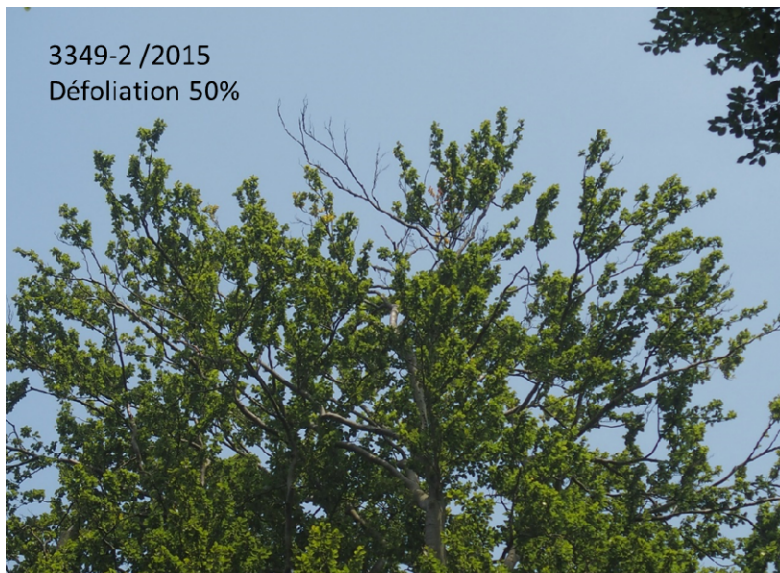


Figure 40 : Exemple de dégradation de la cime liée à la mortalité et la perte de branches sur la période 2015-2018

## 7. Conclusions générales et perspectives

L'année 2018 se caractérise par une fructification très abondante pour les 3 essences observées. Chez les chênes, l'épisode est exceptionnel, d'autant plus qu'il s'agit de la 3<sup>e</sup> année de fructification consécutive pour le chêne pédonculé.

Comme en 2016, cet épisode s'accompagne d'une augmentation de la défoliation des hêtres ; nous n'observons pas de différence significatives entre les valeurs de défoliation de ces deux années. Contrairement à ce qui était redouté, nous n'observons pas d'effet des sécheresses sur les hêtres, ni celle de cette année, ni celle des précédentes. La décoloration significative des hêtres en 2017 laissait craindre une détérioration cette année, mais cela n'a pas été le cas. L'intensité plus élevée de la sécheresse de 2018 pourrait néanmoins conduire à un affaiblissement des arbres dans les prochaines années, propice au développement de maladies et ravageurs.

Pour les chênes pédonculés, on note une légère augmentation de la défoliation moyenne, lié à détérioration de l'état général de certains arbres. Ces individus présentaient en 2017 des cotes de décoloration élevées, ce qui suggère que le processus d'affaiblissement a débuté il y a au moins 1 an.

Pour les chênes sessiles, la moyenne de la défoliation a augmenté, mais cette différence n'est pas significative. On observe en outre une dégradation de la structure pour certains arbres.

La dégradation de certains chênes pourrait être liées à la sécheresse, mais aussi à la fructification particulièrement intense des chênes cette année. Dans le cas des chênes pédonculés, nous n'avons pas observé de relation entre fructification et défoliation au niveau de la comparaison inter-individu. Toutefois, ceci n'exclut pas un possible effet de la fructification sur les fluctuations inter-annuelles, ou un effet cumulatif après 3 années de fructification consécutives, qui provoqueraient un affaiblissement progressif des arbres.

Lors des prochaines campagnes, nous serons donc particulièrement attentifs à l'évolution des chênes, en particulier les individus qui se sont récemment dégradés. Nous tenterons de mieux comprendre ce phénomène et les liens possibles avec la fructification ou le développement de maladie/ravageurs.

Dans le cas des hêtres, il conviendra de s'assurer que les arbres retrouvent en 2019 le niveau de défoliation qu'ils avaient en 2017, avant l'épisode de fructification. A plus long terme, les observations annuelles effectués sur le sous-échantillon du suivi photos permettrons de modéliser l'évolution de la défoliation en distinguant les effets temporaires liés aux pics de fructification des tendances à plus long terme.

L'analyse des photographies sera en outre affinée, et si possible automatisée, afin de compléter les informations récoltées sur le terrain. Par exemple, les photographies permettront une analyse du « turnover » des branches mortes, ou de la dynamique de reconstruction du houppier à partir de pousses épicormiques.



## Annexe 1 : Liste des arbres du suivi photographique

Plot	Arbre	Essence	Défoliation (%)	C150
2791	104	CS	15	133
2877	5	HE	45	185
	7	HE	25	198
	8	HE	35	239
	9	HE	30	278
	10	CH	30	197
2879	1	HE	40	225
3031	2	HE	30	227
	4	HE	40	177
	5	HE	40	168
	6	HE	40	181
	9	HE	30	200
3197	5	CP	20	166
3345	2	HE	45	204
	4	HE	35	261
3349	2	HE	40	282
	3	HE	20	272
3989	2	HE	25	326
4145	1	HE	15	165
	8	HE	65	230
4147	18	HE	25	128
	19	CH	10	255
	20	CH	15	236
4309	1	HE	35	232
	2	HE	30	210
	3	HE	35	220
	4	HE	45	231
	5	HE	35	231
4449	11	CP	25	153
4469	2	HE	30	211
	3	HE	30	295
	4	HE	25	253
4529	5	CP	40	128
	105	CP	20	115
	107	CP	25	98
4618	7	HE	30	148
	12	HE	20	134
4778	15	HE	10	115
4781	102	CP	30	156
5022	2	HE	35	155