

Université catholique
de Louvain



Bruxelles-Environnement
IBGE



*Earth and Life Institute
Environmental Sciences*



Suivi de l'état sanitaire en forêt de Soignes bruxelloise 2011

Promoteurs Prof. Q. Ponette

Appui scientifique Dr. Mathieu Jonard

Réalisation Ir. Steve Braem

Octobre 2011

Convention UCL – Bruxelles Environnement 2011

Fiche descriptive

Institutions

Université catholique de Louvain

*Earth and Life Institute
Environmental Sciences*

Bruxelles-Environnement (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

En 2009, la Région bruxelloise s'est dotée d'un système d'observation permanent de la vitalité de la forêt de Soignes. Ce système d'observation a pour but de suivre dans le temps et l'espace l'évolution de l'état de santé des trois principales essences de la forêt de Soignes bruxelloise, à savoir le hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et les chênes indigènes (*Quercus robur* L. et *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). Le protocole d'observation est celui mis au point dans le cadre du programme international concerté sur les forêts (*ICP Forests*). Le principe de la méthode est de coter divers critères (défoliation, décoloration, fructification, dommages et symptômes...) à observer à l'œil nu ou aux jumelles, en été. À l'issue d'un contrôle de calibration effectuée en juillet 2011, il s'avère que 87% des évaluations de la défoliation effectuées par les adjoints forestiers et contrôlées par l'UCL concordent à 10% près, ce qui est très satisfaisant. La défoliation des hêtres estimée par BE-IBGE est sous-estimée de près de 5% en moyenne. Il n'y a pas d'écarts significatifs en ce qui concerne la défoliation des chênes.

Durant l'été 2011, 19 placettes, comprenant en tout 160 arbres (111 hêtres et 49 chênes indigènes), ont été observés par les adjoints forestiers de Bruxelles Environnement - IBGE. Parmi les chênes, on dénombre 7 chênes sessiles et 42 chênes pédonculés. La défoliation moyenne du hêtre (28%) est du même ordre que celle des chênes (26%). Un peu plus de 60% des hêtres et des chênes ont une défoliation supérieure ou égale à 25%. La fructification notée en 2011 est assez élevée, en comparaison avec ce qui était observé en 2010. Une décoloration modérée à sévère est observée sur près de 6% des hêtres et de 32% des chênes. Les principaux dégâts observés sont des rameaux et des branches mortes pour le hêtre et des feuilles décolorées pour les chênes.

Lors de l'installation du réseau de suivi sanitaire en 2009, la défoliation des hêtres en forêt de Soignes était de 37%, et celle des chênes de 30%. Ensuite, tant en chênes qu'en hêtre, la défoliation en 2010 et 2011 était de l'ordre de 25 à 30%. Ces valeurs sont légèrement plus élevées que ce qui est habituellement observé en Flandre, mais elle du même ordre de grandeur que ce qui est noté en Wallonie. Néanmoins, les chiffres wallons et flamands recouvrent une diversité de situations trop importante pour être pertinemment comparés aux chiffres de la forêt de Soignes bruxelloise.

La perte de vitalité observée en forêt de Soignes peut être attribuée à un certain nombre de facteurs. La défoliation des chênes semble être en partie de nature accidentelle (attaque de défoliateurs, etc.). Près de 30% de la variabilité de la défoliation du hêtre s'explique par la circonférence du tronc. En 2011, une campagne de carottage avec comptage des cernes, a permis de conclure que l'âge explique 30% de la variabilité de la défoliation en hêtre. Les séries dendrochronologiques ne montrent pas d'influence nette de la sécheresse sur la vitalité des arbres, mais les analyses sont insuffisantes pour se prononcer de manière définitive.

Date de fin : octobre 2011.

Table des matières

1. Contexte	7
1.1. Objectifs.....	7
1.2. Brève description de la forêt de Soignes.....	8
Composition spécifique	8
Sols.....	8
Climat.....	9
2. État sanitaire et dépérissement	10
3. Campagne de suivi sanitaire 2011.....	12
3.1. Plan d'échantillonnage	12
3.2. Protocole d'évaluation.....	14
3.3. Caractéristiques des arbres	15
Effectif	15
Concurrence	17
Statut social.....	18
Visibilité.....	19
Fermeture du couvert.....	20
3.4. Encodage et traitement des données	21
3.5. Contrôle-qualité	21
Formation des observateurs	21
Contrôle de calibration	22
Accompagnement sur le terrain.....	24

4. Détermination de l'âge des arbres par carottage	25
<i>4.1. Récolte des carottes</i>	<i>25</i>
<i>4.2. Préparation des carottes et traitement des données</i>	<i>26</i>
5. Résultats.....	27
<i>5.1. Défoliation.....</i>	<i>27</i>
Défoliation moyenne par essence.....	28
Évolution de la défoliation moyenne entre 2009 et 2011	36
<i>5.2. Autres variables d'état sanitaire</i>	<i>40</i>
Fructification.....	40
Décoloration.....	42
Structure de la couronne	43
Pousses épïcormiques	45
<i>5.3. Détermination de l'âge par comptage des cernes</i>	<i>46</i>
<i>5.4. Relations entre la défoliation et d'autres variables</i>	<i>49</i>
Circonférence du tronc	50
Fructification.....	52
Structure de la couronne	54
Concurrence	55
Grosseur relative	57
Fermeture du couvert.....	58
Âge	60
<i>5.5. Dommages et symptômes.....</i>	<i>64</i>
Feuilles décolorées.....	66

Défoliateurs.....	67
Dégâts au tronc	68
6. Discussion	71
6.1. Causes possibles du dépérissement	71
Climat et apports atmosphériques	71
Adéquation des essences de chênes avec la station	74
6.2. Sylviculture.....	76
Mesures curatives	76
Mesures préventives	76
6.3. Mise à jour du dispositif de suivi	76
7. Conclusion et perspectives	78
8. Bibliographie.....	79
Annexes.....	83
<i>Comparaison des circonférences des arbres sondés</i>	<i>83</i>

1. Contexte

Le dépérissement des hêtres et des chênes n'est pas un phénomène nouveau (Mueller-Dombois, 1987 ; Tabeaud et Simon, 1993 ; Laurent et Lecomte, 2005). De manière générale, on observe une baisse de croissance des hêtres situés aux limites de l'aire de répartition (Charru et al., 2010). Depuis 1976, des signes de dépérissement ont été rapportés pour le hêtre et les chênes de la forêt de Soignes (Dulière et Malaisse, 1997 ; Penninckx et al., 1997 et 1999). La vulnérabilité de la forêt de Soignes pourrait s'expliquer par la proximité de grands centres urbains (pollution atmosphérique, fréquentation importante), par des conditions édaphiques particulières (fragipan, compaction des sols par l'exploitation forestière et les activités de loisir, etc.) et par la nature des peuplements forestiers (composition spécifique dominée par le hêtre (cf. § 1.2), etc.) (Penninckx et al., 1997 et 1999). Le fonctionnement des écosystèmes forestiers est également affecté par l'évolution du climat qui devrait se traduire, entre autres, par un allongement de la saison de végétation, une augmentation des sécheresses en période de végétation, et une augmentation de la température moyenne et de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère. Ceci a des répercussions potentielles non seulement sur la croissance des peuplements, mais également sur le développement des populations de ravageurs, ce qui risque d'induire de nouveaux types de dégâts (Lindner et al., 2010). Une étude prospective menée par Daise et al. en 2009 montre par ailleurs que le potentiel stationnel d'accueil en Forêt de Soignes serait fortement réduit pour certaines essences actuellement présentes, dont le hêtre et le chêne pédonculé.

En 2009, la Région bruxelloise s'est dotée d'un système d'observation permanent de la vitalité des peuplements. Ce système suit dans le temps et l'espace l'évolution de la vitalité des trois principales essences de la forêt de Soignes bruxelloise, à savoir le hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et les chênes indigènes (*Quercus robur* L. et *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.).

1.1. Objectifs

Le principal objectif de la campagne de suivi sanitaire est de présenter le bilan de santé annuel de la forêt de Soignes. En 2011, des objectifs spécifiques ont été ajoutés :

- améliorer la calibration entre UCL et BE-IBGE dans l'évaluation des critères sanitaires,
- déceler des facteurs pouvant expliquer la défoliation observée, notamment l'âge.

1.2. Brève description de la forêt de Soignes

Composition spécifique

La Forêt de Soignes se trouve dans l'aire du *Milio-Fagetum* (Noirfalise, 1984). Les hêtraies pures couvrent deux-tiers de la superficie de la forêt de Soignes bruxelloise ; les chênaies pures, moins d'un dixième. Les chênaies mélangées et les hêtraies mélangées représentent chacune un vingtième de la superficie totale. Ensemble, les hêtraies et chênaies au sens large (mélanges compris) forment donc 84 % de la forêt. Parmi les 16 % restant, 5% sont des résineux. Les hêtraies de 120-180 ans occupent la plus grande surface avec 30% de la superficie de la forêt. Les chênaies de moins de 120 ans couvrent 13% de la superficie de la forêt (Timal, 2006).

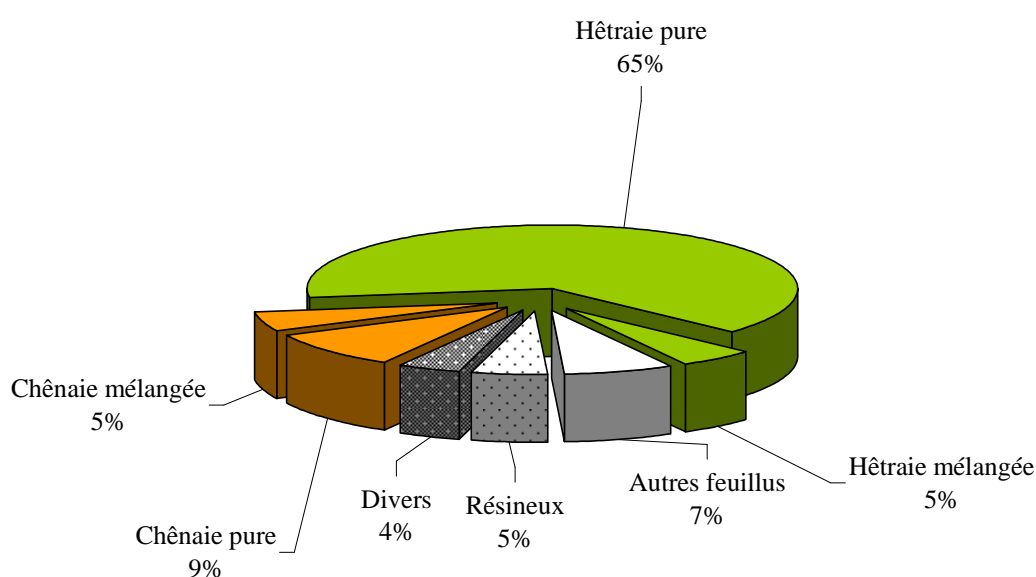


Figure 1. Proportions des types de peuplements selon la composition spécifique (Timal, 2006)

Sols

La forêt de Soignes est située en Moyenne Belgique, sur le plateau brabançon limoneux. Le relief est vallonné, avec une altitude comprise entre 60 et 120 mètres. Neuf dixièmes de la forêt de Soignes bruxelloise se trouvent sur un sol limoneux (dépôts de lœss). Le solde des sols de la forêt de Soignes se sont développés dans des dépôts sableux (Langhor, 2010). 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 (environ 40 cm), on retrouve un horizon induré appelé *fragipan*, constitué de veines claires plus meubles formant un réseau polygonal. Au-dessus du fragipan (de 0 à 40 cm de profondeur), on peut observer une grande densité de racines vivantes. Au niveau du fragipan (de 40 à 120 cm de profondeur), les racines ne peuvent pénétrer que par les interstices, qui constituent 5 à 10% du volume de sol à ce niveau. Les racines qui passent par ces veines claires sont très peu

ramifiées (manque d'espace). Celles qui ont réussi à dépasser la couche indurée (au-delà de 120 cm) se ramifient à nouveau et descendent jusqu'à 2 à 4 mètres de profondeur. Elles y atteignent une couche de loess originel contenant du calcaire. Les hêtres puisent dans cette couche profonde une partie de l'eau et des éléments nutritifs nécessaires à leur développement (Langhor, 2010). Seule la zone du Rouge-Cloître (placettes 4449, 4529 et 4928), historiquement soumise à du sylvopastoralisme, ne comporte pas de fragipan (Daise et al., 2009).

Climat

Le climat est dit lessivant, car les précipitations dépassent l'évapotranspiration. Les précipitations annuelles sont de l'ordre de 820 mm, pour une évapotranspiration de 550 mm (Langhor, 2010). Généralement, on observe, en Moyenne Belgique, un déficit de précipitations de mai à septembre.

Le printemps 2011 a été particulièrement sec et ensoleillé (Tableau 1). Par contre, les mois de juin et juillet furent dans les limites inférieures des normales de températures et de précipitations. Les précipitations du mois d'août étaient très au-dessus de la normale mensuelle, avec un déficit de la durée d'ensoleillement (IRM, 2011).

Tableau 1. Valeurs climatiques observées et normales mensuelles, avril et mai 2011 (IRM, Uccle)

	AVRIL 2011		MAI 2011	
	<i>Valeur observée</i>	<i>Normale mensuelle</i>	<i>Valeur observée</i>	<i>Normale mensuelle</i>
Précipitations	25,8 mm	51,3 mm	22,5 mm	66,5 mm
Température moyenne	14,1°C	9,8°C	14,8°C	13,6°C
Ensoleillement	238 heures	159 heures	264 heures	191 heures

2. État sanitaire et dépérissement

La vitalité d'un arbre est définie comme sa capacité à assimiler les ressources, se développer, survivre aux stress, s'adapter aux changements et se reproduire (Dobbertin et Brang, 2001). Corollairement, le dépérissement en forêt est un processus d'affaiblissement général de l'arbre, causé par un faisceau de facteurs interagissant entre eux. Le dépérissement est un processus complexe et évolutif. Ses principaux symptômes sont la perte de vitalité (défoliation, diminution de la croissance, décoloration des feuilles) et la mortalité de branches et de rameaux (Laurent et Lecomte, 2005 ; Nageleisen et al., 2010). La plupart des facteurs à l'origine du dépérissement sont abiotiques et ne sont *a priori* pas identifiés (Tabeaud et Simon, 1993). La mort de l'arbre est une issue possible mais non certaine du dépérissement (Mueller-Dombois, 1987 ; Nageleisen, 1993 ; Nageleisen et al., 2010). Il est courant de hiérarchiser les facteurs causaux en trois catégories (Mueller-Dombois, 1987 ; Nageleisen, 1993 ; Pedersen, 1998a ; Pedersen, 1998b ; Laurent et Lecomte, 2005 ; Daise et al. 2009) :

- les *facteurs prédisposants*, qui sont propres à l'endroit, au massif et aux arbres, et qui en déterminent la productivité mais aussi son degré de résistance ou de faiblesse face aux agressions potentielles (ex. : patrimoine génétique, climat, conditions stationnelles, âge, gestion, aménagement, pollution atmosphérique) ;
- les *facteurs déclenchants*, ou *incitants*, qui sont exceptionnels, plus ou moins intenses et de courte durée (stress : gel, sécheresse, attaques de défoliateurs, pollution de l'air, etc.), et qui enclenchent le processus de dépérissement plus ou moins important selon la résistance de l'arbre ou du massif ;
- les *facteurs aggravants*, qui sont les ravageurs (insectes, pourritures, virus, nématodes, etc.) ou les catastrophes (incendies, tornades) qui achèvent le processus de dépérissement de l'arbre, parfois jusqu'à la mort et la décomposition. Certains auteurs, comme Mueller-Dombois (1987) et Pedersen, (1998b), considèrent que ces facteurs ne participent pas à proprement parler au dépérissement, car ils interviennent après que celui-ci soit irréversible. Ils ne feraient alors qu'accélérer la disparition de l'arbre. Les facteurs aggravants sont les plus visibles ; ils ne sont nullement la cause du dépérissement, mais en constituent son point final.

Le classement des facteurs dans ces différentes catégories demeure une vue de l'esprit. Dans la réalité, il y a interaction permanente entre tous ces facteurs. Le dépérissement reste un processus complexe, de causes multiples qui s'entre-influencent (Figure 2) (Manion, 1981 ; Mueller-Dombois, 1987).

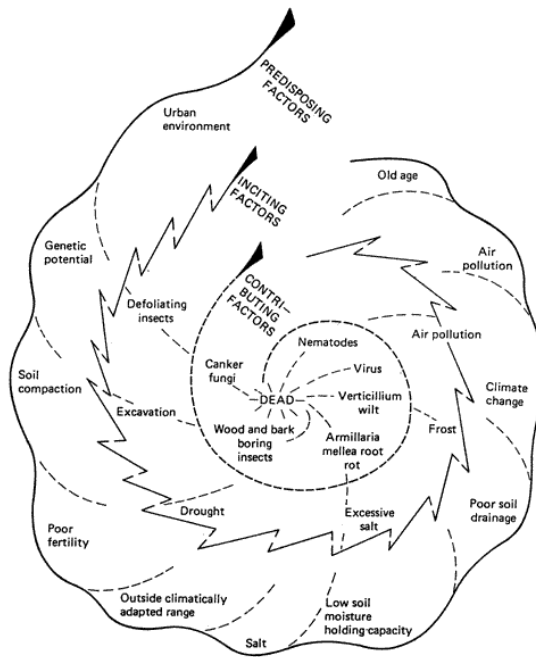


Figure 2. Représentation sous forme de spirale du processus de dépérissement (Manion, 1981)

De manière générale, les facteurs prédisposants les plus cités sont une sécheresse accrue et une élévation des températures saisonnières (Castro et al., 2007). Pour le hêtre en particulier, parmi les facteurs prédisposants, citons (Nageleisen et al., 2010) :

- l'âge (plus de 120 ans) (Nageleisen, 1993, 2005)
- le régime hydrique (hydromorphie, printemps pluvieux) (Nageleisen, 1993, 2005 ; Lebourgeois et al., 2005 ; Charru et al., 2010),
- la densité du peuplement. (Nageleisen, 1993, 2005),
- les provenances inadaptées au site (Innes, 1993).

Pour le hêtre, le gel et les épisodes de sécheresses figurent parmi les facteurs déclenchants. Pour le chêne (sessile et pédonculé), parmi les facteurs prédisposants, Nageleisen (1993) cite l'âge (plus de 120 ans). Si, pour le chêne pédonculé, la sécheresse est l'un des principaux facteurs déclenchants du dépérissement, des facteurs secondaires comme la défoliation par les insectes phyllophages se révèlent particulièrement importants (Innes, 1993). Pour les trois essences, les champignons et les insectes xylophages sont des facteurs aggravants.

3. Campagne de suivi sanitaire 2011

Les activités suivantes ont été réalisées en 2011 :

- formation des adjoints forestiers (27 juin 2011),
- exercice pratique préalable à la campagne d'observation (4 juillet 2011),
- estimation de la défoliation des arbres carottés (août 2011),
- estimation de la fermeture du couvert par densiomètre (juillet 2011).

3.1. Plan d'échantillonnage

Pour être représentatives des peuplements de la forêt de Soignes bruxelloise (§ 1.2), 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 (CDAF¹) 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 de travail des adjoints forestiers, la grille des 34 placettes de suivi sanitaire a été partagée en trois sous-échantillons (Braem *et al.*, 2009). Le premier est constitué des 6 placettes en chênaie et est visité tous les ans. Les deux autres ont été formés en scindant la grille des 28 placettes en hêtraie, en ne retenant qu'une rangée de placettes d'alignement nord-sud sur deux (Figure 3). Ces deux sous-échantillons comportent chacun une quinzaine de placettes et sont visités alternativement d'une année à l'autre (Tableau 2).

Tableau 2. Placettes des sous-échantillons. Les numéros correspondent aux identifiants des placettes.

<i>Sous-échantillon</i>	<i>Typologie</i>	<i>Placettes</i>
Chênaies	chênaies mélangées	2791, 3197, 3595, 4529
	chênaies pures	4449, 4781
Année impaire	hêtraies mélangées	3033, 4625
	hêtraies pures	3031, 3345, 3349, 3669, 3671, 3989, 4307, 4309, 4618, 4928, 4947
Année paire	hêtraies mélangées	2877, 4147, 4151
	hêtraies pures	2879, 3509, 3511, 3831, 4145, 4458, 4467, 4469, 4778, 4783, 4785, 5101

¹ Centre de Développement Agro-Forestier (Chimay).

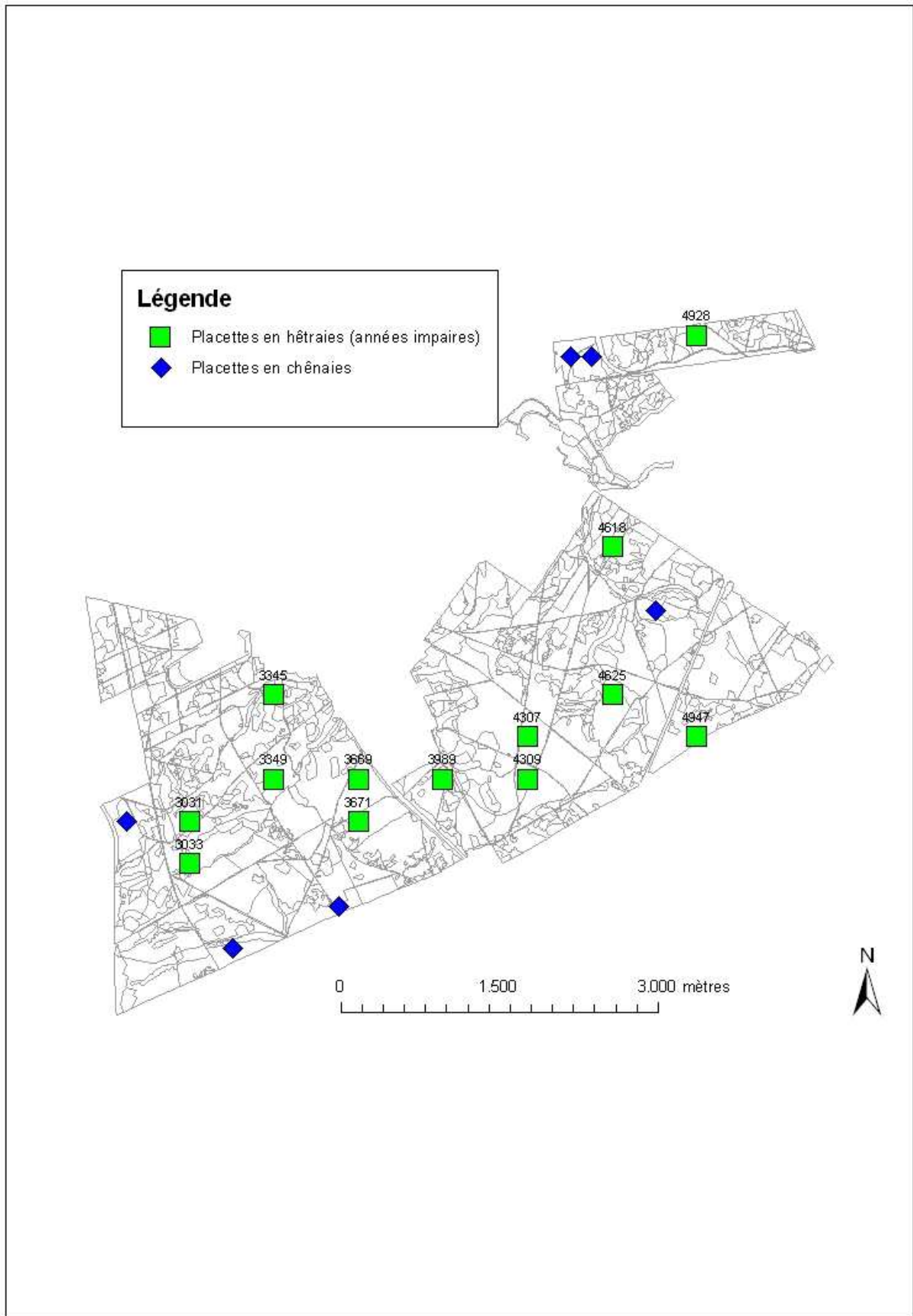


Figure 3. Positions des placettes des sous-échantillons – années impaires. Les placettes sont celles visitées en 2011.

Les arbres retenus pour le suivi sanitaire ont une circonférence du tronc à 1,5 m de hauteur égale ou supérieure à 80cm. La couronne doit capter la lumière : les arbres surcimés ne sont pas donc évalués car trop influencés par la concurrence. Ils sont néanmoins répertoriés. Dans les 28 placettes en hêtraie, 10 arbres (hêtres ou chênes) au plus sont considérés dans le rayon maximum de 18 m autour de la placette. Dans les 6 placettes en chênaie, 15 chênes indigènes au plus ont été observés dans un rayon maximum de 30 m autour de la placette. Cela permet de renforcer l'effectif des chênes dans l'échantillon.

En 2011, les 19 placettes prévues ont été observées (Tableau 2), à l'exception de la placette 3669, mise à blanc en 2010. De nombreux hêtres des placettes 3671, 4147 et 4947 sont martelés, y compris des arbres témoins².

Deux correspondants « santé forêt » (un par brigade), MM. Bram Aertsen et Bart Swerts (BE-IBGE) ont été désignés en 2011 parmi les adjoints forestiers (§ 3.5). Les correspondants coordonnent la campagne d'observation. Les placettes en chênaie sont observées exclusivement par les correspondants. Les placettes en hêtraie sont observées par au moins un correspondant, accompagné d'un adjoint, si possible responsable du triage visité.

3.2. Protocole d'évaluation

Le protocole d'observation est celui mis au point dans le cadre du programme international concerté sur les forêts (*ICP Forests*). Le principe de la méthode est de coter divers critères (défoliation, décoloration, fructification, dommages et symptômes...) à observer à l'œil nu ou aux jumelles, en été. Chaque arbre observé est clairement identifié par un numéro et sa position (distance – azimut) par rapport au centre de la placette. L'arbre est décrit en trois étapes : (i) conditions d'observation, (ii) évaluation proprement dite de l'état de la couronne, et (iii) dommages et symptômes. Le protocole prévoit une série de critères d'évaluation pour chaque étape, sous forme de choix multiples. Chaque option porte un code chiffré. Les options de chaque critère sont reprises dans un aide-mémoire de terrain préparé à cet effet et les codes sont inscrits sur une fiche de terrain spéciale. La majorité des observations portent sur la couronne dite « évaluable ». Cette couronne évaluable est définie comme la partie supérieure de la couronne visible au moment de l'évaluation. Elle inclut donc seulement les zones qui ne sont pas influencées par les arbres voisins (Eichhorn et al., 2010).

En 2011, un indice supplémentaire est mesuré : la fermeture du couvert. La fermeture du couvert³ est définie comme la proportion de ciel cachée par la végétation en un point donné (Daubenmire (1959), cité par Seidel et al. (2011) ; Baudry et al., 2010). C'est une manière d'exprimer le climat lumineux du peuplement. La fermeture du couvert a été mesurée à l'aide du densiomètre. Il s'agit d'un miroir concave sur lequel une grille de mailles carrées est gravée (Figure 4). L'angle d'ouverture du miroir est de 60 à 80°. Maintenu horizontalement à hauteur du coude, quatre lectures (directions cardinales) sont effectuées sur le centre de la placette, avant d'en faire la moyenne. Une lecture consiste à compter le nombre de carrés dans lesquels se reflète le feuillage, et à exprimer la proportion de carrés en pourcents. La valeur va donc de 0% (placette complètement ouverte) à 100% (placette complètement fermée).

² Arbres numérotés de manière permanente pour permettre le repérage du centre des placettes de l'Inventaire Permanent (Alderweireld, 2007).

³ La fermeture du couvert est à distinguer du degré de recouvrement, qui est la projection verticale au sol de la canopée. La fermeture du couvert exprime le climat lumineux en un point, tandis que le degré de recouvrement l'exprime sur une surface (Baudry et al., 2010).



Figure 4. Densiomètre. Les bords sont occultés pour faciliter la lecture.

En 2011, la fermeture du couvert a été mesurée sur les 19 placettes visitées en 2011. La fermeture du couvert a également été mesurée sur sept placettes supplémentaires, à l'occasion des contrôles du suivi sanitaire (début juillet) et des accompagnements des adjoints forestiers (fin juillet).

3.3. Caractéristiques des arbres

Effectif

En 2011, 19 placettes ont été visitées. Cent-soixante arbres (111 hêtres et 49 chênes indigènes) ont été observés pour au moins un critère sanitaire. Parmi les chênes, on dénombre 7 chênes sessiles et 42 chênes pédonculés. La défoliation n'a pas pu être estimée sur deux hêtres, dont la couronne était totalement invisible (Tableau 3). La Figure 5 et la Figure 6 montrent les distributions des arbres selon les classes de circonférences. En 2010, 193 arbres (142 hêtres et 51 chênes) avaient été observés. Le sous-échantillon de 2010 comporte en effet 21 placettes, contre 19 pour celui de 2011, ce qui explique que moins d'arbres ont été notés. Il faut ajouter que la placette 3669, prévue en 2011, a été mise à blanc.

Tableau 3. Effectif des arbres observés en 2011.

	<i>Hêtres</i>	<i>Chênes pédonculés</i>	<i>Chênes sessiles</i>
Défoliation notée	109	42	7
Défoliation non notée	2	0	0
Total	111	42	7

Les hêtres d'une circonférence comprise entre 80 et 240cm ont un effectif plus ou moins constant, avec un maximum pour la classe des 120-140cm, qui constitue 17% de l'échantillon en hêtre, et un minimum pour la classe des 180-200cm, qui ne forme que 4% de l'échantillon. Au-delà de 240cm de circonférence, l'effectif diminue nettement. (Figure 5). Plus de la moitié des chênes observés sont de jeunes arbres d'une circonférence inférieure à 119cm (Figure 6).

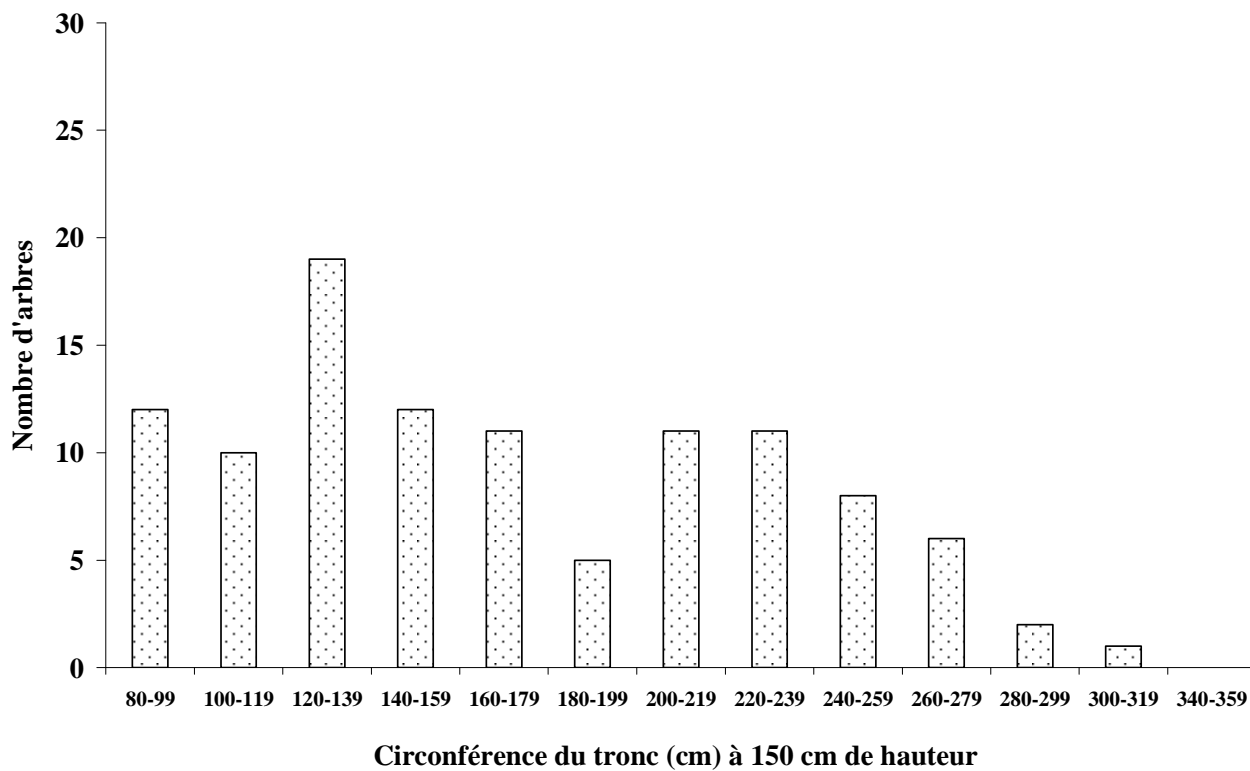


Figure 5. Distribution des hêtres selon les classes de circonférences (2011)

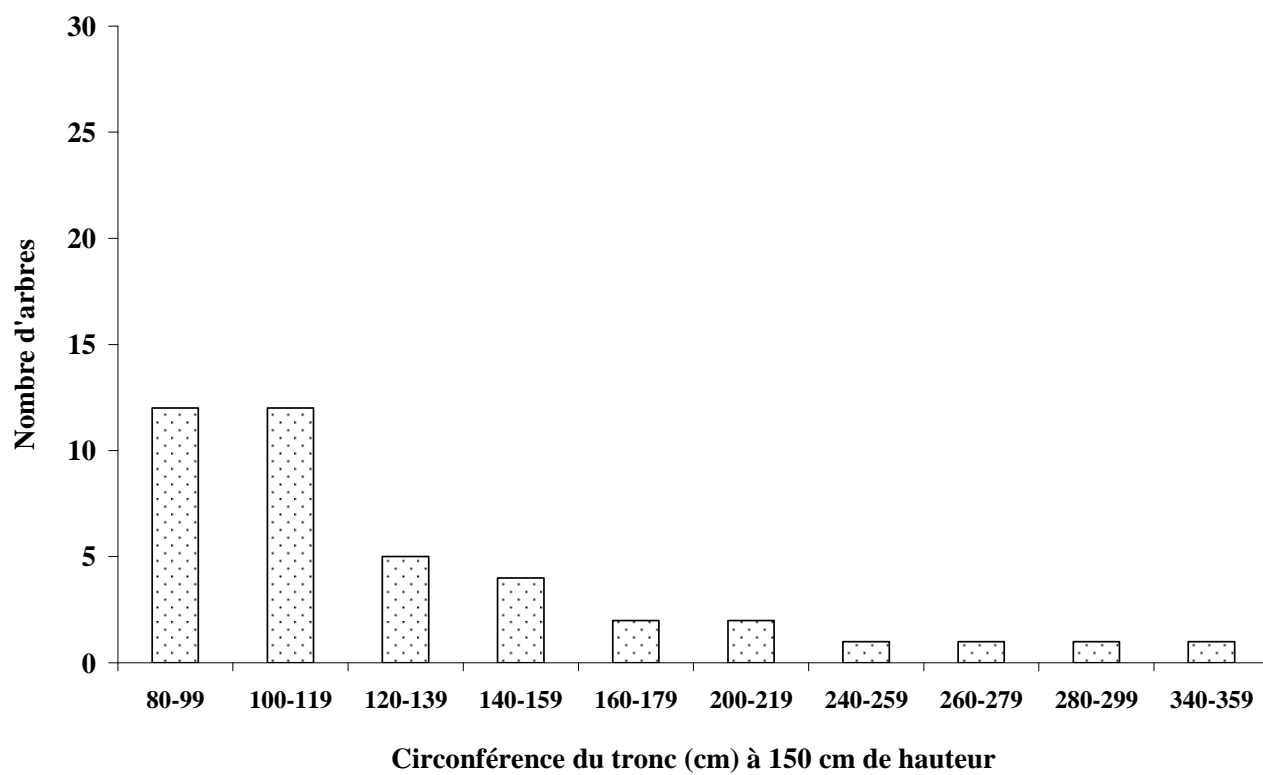


Figure 6. Distribution des chênes indigènes selon les classes de circonférences (2011)

Concurrence

Selon le protocole standardisé, la concurrence est définie comme l'espace disponible pour le développement de la couronne. Elle se mesure en six niveaux (de « couronne touchée sur un côté » à « couronne touchée sur quatre côtés », plus « croissance libre » (arbre isolé) et « arbre surcimé » (c'est-à-dire en sous-étage)). Cet indice reflète le degré de fermeture autour de l'arbre.

La majorité des chênes et des hêtres entrent en concurrence sur trois ou quatre côtés (Figure 7). On note 1 chêne sessile touché sur un côté, 3 chênes sessiles touchés sur trois côtés et 3 chênes sessiles touchés sur 4 côtés. Seuls 3% des hêtres et des chênes croissent sans contraintes.

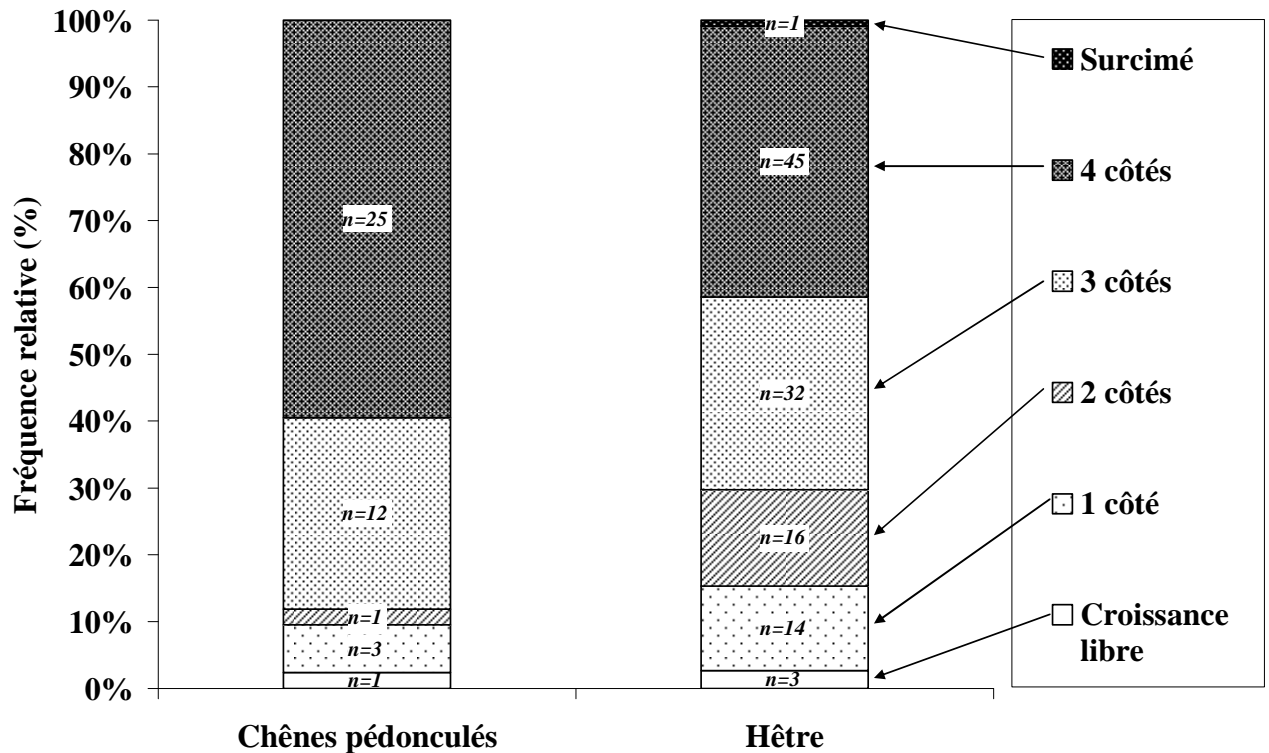


Figure 7. Distribution des arbres observés selon le degré de concurrence (2011)

Statut social

Selon le protocole standardisé, le statut social est une mesure relative de la position qu'un arbre occupe par rapport aux arbres environnants. Le statut social d'un arbre dépend de nombreux facteurs : concurrence des arbres voisins, sylviculture (éclaircies, régénération), conditions stationnelles, génétique de l'arbre lui-même.

Quatre classes sont définies (Dhôte, 1999 ; Eichhorn *et al.*, 2010) :

- i. Dominant : arbre dont la couronne dépasse le niveau moyen de la canopée, ou arbre en croissance libre. Le bourgeon terminal se situe au-dessus de la canopée.
- ii. Codominant : arbre dont la couronne s'insère dans le niveau moyen de la canopée. Le bourgeon terminal se trouve à hauteur des autres couronnes.
- iii. Sous-dominant : arbre dont la couronne, bien qu'insérée dans la canopée, est légèrement en-dessous de la hauteur moyenne.
- iv. Dominé : arbre largement dépassé par ses voisins et ne recevant aucune lumière directe. Le bourgeon terminal est nettement au-dessous du couvert.

En 2011, près de 80% des arbres (hêtres et chênes confondus) sont classés comme dominants ou co-dominants. Un quart des chênes et 12% des hêtres sont situés sous la canopée. Ces chiffres correspondent aux proportions observées en 2010. On note 2 chênes sessiles dominants, 1 chêne sessile sous-dominant et 4 chênes sessiles co-dominants.

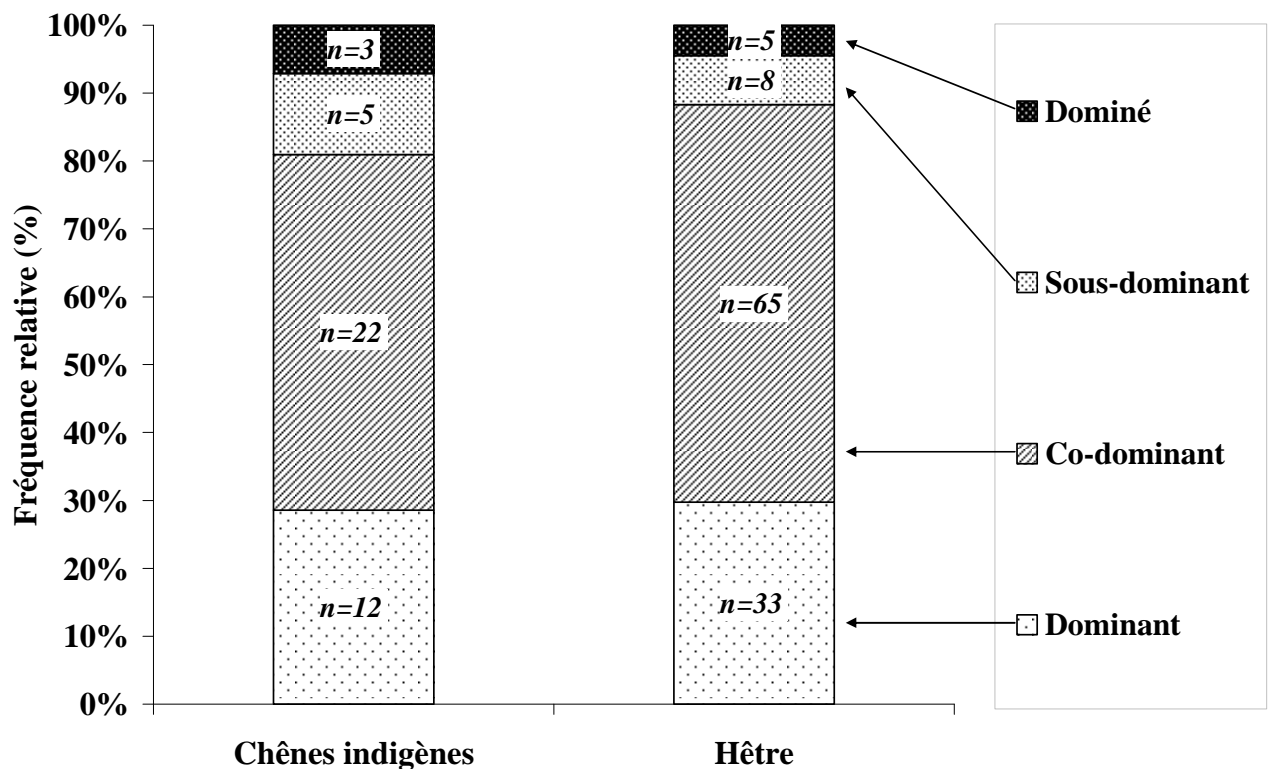


Figure 8. Distribution des arbres observés selon le statut social (2011)

Visibilité

Selon le protocole standardisé, la visibilité d'une couronne correspond aux conditions sous lesquelles la couronne évaluable peut être vue à partir du sol. Quatre catégories sont définies (Eichhorn *et al.*, 2010) :

- i. couronne entièrement visible,
- ii. couronne partiellement visible,
- iii. couronne partiellement visible et à contre-jour,
- iv. couronne masquée, c'est-à-dire cachée par les couronnes voisines. La couronne ne peut alors être vue qu'à partir du pied même de l'arbre.

Les arbres parfaitement visibles ne constituent qu'un quart de l'échantillon de hêtre, et un peu plus d'un dixième de l'échantillon de chênes (Figure 9). Un peu plus de 30% des hêtres sont classés en masqués, la plupart ayant une circonférence comprise entre 80 et 160 cm. Plus un arbre est serré entre ses voisins, plus la visibilité diminue. Dans les peuplements denses, où les couronnes sont enchevêtrées, il devient très difficile de voir la partie supérieure de la couronne. Les chiffres 2011 en hêtre sont similaires aux proportions observées en 2010. Par contre, seuls 10% des chênes pédonculés étaient vus en contre-jour en 2010, contre 33% aujourd'hui. On note 2 chênes sessiles partiellement visibles, 1 chêne sessile à contre-jour et 4 chênes sessiles masqués.

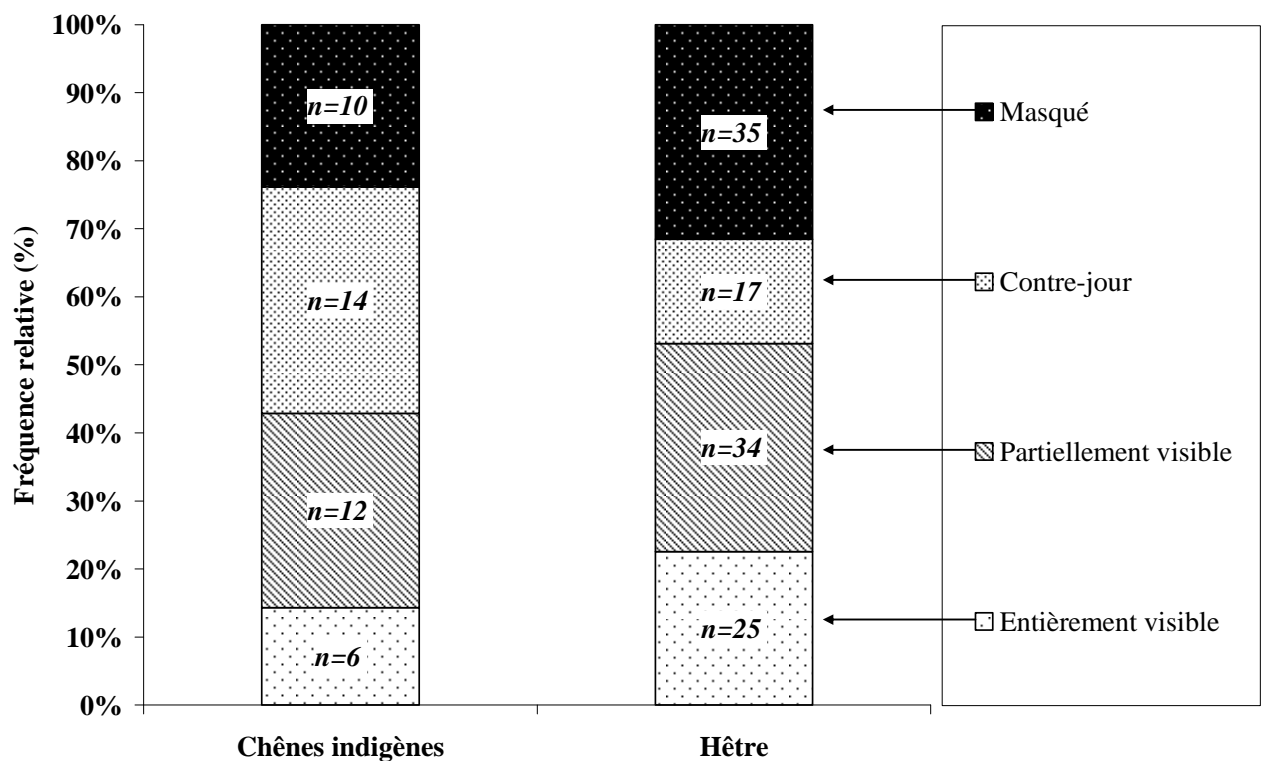


Figure 9. Distribution des arbres selon le degré de visibilité (2011)

Fermeture du couvert

La distribution des classes de fermeture du couvert (Figure 10) montre que la canopée de 20 placettes (soit un peu plus de 76%) est fermée à plus de 80%. La placette 3671 n'est fermée qu'à 46%. Elle ne comprend qu'un seul hêtre, de 257 cm, dans le rayon de 18m (§ 3.1). L'âge des arbres alentour est estimé à 172 ans (Figure 49).

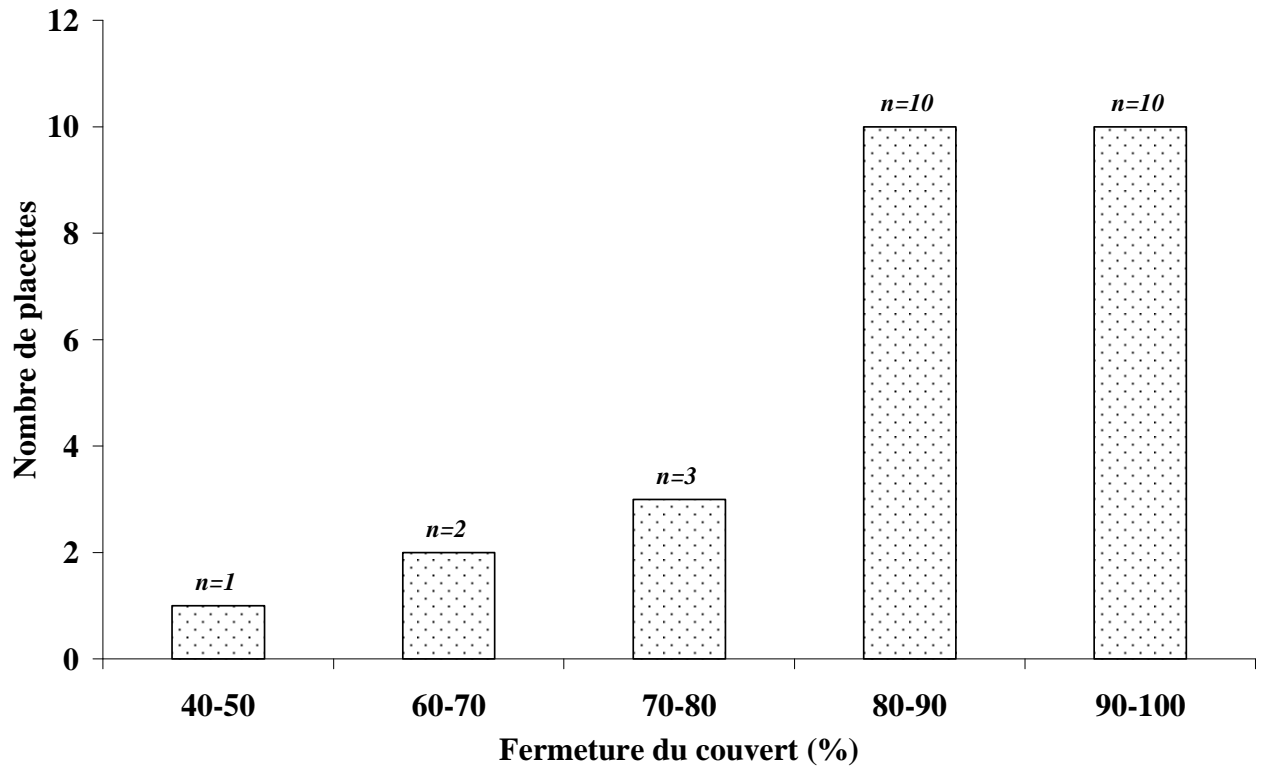


Figure 10. Distribution de classes de fermeture du couvert de 26 placettes

3.4. Encodage et traitement des données

L'ensemble des données recueillies au cours de la campagne 2011 a été enregistré dans une base de données MS Access dont les données ont été exportées dans Excel pour la réalisation des graphiques. Les graphiques et les statistiques de base ont été réalisés grâce à ces logiciels. Les analyses statistiques plus élaborées ont été faites sous le logiciel JMP 8 (§ 5.4).

3.5. Contrôle-qualité

Des contrôles sont prévus pour s'assurer de la fiabilité des données. Ces contrôles-qualité portent sur deux points (Eichhorn *et al.*, 2010) : (i) la formation des observateurs, et (ii) les contrôles de calibration. Ces deux points ont été réalisés pour la forêt de Soignes bruxelloise.

Formation des observateurs

Sept adjoints forestiers de BE – IBGE ont été formés au protocole européen *ICP Forests* lors d'une formation théorique et pratique dispensée le 27 juin 2011. Durant cette formation, les critères d'évaluation de l'état sanitaire (état de la couronne, symptômes et dommages) et les consignes méthodologiques ont été rappelés. Les critères botaniques classiques et la méthode de Kremer (2010), pour distinguer les chênes sessiles des chênes pédonculés sur base de la morphologie des feuilles, ont été présentés. Une large part a été consacrée à l'estimation de la défoliation directement sur le terrain. Pour vérifier que les estimations réalisées par les observateurs de BE-IBGE correspondent à celles de l'UCL, une journée d'exercice pratique a eu lieu le 4 juillet 2011. Huit adjoints forestiers de BE-IBGE ont estimé, individuellement, la défoliation, la décoloration et la forme de la couronne sur dix arbres, répartis entre les placettes 4309 et 4625 (trilage de Bonne-Odeur). Les observateurs devaient également rapporter les éventuels dommages. En moyenne, lors de cet exercice, la défoliation d'un arbre sur dix était sous-estimée de plus de 10%, et la défoliation de deux arbres sur dix était surestimée de plus de 10%. L'estimation de la décoloration et l'indication des dommages ne posait pas de problème. À l'issue de l'exercice, un débriefing a permis de solutionner des situations problématiques (visibilité, couronne à observer) et de rectifier les erreurs d'estimation.

Contrôle de calibration

Le protocole européen prévoit qu'au moins 5% des arbres échantillonnés soient analysés par les observateurs⁴ (ici, BE – IBGE) et, par ailleurs, par l'équipe de référence (ici, l'UCL). L'objectif final est que 70% des arbres observés deux fois aient la même cotation de défoliation à 10% près (Eichhorn *et al.*, 2010). L'UCL a estimé la défoliation sur 66 arbres (Figure 11), comprenant 50 hêtres, 4 chênes sessiles et 12 chênes pédonculés, répartis sur 5 placettes en hêtraie et 3 placettes en chênaie. Le nombre d'arbres observés à la fois par l'UCL et par BE – IBGE est de 61 (soit 40% des arbres observés en 2011).



Figure 11. Contrôle sur une placette en hêtraie, 2011.

À l'issue de la campagne 2011, il s'avère que, sur les 8 placettes de contrôle, 87% des évaluations de la défoliation effectuées par les adjoints forestiers concordent, à 10% près, avec celles de l'UCL (Figure 12), ce qui correspond à l'objectif. Plus particulièrement, 59% des estimations de BE-IBGE concordent à 5% près avec les estimations de l'UCL. La défoliation des hêtres estimée par BE-IBGE est sous-estimée de près de 5% en moyenne. Il n'y a pas d'écarts significatifs en ce qui concerne la défoliation des chênes. Les défoliations des chênes estimées par l'UCL s'étalent entre 10 et 45%, alors que les défoliations estimées par BE-IBGE s'étalent entre 0 et 35%. Les défoliations des hêtres estimées par l'UCL s'étalent entre 0 et 45 %, alors que les défoliations estimées par BE-IBGE s'étalent entre 10 et 50 %.

⁴ Bram Aertsen, Bart Swerts et Olivier Schoonbroodt.

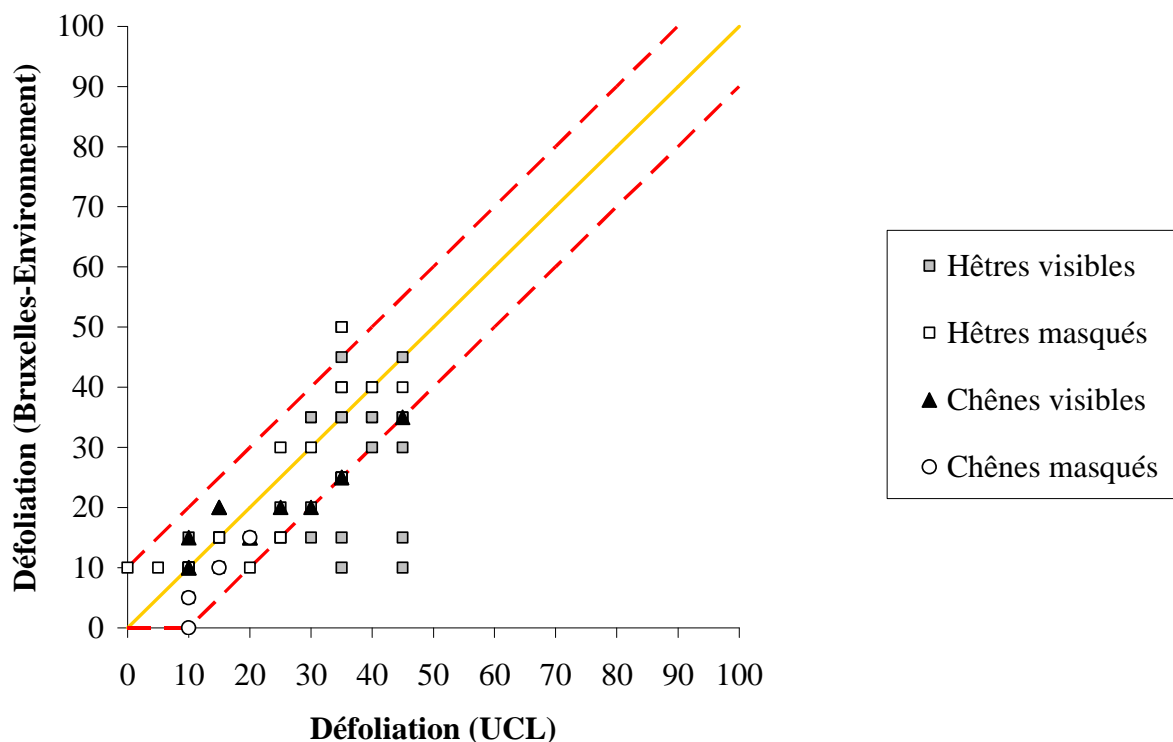


Figure 12. Comparaison des estimations de la défoliation sur les 8 placettes contrôlées (61 arbres).
Les pointillés représentent un intervalle de 10% par rapport à la droite 1:1 (correspondance parfaite).

La défoliation de quatre hêtres est largement sous-estimée par les adjoints de BE-IBGE (Figure 12). Plusieurs explications sont possibles : mauvaise évaluation de la part des adjoints forestiers, observation à contre-jour (arbres n°3 et 4, placette 3033), etc.

La Figure 13 montre, par essence et classes de circonférence, les écarts entre les estimations de BE-IBGE par rapport à celles de l’UCL. Ces écarts sont généralement minimes (de l’ordre de 5%, ce qui correspond au seuil de détection de la défoliation). La déviation moyenne (moyenne des écarts) est de -3,5%. La moyenne des écarts rapportés à la référence (ci-dessous) est de 0,08 (minimum : -1, maximum : 0,78).

Équation 1. Écart rapporté à la référence.

$$\frac{(\% \text{défol}_{UCL} - \% \text{défol}_{BE-IBGE})}{\% \text{défol}_{UCL}}$$

La défoliation des hêtres de 130-179 cm de circonférence est sous-estimée de près de 7% par BE-IBGE. La défoliation d’un chêne de 266cm de circonférence a été sous-estimée de 10%.

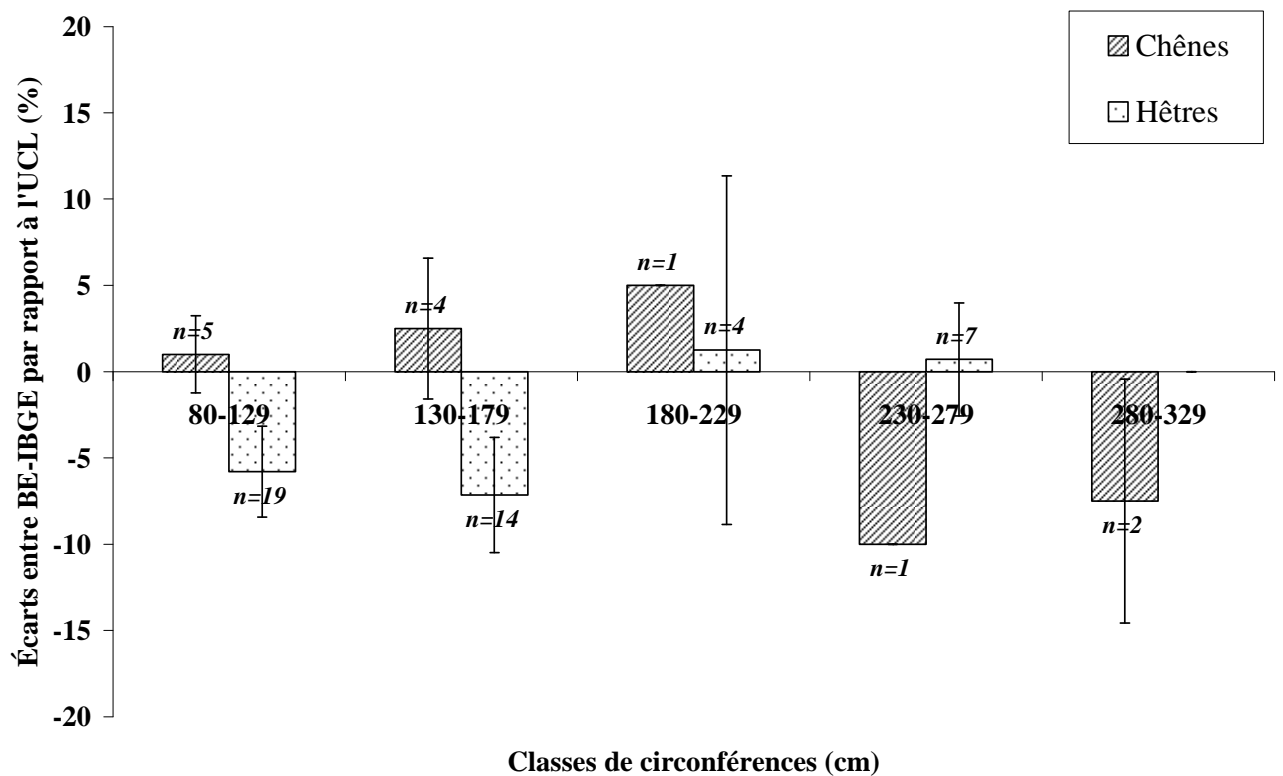


Figure 13. Écarts de l'estimation BE-IBGE par rapport à l'estimation UCL (%), par essence et classes de circonférence.

L'erreur standard est représentée par la barre d'erreur. Les valeurs négatives correspondent à une sous-estimation de BE-IBGE par rapport à l'UCL. Les valeurs positives correspondent à une surestimation de BE-IBGE par rapport à l'UCL.

Accompagnement sur le terrain

Complémentairement à l'exercice de calibration, Steve Braem a accompagné, les 28 et 29 juillet 2011, les correspondants « santé forêt » (§ 3.1), Bart Swerts et Bram Aertsen, sur les placettes en chênaie. Les correspondants ont donc pu vérifier une nouvelle fois leur bonne calibration avec l'UCL.

4. Détermination de l'âge des arbres par carottage

Les activités suivantes ont été réalisées en 2010-2011 :

- Prélèvement des carottes sur 96 arbres (hiver 2010-2011),
- Scannage des carottes (janvier-février 2011),
- Comptage des cernes (février-mars 2011),
- Rapport intermédiaire (juin 2011).

4.1. Récolte des carottes

L'objectif du travail de carottage est de déterminer l'âge des hêtres observés en forêt de Soignes, pour ensuite étudier la relation entre l'âge et le niveau de défoliation. La détermination de l'âge se fait grâce au comptage de cernes sur des carottes prélevées sur des hêtres voisins des placettes d'observation sanitaire.

Le carottage a débuté en octobre 2010 et s'est achevé en janvier 2011. Vingt-sept placettes du suivi sanitaire situées en hêtraie ont été visitées, moins la placette 5101 qui a été coupée récemment. La circonférence sur écorce a été mesurée à 1,50m. Trois hêtres dominants d'une circonférence proche de la moyenne de la placette (à l'écart-type près) sont carottés (Tableau 19). Ils sont sélectionnés au N, N-E des placettes et à une distance suffisante du centre pour limiter les risques de perturbation des arbres suivis (mise en lumière brusque, etc.). Cependant, les arbres carottés sont choisis suffisamment près de la placette, pour représenter des conditions de milieu similaires. En pratique, cette distance est de l'ordre de 20 à 30 mètres, soit la hauteur moyenne d'un arbre. Si l'arbre se trouve sur une pente marquée, le carottage se fait perpendiculairement à la pente. Sont écartés (*i*) les arbres à défauts visibles (gélivures, loupes, blessures...) et (*ii*) les arbres susceptibles de présenter des bois de réaction (compression, tension). Les arbres sélectionnés restent intégrés à la dynamique sylvicole. Ils peuvent donc disparaître à l'occasion d'une coupe. Les carottes ont toujours été prises à 1,30m de hauteur, en passant au plus près du cœur. Les trous effectués dans le tronc ont été rebouchés à l'aide d'un baume cicatrisant pour ligneux. Un chiffre, commençant à partir de 201, a été noté à la peinture orange au collet de l'arbre carotté, à l'opposé des chemins. Cent-trente-cinq carottes ont été récoltées, sur 96 arbres au total (Tableau 4).

Tableau 4. Effectifs d'arbres sondés par variable

<i>Variable mesurée</i>	<i>Effectif</i>
Carotte prélevée	96 arbres
Défoliation	83 arbres
Âge (nombre de cernes)	73 arbres
Âge et défoliation	62 arbres



Figure 14. Prélèvement d'une carotte sur un hêtre, automne 2011.

4.2. *Préparation des carottes et traitement des données*

Les carottes, ramenées au laboratoire, ont été collées sur une baguette de bois pour faciliter leur manipulation. Elles sont ensuite rabotées à l'aide d'un couteau pour une meilleure lisibilité des cernes. Dix carottes particulièrement difficiles à lire ont été poncées pour mettre en évidence les cernes. Les carottes sont ensuite scannées. Les cernes ont été comptés à l'écran, le logiciel de visualisation (WinDendro) offrant de nombreux outils pour faciliter la lecture. Les images sont archivées pour d'éventuels travaux ultérieurs.

Les cernes ont été comptés à partir des images. Le nombre de cernes est assimilé à l'âge de l'arbre. Il faut cependant rappeler que, les carottes ayant été prélevées à hauteur d'homme, le nombre de cernes ne correspond pas strictement à l'âge de l'arbre, qui est supérieur de 5 à 10 ans à celui compté par les cernes. Dans la mesure où ce biais est systématique, il n'a pas été corrigé dans l'interprétation des données. Durant l'été 2011, la défoliation a été évaluée sur 83 arbres sondés, dont 62 étaient d'âge connu par comptage des cernes (Tableau 4).

Les 14 carottes récoltées sur les placettes 4145, 4307, 4309 et 4467 (12 arbres au total) se sont révélées inexploitables : elles se décomposaient en de nombreux tronçons qu'il était impossible de rassembler pour reconstituer la carotte entière.

5. Résultats

Étant donné leur importance, les chiffres concernant la défoliation sont présentés en premier lieu. Viennent ensuite les facteurs susceptibles d'expliquer la défoliation, fermeture du couvert et âge compris. Enfin, un paragraphe est consacré aux symptômes et dommages. Les graphiques présentant les défoliations moyennes sont, le cas échéant, dotés d'une barre d'erreur représentant l'erreur-standard de la moyenne calculée à partir de l'écart-type de la population. Les effectifs sont indiqués le cas échéant. Le nombre d'arbres étudiés peut varier d'un critère à l'autre, compte tenu des difficultés d'observation ou des omissions. Hormis pour les analyses relatives à la défoliation, les données issues des campagnes précédentes reprennent l'ensemble des arbres, y compris les arbres classés comme « masqués ».

5.1. Défoliation

La défoliation est définie comme la perte foliaire dans la partie supérieure de la couronne, par comparaison à un arbre sain de référence. L'arbre de référence est un arbre, imaginaire ou réel, qui correspond à l'arbre moyen du peuplement mais pleinement et densément feuillé (Eichhorn et al., 2006). L'évaluation de la défoliation est donc une estimation du volume de feuilles perdu, par intervalles de 5%. Un score de 100% est donné aux arbres morts. Un exemple en chêne est proposé à la Figure 15. La défoliation est un critère intégrateur qui reflète l'influence, entre autres, des conditions stationnelles (sol, historique du site, etc.), de fluctuations conjoncturelles (climat, champignons, insectes) ou propres à l'arbre (âge, provenance), ainsi que des facteurs anthropiques (coupes, etc.) (Laurent et Lecomte, 2005 ; Johnson et Jacob, 2010 ; Nageleisen et al., 2010). En ce sens, il donne une idée globale de la santé de l'arbre.

La défoliation est néanmoins un concept à manipuler avec prudence. Il y a d'abord une part inhérente de subjectivité dans son estimation (effet observateur). Ensuite, on ne peut réduire la perte de vitalité, phénomène complexe, à la seule défoliation, qui n'est qu'un symptôme parmi d'autres (Dobbertin et Brang, 2001).



Figure 15. Chêne pédonculé de la placette 3595 (triage des Bonniers) dont la défoliation est estimée à 20%.

Défoliation moyenne par essence

La Figure 16 présente la défoliation moyenne par essence en 2011, calculée sur l'ensemble des arbres, peu importe la visibilité. La défoliation est de 28% pour le hêtre (27% en 2010) et de 26% pour les chênes indigènes (29% en 2010). En particulier, les 38 chênes pédonculés ont une défoliation moyenne de 26% et les 4 chênes sessiles ont une défoliation moyenne de 16%. La défoliation des hêtres en 2011 s'étale entre 5 et 65% (Figure 41).

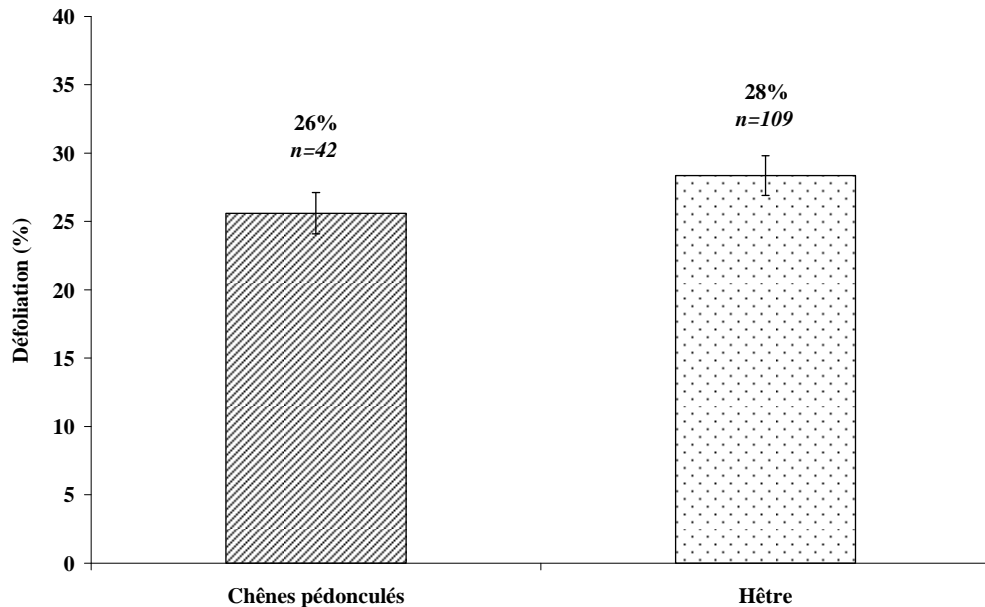


Figure 16. Défoliation moyenne par essence (2011).

Des arbres, oubliés lors de la campagne précédente ou passés au-delà du seuil d'inventaire, ont été retrouvés au sein de certaines placettes. Pour ces placettes, le nombre d'arbres dépasse alors la limite des 10 hêtres ou des 15 chênes définis auparavant (§ 3.1 et Tableau 5). Ils ont été intégrés dans l'échantillon. La Figure 17 montre la défoliation moyenne calculée à partir des moyennes des placettes (Tableau 5). Elle est de 31% pour les hêtres et de 22% pour les chênes.

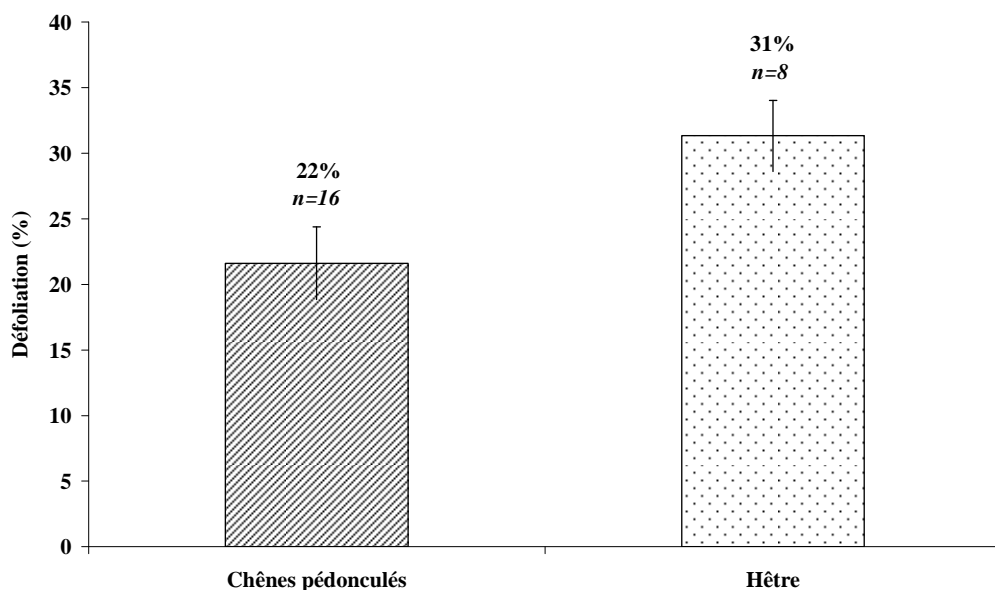


Figure 17. Moyenne, par essence, des défoliations moyennes par placette (2011).

Tableau 5. Moyennes des défoliations et des circonférences, par essence et par placette (2011).

Les écarts-types sont entre parenthèses.

<i>Essence</i>	<i>Placette</i>	<i>Typologie</i>	<i>Effectif</i>	<i>Défoliation (%)</i>		<i>Circonférence (cm)</i>	
Hêtre	2791	Chênaies mélangées	11	15	(2)	145	(7)
	3031	Hêtraies pures	8	48	(5)	188	(9)
	3033	Hêtraies mélangées	6	24	(6)	168	(26)
	3197	Chênaies mélangées	10	18	(5)	187	(18)
	3345	Hêtraies pures	7	42	(6)	220	(13)
	3349	Hêtraies pures	4	39	(6)	255	(16)
	3595	Chênaies mélangées	1	25	-	289	-
	3671	Hêtraies pures	1	40	-	257	-
	3989	Hêtraies pures	5	38	(5)	265	(18)
	4307	Hêtraies pures	2	35	(21)	223	(82)
	4309	Hêtraies pures	5	47	(5)	218	(6)
	4529	Chênaies mélangées	5	30	(5)	149	(31)
	4618	Hêtraies pures	18	26	(3)	119	(6)
	4625	Hêtraies mélangées	7	24	(5)	154	(33)
	4928	Hêtraies pures	13	17	(2)	109	(7)
	4947	Hêtraies pures	6	33	(3)	200	(18)
Total hêtres			109	28	(1)	171	(6)
Chênes indigènes	2791	Chênaies mélangées	4	15	(2)	109	(9)
	3033	Hêtraies mélangées	1	25	-	171	-
	3197	Chênaies mélangées	2	10	(7)	212	(59)
	3595	Chênaies mélangées	3	23	(7)	257	(26)
	4449	Chênaies pures	16	30	(1)	119	(17)
	4529	Chênaies mélangées	10	31	(4)	100	(9)
	4625	Hêtraies mélangées	2	23	(4)	175	(44)
4781	Chênaies pures	4	16	(3)	135	(9)	
Total chênes indigènes			42	26	(2)	133	(10)

La défoliation chez le hêtre suit une distribution de type log-normale étirée vers la droite (Figure 18). Un peu plus de 60% des hêtres et des chênes ont une défoliation supérieure ou égale à 25%. Un seul chêne présente une défoliation inférieure à 10%.

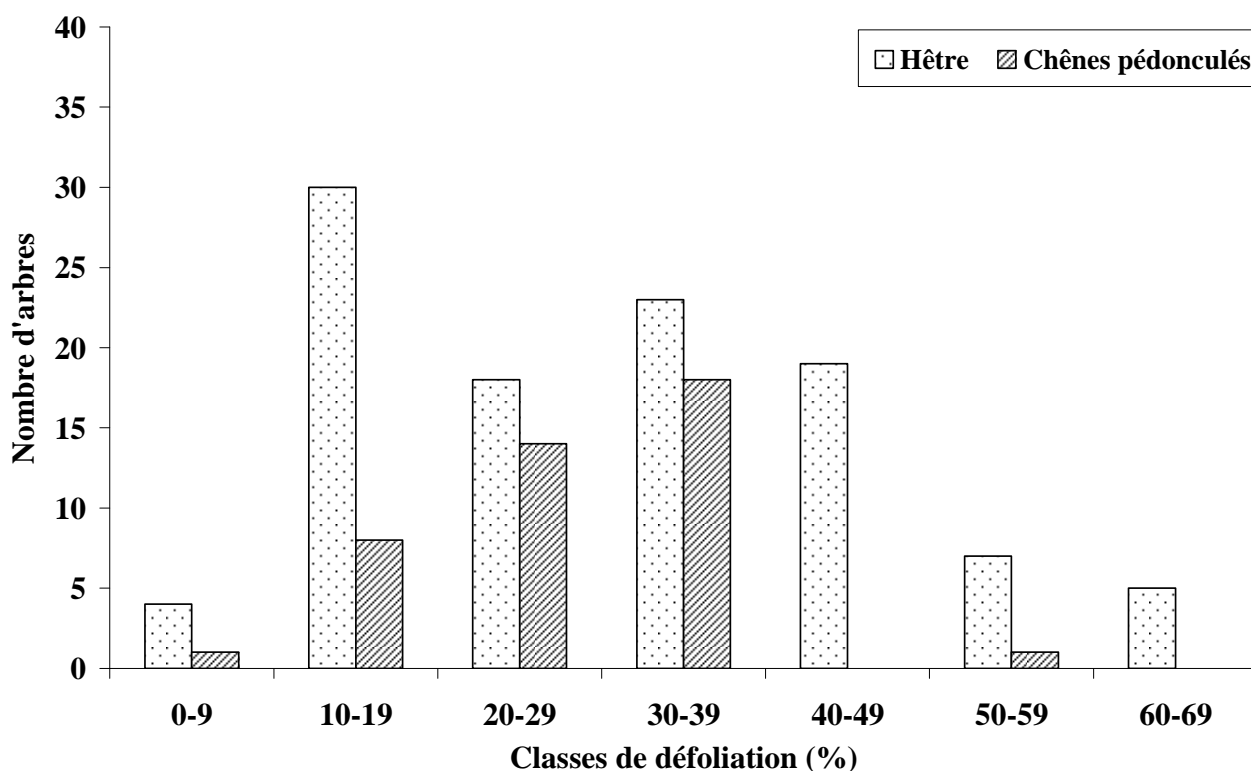


Figure 18. Distribution des arbres selon les classes de défoliation, 2011.

Les valeurs de défoliation recueillies dans les régions voisines permettent de fixer des ordres de grandeur. Cependant, la comparaison entre ces chiffres et ceux notés en forêt de Soignes est difficile, car les peuplements qu'ils décrivent sont différents, tant au niveau de l'âge que de la composition spécifique ou des conditions stationnelles. De plus, la qualité des observations peut différer d'un réseau à l'autre (Ghosh et al., 1995 ; Klap et al., 2000 ; Johnson et Jacob, 2010). Les chiffres qui suivent sont donc proposés à titre indicatif et n'autorisent pas des conclusions définitives.

Entre 1991 et 2009⁵, la défoliation moyenne pour l'Europe a oscillé entre 15% (1991) et 25% (2004) pour le hêtre et entre 18% (1991) et 27% (2005) pour les chênes pédonculé ou sessile. De manière générale, la défoliation croît en Europe, toutes espèces confondues (Fischer et al, 2010). En Europe, la défoliation du hêtre reste sous la barre des 25% (Figure 19).

⁵ Lors de la rédaction du présent rapport, les données 2011 n'étaient pas encore disponibles.

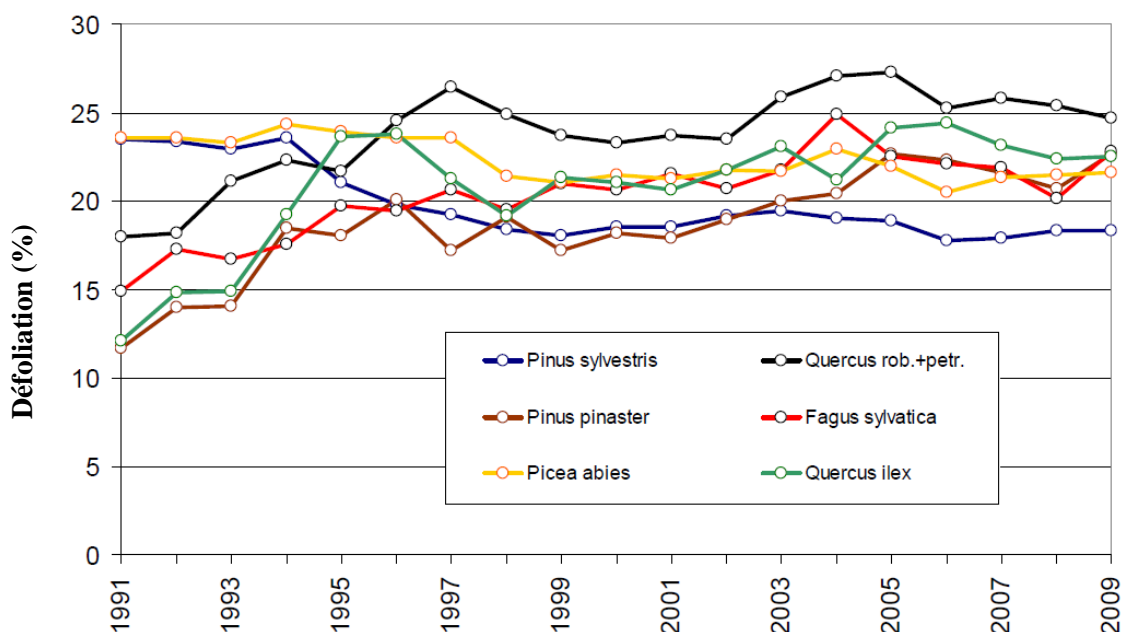


Figure 19. Évolution de la défoliation (pins, hêtre, chênes indigènes, épicéa) sur le réseau de niveau I sur l'ensemble de l'Europe, entre 1991 et 2009 (Fischer et al., 2010)

La Figure 20 retrace l'évolution de la défoliation du hêtre et des chênes pédonculé et sessile sur l'ancien réseau I de Wallonie, entre 1993 et 2009⁶. La défoliation, tant en chênes qu'en hêtre, croît lentement, passant l'ordre de 10% en 1993 à environ 20% en 2009. La défoliation du hêtre était à plus de 25% en 2005, ce qui peut être attribuée à la crise des scolytes et les effets de l'été 2003 (Laurent et Lecomte, 2005).

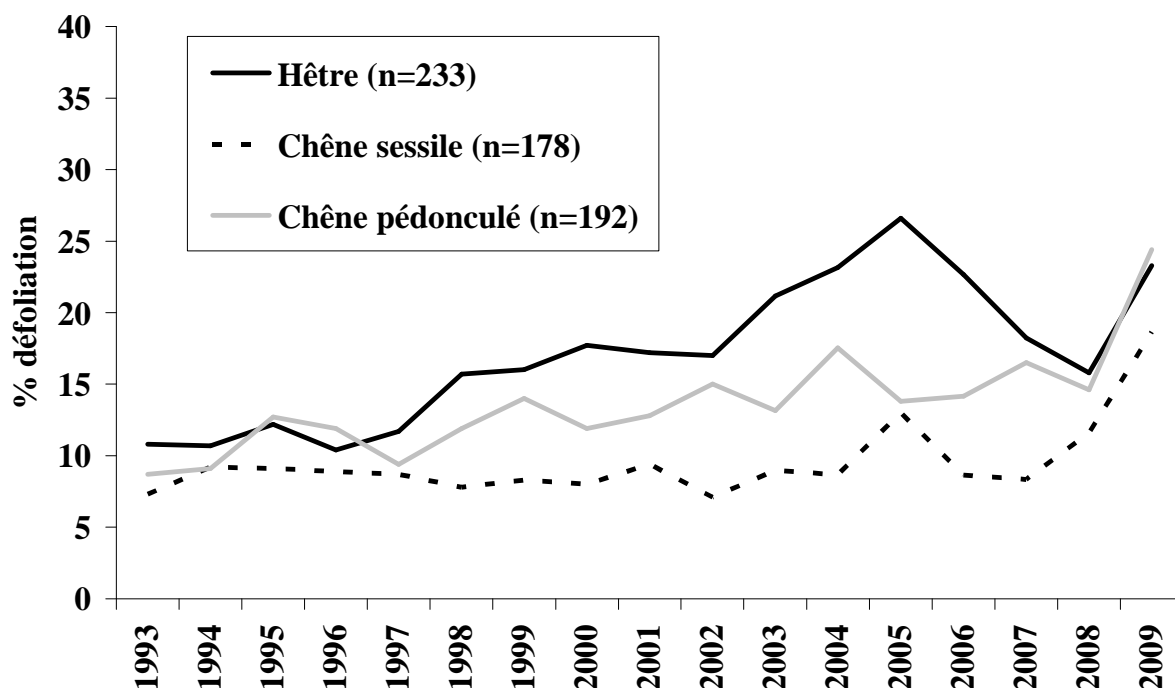


Figure 20. Évolution de la défoliation (hêtre, chênes indigènes) sur l'ancien réseau de niveau I de Wallonie, entre 1993 et 2009 (C. Laurent, SPW, communication personnelle, 2010)

⁶ Lors de la rédaction du présent rapport, les données 2011 n'étaient pas encore disponibles.

La Figure 21 et la Figure 22 montrent l'évolution de la défoliation du hêtre et des chênes indigènes sur le réseau II de Wallonie, entre 1995 et 2011. En hêtre, on observe une augmentation de la défoliation depuis l'installation du réseau en 1996. La défoliation en 2005 était particulièrement élevée, à Eupen notamment, avant de décroître entre 2006 et 2008 puis de croître à nouveau jusqu'en 2011, année des défoliations les plus élevées (entre 20 et 35%).

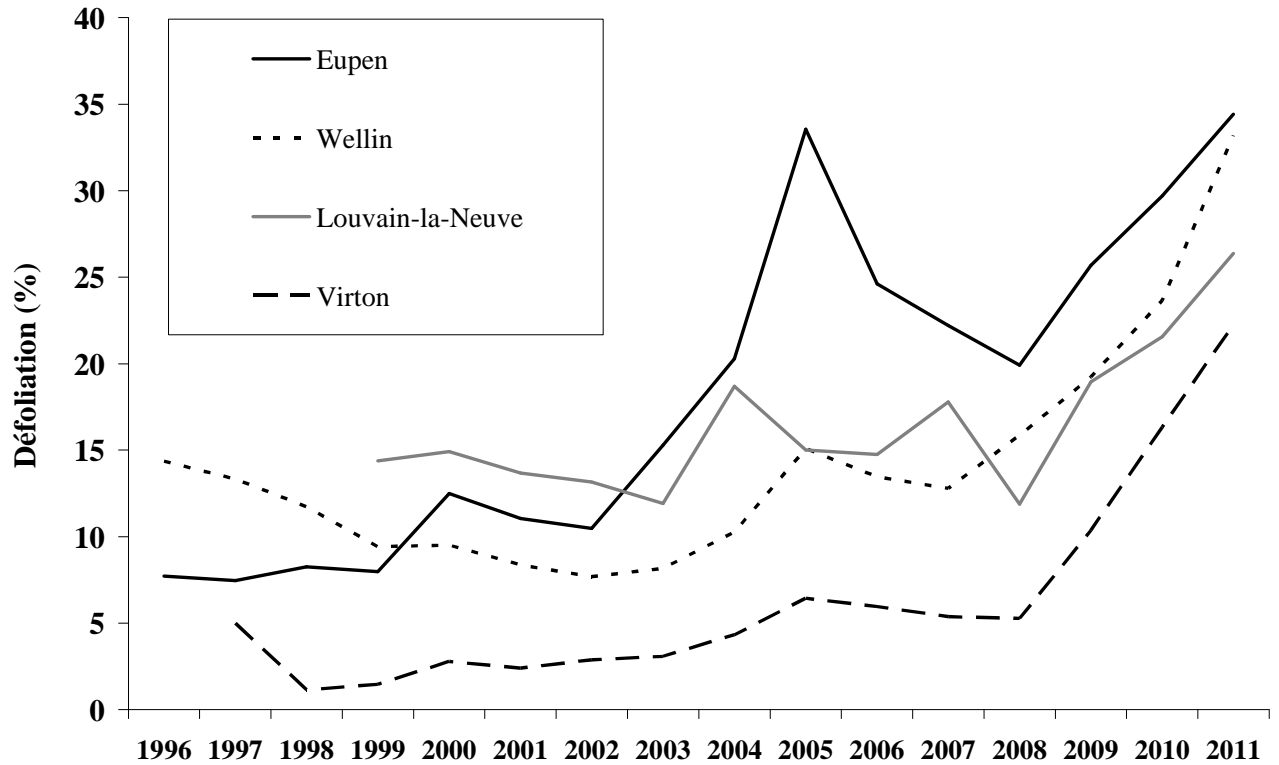


Figure 21. Évolution de la défoliation (hêtre) sur le réseau de niveau II, Wallonie, entre 1996 et 2011 (n=52 pour chaque placette)

La défoliation des chênes à Chimay évolue dans une fourchette allant d'un peu moins de 5% à plus de 20%, sans tendance apparente. À Louvain-la-Neuve, la défoliation augmente globalement depuis 1999, passant de l'ordre de 5-10% à 20%.

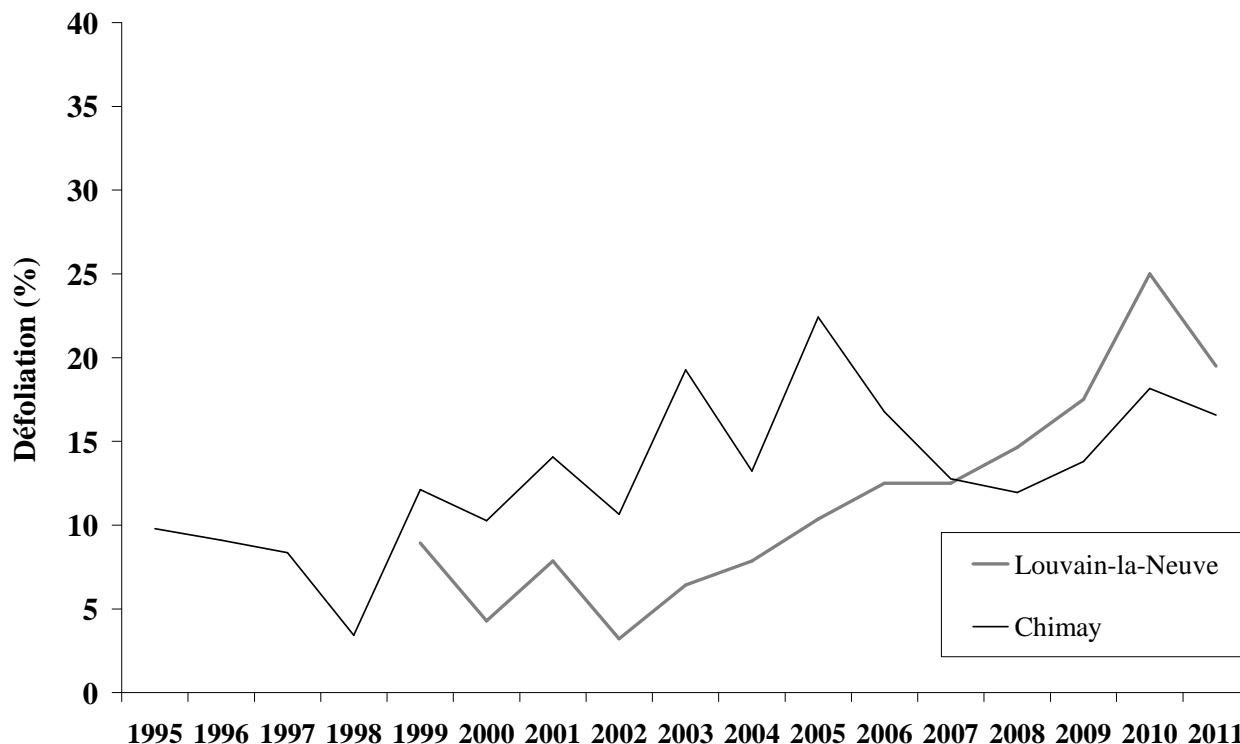


Figure 22. Évolution de la défoliation (chênes sessiles) sur le réseau de niveau II, Wallonie, entre 1995 et 2011 (n=54 à Louvain-la-Neuve, n=14 à Chimay)

La Figure 23 montre l'évolution de la défoliation du hêtre sur l'ensemble du réseau I de Flandre, entre 1987 et 2010⁷. On note que la défoliation évolue dans une fourchette relativement étroite et reste autour de 17%. L'évolution en Flandre contraste avec celle observée en Wallonie (Figure 21), où on observe une augmentation assez nette de la défoliation depuis les années nonante. Le facteur régional semble donc avoir une influence sur la défoliation.

⁷ Lors de la rédaction du présent rapport, les données 2011 n'étaient pas encore disponibles.

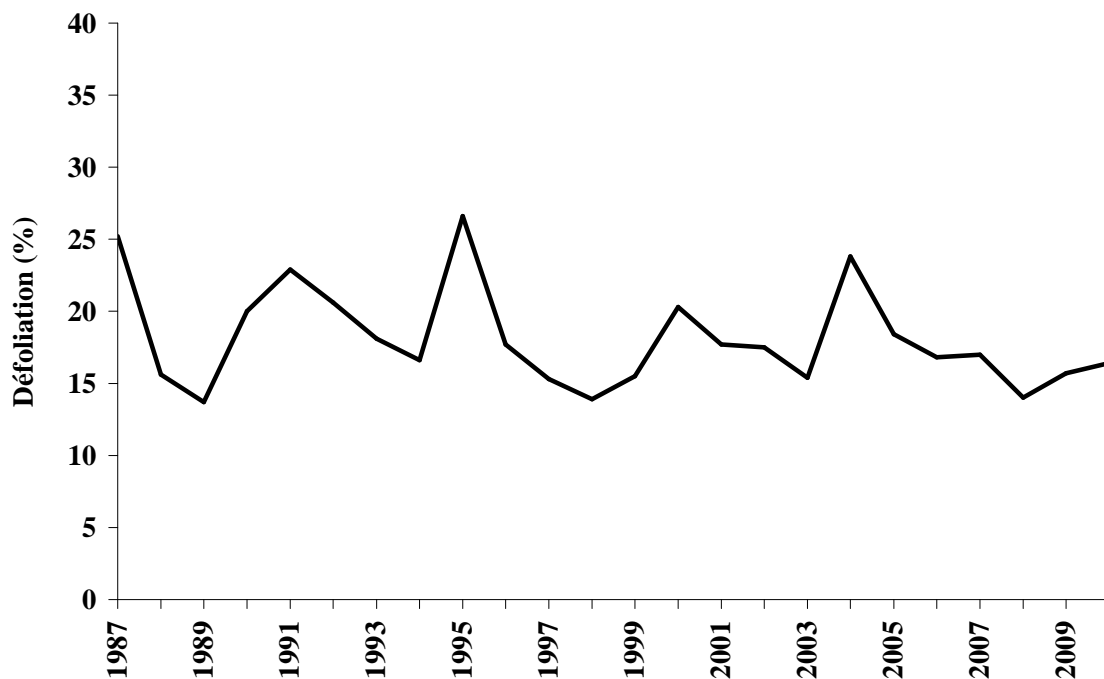


Figure 23. Évolution de la défoliation (hêtre) sur le réseau I en Flandre, entre 1987 et 2010 (G. Sioen, communication personnelle, 2010)

La Figure 24 présente l'évolution de la défoliation du hêtre sur deux placettes de la forêt de Soignes flamande, entre 1987 et 2011. La défoliation y a légèrement augmenté ces dernières années, jusqu'à 25% à Tervuren et 29% à Hoeilaart. Sur le long terme, la défoliation reste stable (aux alentours de 22%). En 2011, une forte fructification a été notée sur les deux placettes, et plus généralement en Flandre (G. Sioen, communication personnelle, septembre 2011).



Figure 24. Évolution de la défoliation (hêtre) sur les placettes de Tervuren et de Hoeilaart (forêt de Soignes flamande), entre 1987 et 2010 (G. Sioen, communication personnelle, septembre 2011)

Le Tableau 6 compare les défoliations moyennes de différentes essences pour l'Europe et des deux régions de Belgique.

Tableau 6. Comparaison des défoliations moyennes observées en Europe (2009) et en Belgique (2009, 2011) (réseau ICP Forests)

	<i>Europe (30 pays)</i>	<i>Allemagne</i>	<i>Flandre</i>	<i>Wallonie (ancien rés. I)</i>	<i>Wallonie (réseau II)</i>	<i>Forêt de Soignes bruxelloise</i>
Année	2009	2009	2009	2009	2011	2011
Hêtre	19,4%	27%	15,7%	23,3%	29,5 %	29%
Chênes	23,7%	26,5%	21,7% (CP)	24,4% (CP) 18,7% (CS)	17 % (CS)	26% (CP) 16% (CS)
Source	Fischer et al (2010)	Fischer et al (2010)	Fischer et al (2010)	C. Laurent (SPW)	UCL	-

Évolution de la défoliation moyenne entre 2009 et 2011

Lors de l'installation du réseau de suivi sanitaire en 2009, la défoliation des hêtres en forêt de Soignes était de 37%, et celle des chênes de 30%. Ensuite, tant en chênes qu'en hêtre, la défoliation en 2010 et 2011 était de l'ordre de 25 à 30%. Les valeurs élevées de 2009 peuvent s'expliquer de différentes manières :

- conditions climatiques difficiles en 2009 (sécheresse),
- forte fructification, qui n'a plus été observée depuis (§ 5.2),
- manque d'expérience des observateurs, corrigé depuis.

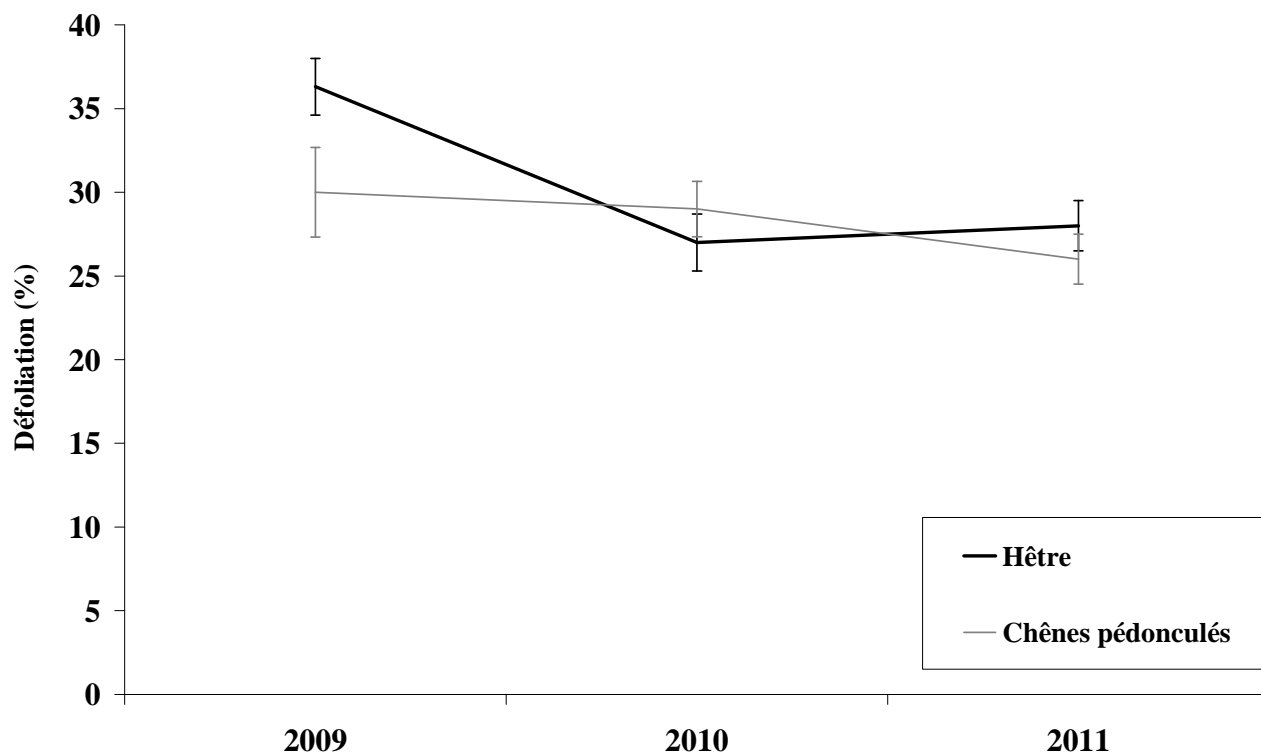


Figure 25. Défoliation moyenne depuis 2009

Hêtre : 2009 : n = 145 ; 2010 : n=102 ; 2011 n=111.

Chênes pédonculés : 2009 : n = 15 ; 2010 : n=44 ; 2011 : n=42.

Certains auteurs (Pedersen, 1998b ; Bréda, 1999) considèrent qu'une réduction de la biomasse (feuillage notamment) peut-être interprétée comme un mécanisme de régulation transitoire et non comme un mécanisme de dépérissement au sens strict, *a fortiori* quand elle est réversible. Il est donc important de suivre l'évolution de la défoliation arbre par arbre. La Figure 26 montre que, pris individuellement, les chênes notés en 2010 et en 2011 présentent majoritairement une baisse de la défoliation. On observe la même évolution pour le hêtre entre 2009 et 2011 (Figure 27). Cette diminution peut être attribuée à différents facteurs :

- le rabotage des cimes⁸ (§ 5.5),
- des conditions de croissance plus favorables.

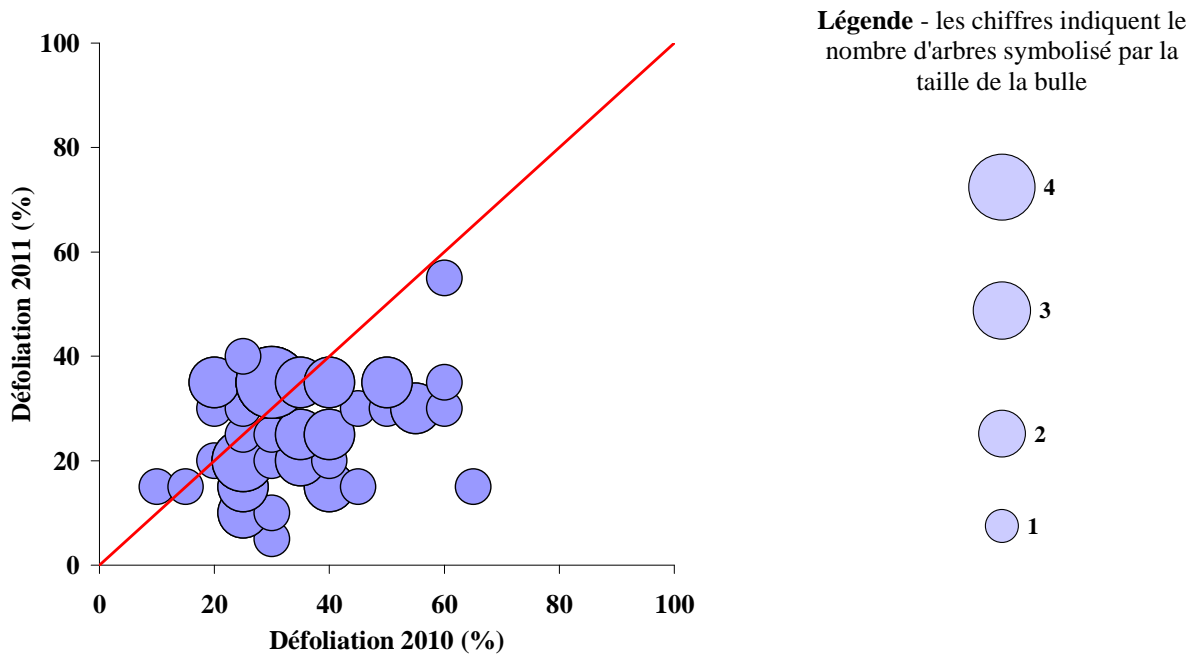


Figure 26. Comparaison des défoliations entre 2010 et 2011 (chênes, n=48).

La droite représente une correspondance parfaite (1:1). La taille des bulles est proportionnelle à la fréquence des données.

⁸ Chute des branches mortes du sommet de l'arbre sous l'effet du vent et réduction de la couronne observée, qui paraît dès lors plus saine.

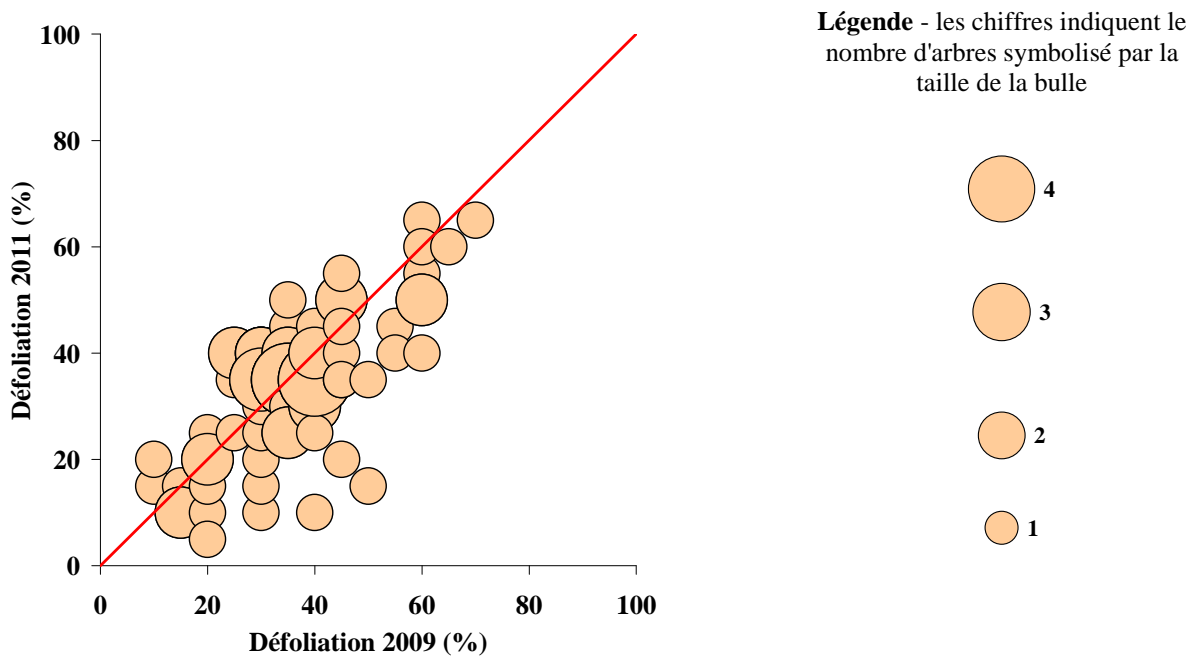


Figure 27. Comparaison des défoliations entre 2009 et 2011 (hêtres, n=70).

La droite représente une correspondance parfaite (1:1). La taille des bulles est proportionnelle à la fréquence des données.

La Figure 28 et la Figure 29 montrent la distribution des arbres échantillonnés entre trois grandes classes sanitaires. Un arbre peut être considéré comme sain si, au cours du cycle sylvicole, il passe d'une défoliation égale à 0% à une défoliation inférieure à 20%. Un arbre est considéré comme dépérissant s'il présente plus de 60% de défoliation. Entre ces deux extrêmes, l'arbre est dans une perte de vitalité plus ou moins grande. Les hêtres échantillonnés en 2009 présentent une vitalité moindre que ceux échantillonnés en 2010 et 2011. Cependant, les hêtres restent globalement dans la fourchette d'un niveau sanitaire intermédiaire (Figure 28).

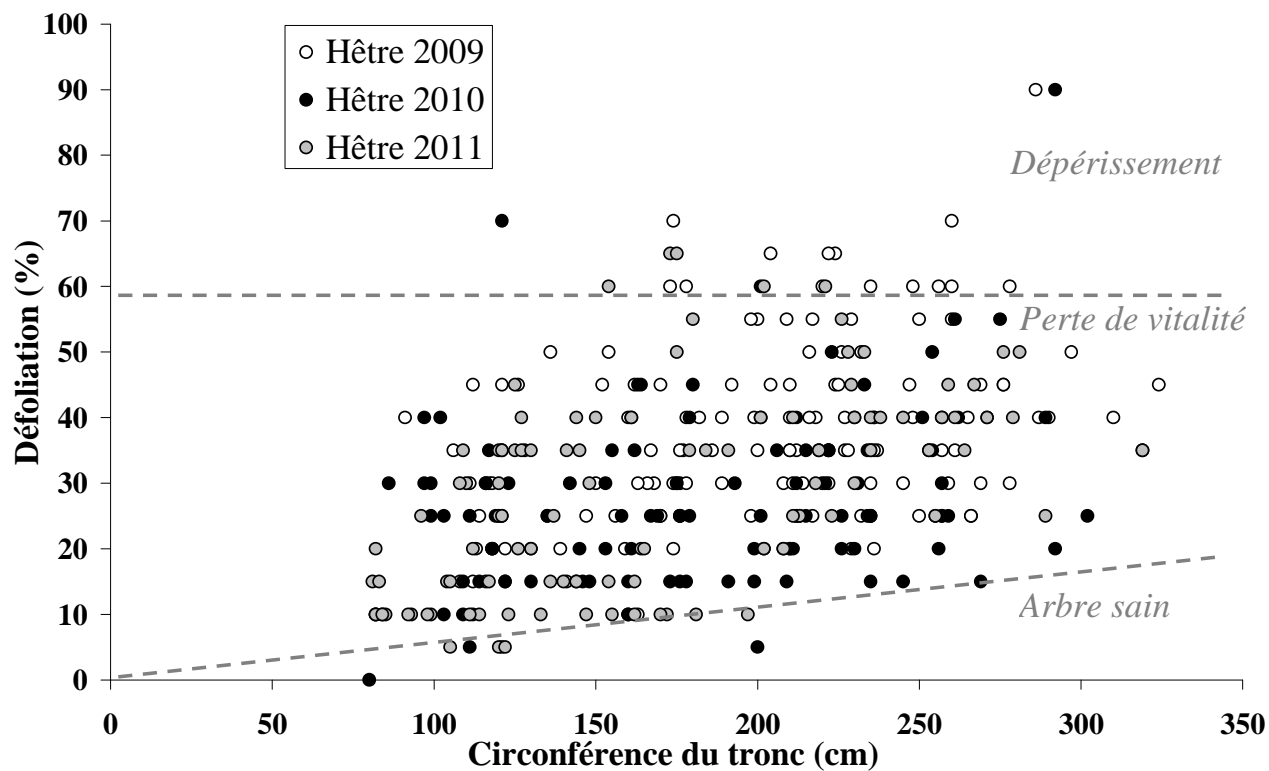


Figure 28. Défoliation en fonction de la circonférence du tronc (hêtre)

Depuis 2009, les chênes présentent un état de santé intermédiaire (Figure 29).

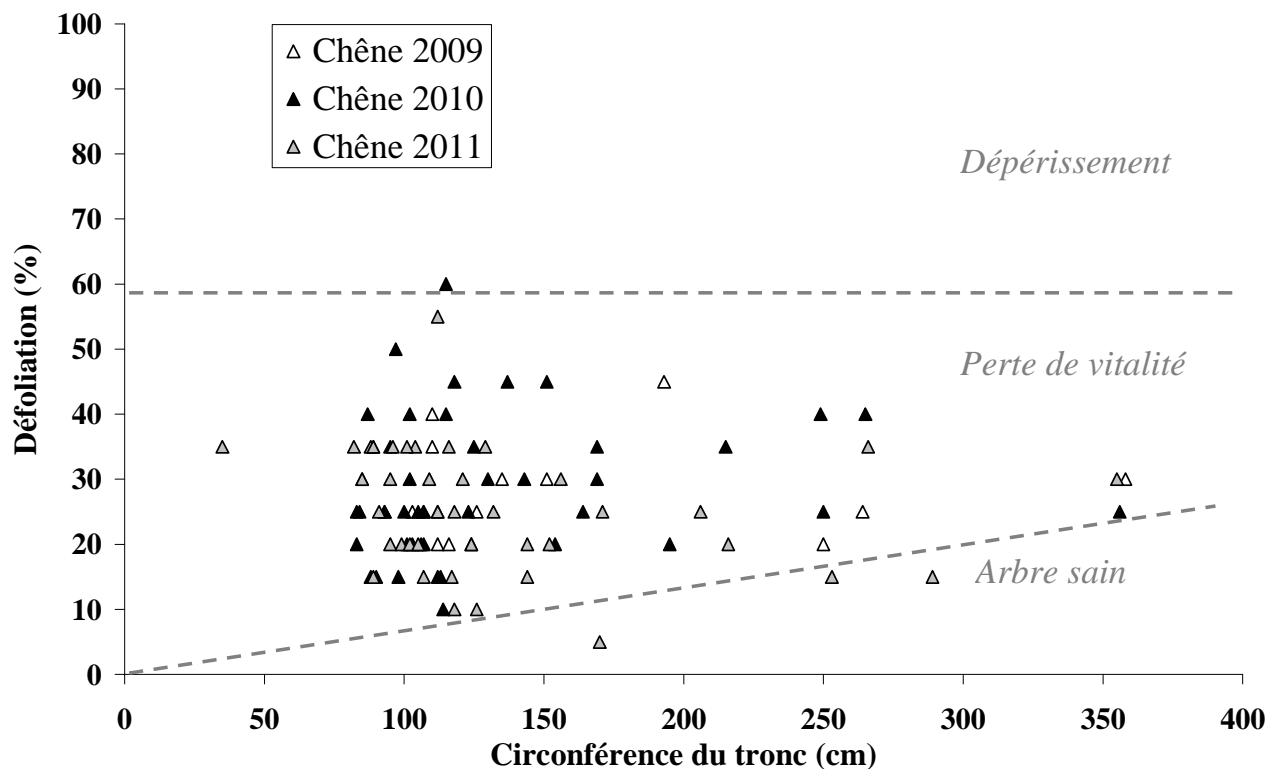


Figure 29. Défoliation en fonction de la circonférence du tronc (chênes)

5.2. Autres variables d'état sanitaire

Fructification

La fructification est le processus biologique de développement des fruits. Le protocole standardisé prévoit d'estimer le volume de fruits dans la partie supérieure de la couronne. La fructification est contrôlée par de nombreux facteurs (photopériode, humidité, température, pollinisation, etc.). Une fructification abondante est fréquemment constatée l'année qui suit une sécheresse (Nageleisen et al., 2010)

La fructification était abondante en 2009, tant pour le hêtre que pour les chênes. On note une diminution de la fructification en 2010, particulièrement sur le hêtre, où la proportion d'arbres portant un volume élevé de faînes passe de 70% à moins de 7%. En 2011, 45% des hêtres ont une fructification abondante, 35% une fructification moyenne, et 20% n'ont peu ou pas de faînes. On note seulement 3 chênes pédonculés et 1 chêne sessile portant un grand nombre de glands.

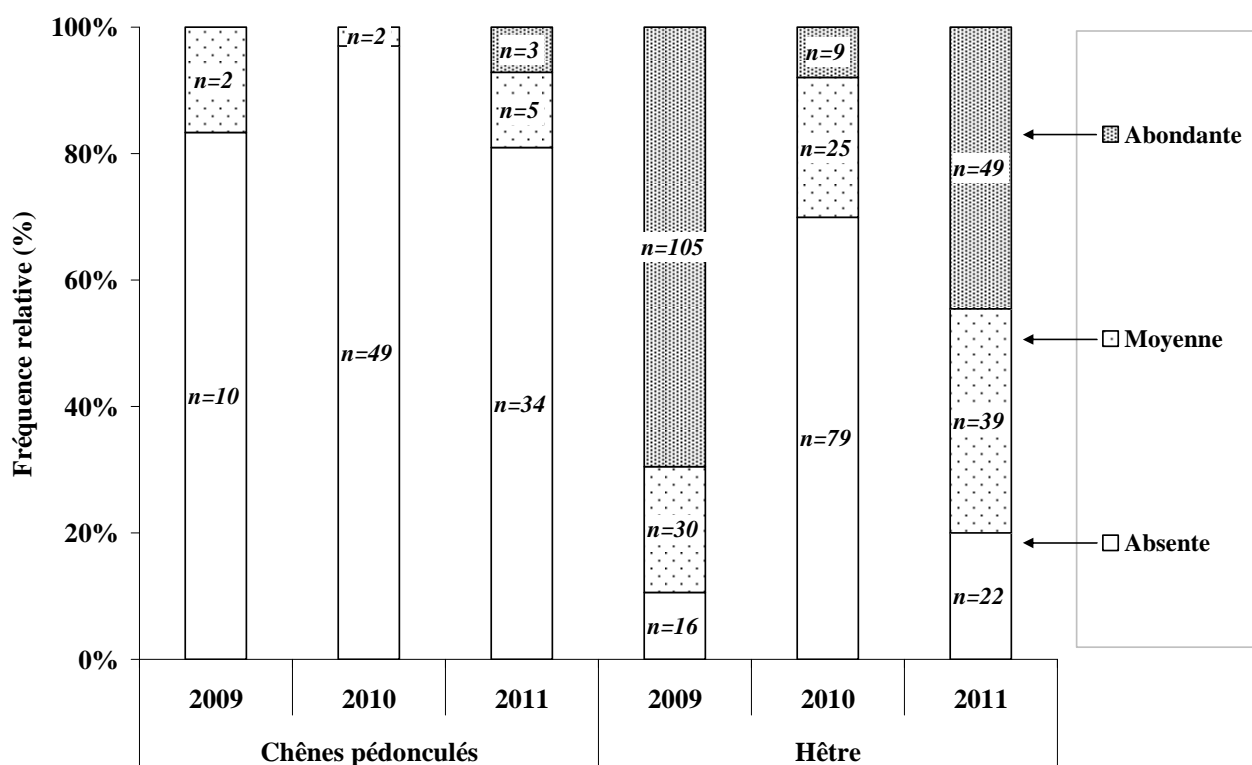


Figure 30. Distribution des arbres selon les niveaux de fructification et l'essence (2009, 2010 et 2011)

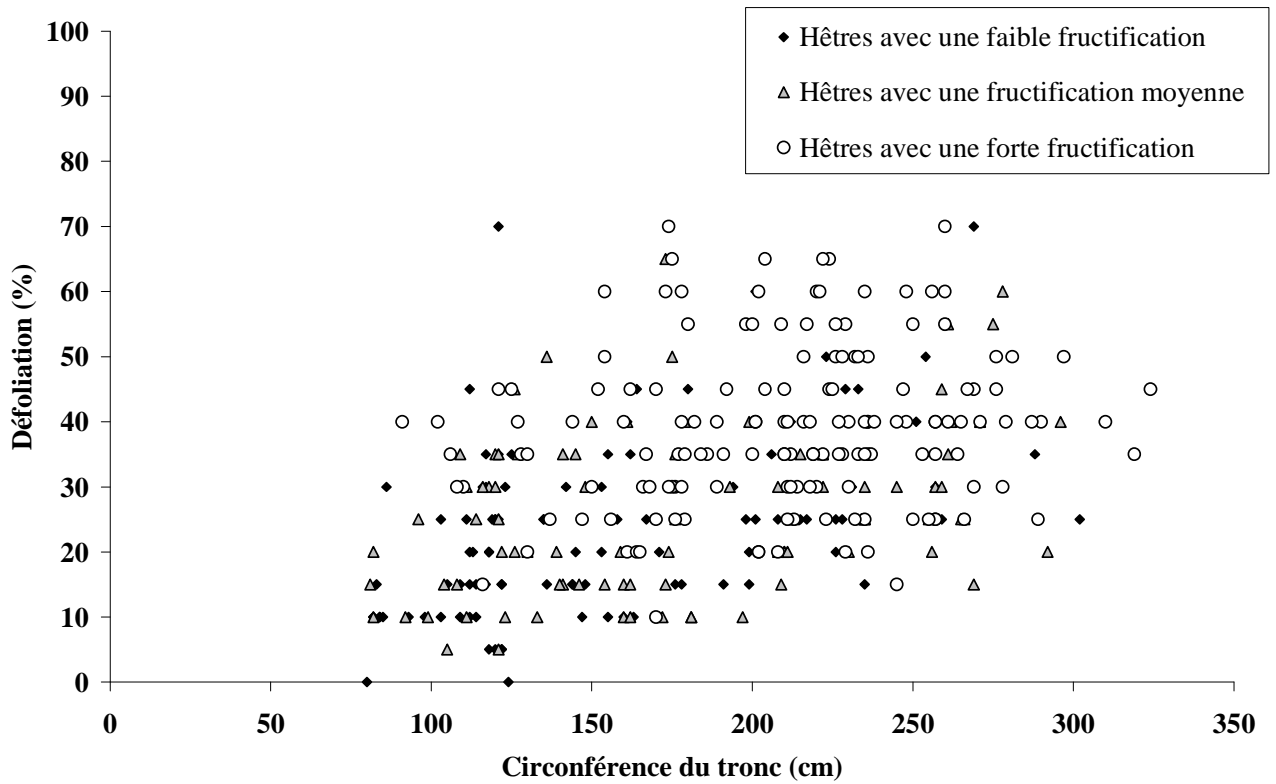


Figure 31. Distribution des hêtres selon la circonférence du tronc et le niveau de fructification (2011)

Décoloration

Pour le protocole standardisé, la décoloration est définie comme toute altération (teinte ou répartition) de la couleur normale du feuillage de l'espèce observée. La décoloration s'est amoindrie de 2009 à 2011. En chênes, la proportion d'arbres non décolorés est passée de 52% à 69%. En hêtre, cette proportion est passée de 80% à 91% (Figure 32). Aucun chêne sessile ne présente de décoloration.

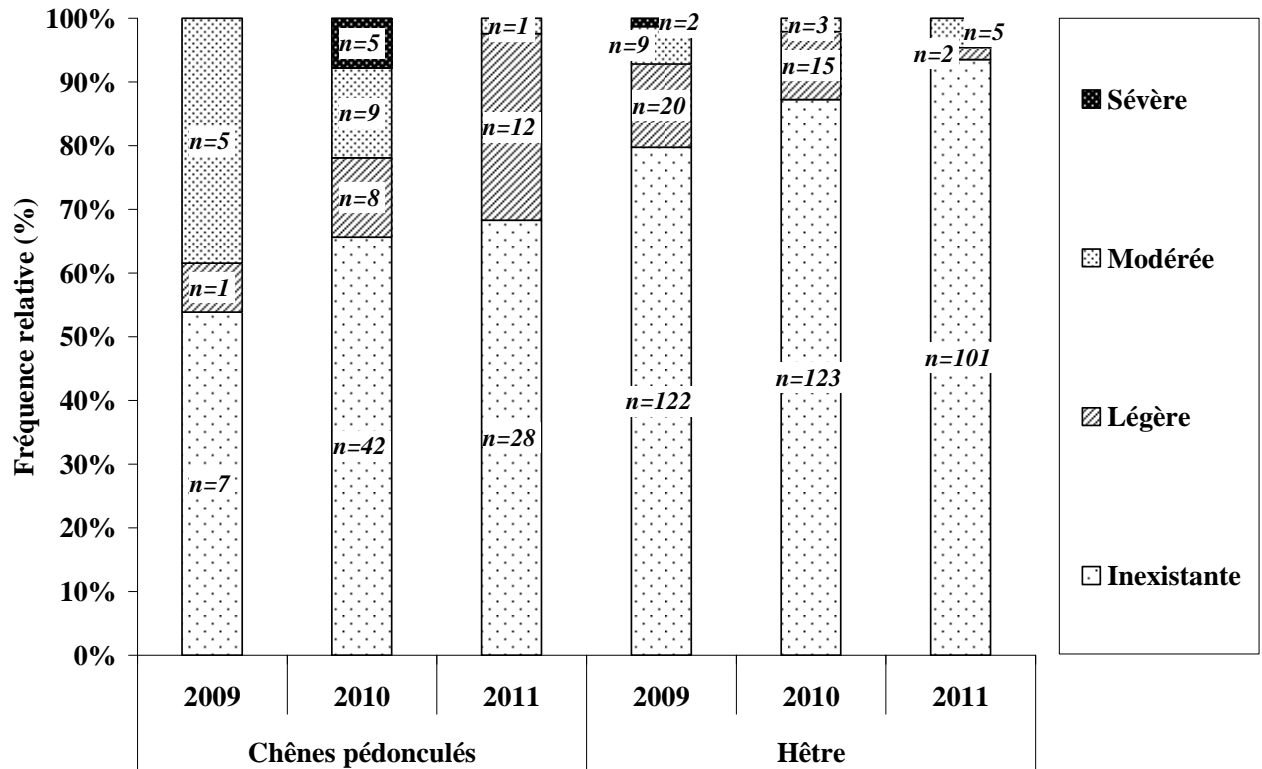


Figure 32. Distribution des arbres selon les classes de décoloration (2009, 2010 et 2011)

Comme la défoliation, la décoloration dépend de nombreux facteurs. Elle est donc délicate à interpréter. De manière générale, une coloration anormale du feuillage est due à des problèmes de nutrition minérale (carences), à la pollution atmosphérique ou à des attaques parasitaires (Nageleisen et al., 2010). Elle peut aussi être consécutive à la sécheresse printanière et estivale (Laurent et Lecomte, 2005). Cependant, les taux de décoloration restent bas alors que le printemps 2011 a été sec (1.2).

Structure de la couronne

Pour le protocole standardisé, la structure de la couronne est définie comme l'architecture des organes aériens de l'arbre. Elle varie avec le temps et selon différents stades de développement. Des altérations de la structure de la couronne peuvent être interprétées comme des signes de stress. L'évaluation se base sur la forme de la partie supérieure de la couronne et le développement des rameaux. La Figure 33 et la Figure 34 proposent des illustrations et les codes associés pour les hêtres et les chênes. La Figure 35 montre un exemple de « griffe de la mort », aussi appelé « rameau en fouet », typique de la structure 23 du hêtre : il s'agit des branches fines supérieures qui émettent des rameaux raccourcis et courbés, le plus souvent vers le haut, et dépourvus de feuilles dans la plupart des cas.

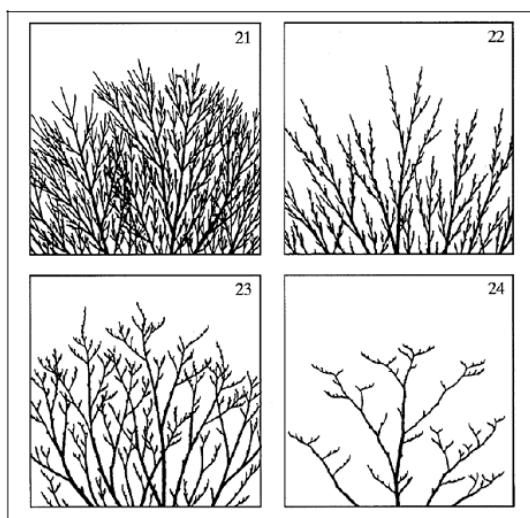


Figure 33. Les quatre stades du hêtre, avec leurs codes (Eichhorn *et al.*, 2006)

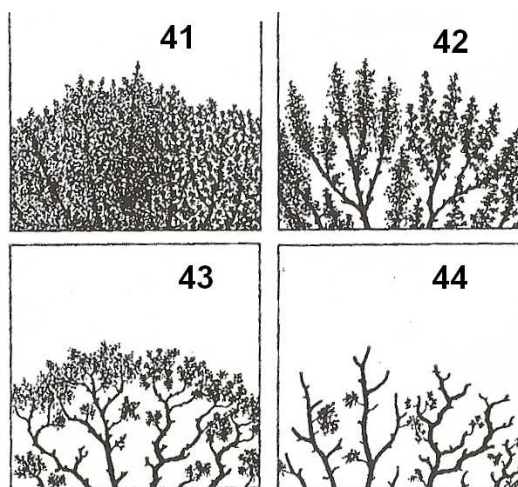


Figure 34. Les quatre stades des chênes, avec leurs codes (Eichhorn *et al.*, 2006)

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



Figure 35. « Griffes de la mort » ou « rameaux en fouets » sur le hêtre, typique de la structure 23.

En 2009, un peu plus de 90% des hêtres observés présentait une simplification de la couronne. Cette proportion se réduit à près de 80% en 2010, et à un peu moins de 70% en 2011. En 2010 et 2011, plus de 90% des chênes analysés présentent une simplification plus ou moins importante de la couronne. Tant en hêtre qu'en chêne, la proportion d'arbres à ramification dense a augmenté graduellement depuis 2009, passant de près de 10% en 2009 à 34% en 2011 en hêtre, et de 0% à 22% en chêne (Figure 36). En 2010, un quart des hêtres présente une couronne très simplifiée voire déclinante. En 2011, cette proportion est passée à un sixième.

Il est difficile d'intégrer le rabotage des cimes dans l'interprétation de ces observations, le rabotage n'intervenant pas directement dans la simplification de la couronne (§ 5.5).

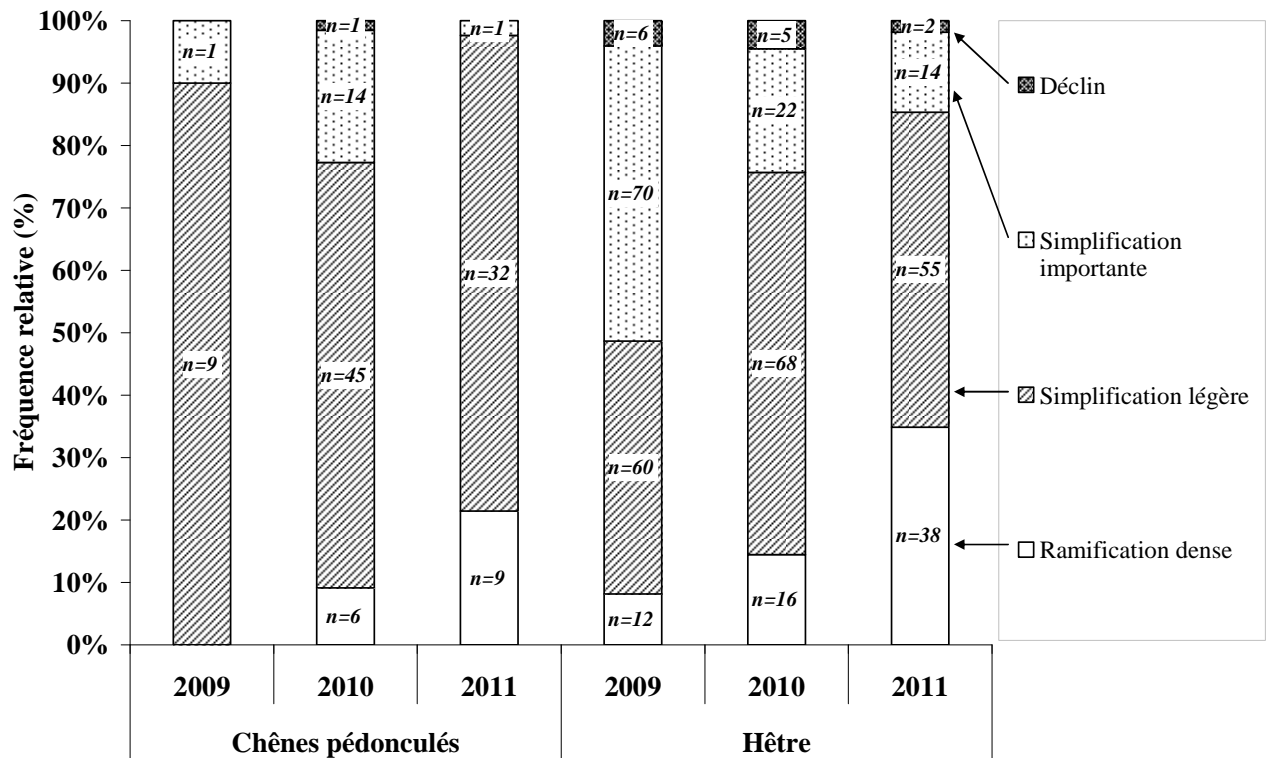


Figure 36. Distribution des arbres selon les structures de la couronne (2011)

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 comment l'arbre répond à la perte de feuillage et révèle donc la capacité régénérative de l'arbre.

Les gourmands et les pousses épïcormiques sont restés à des niveaux relativement stables entre 2009 et 2011. Environ la moitié des chênes présentent des gourmands, contre près d'un quart des hêtres.

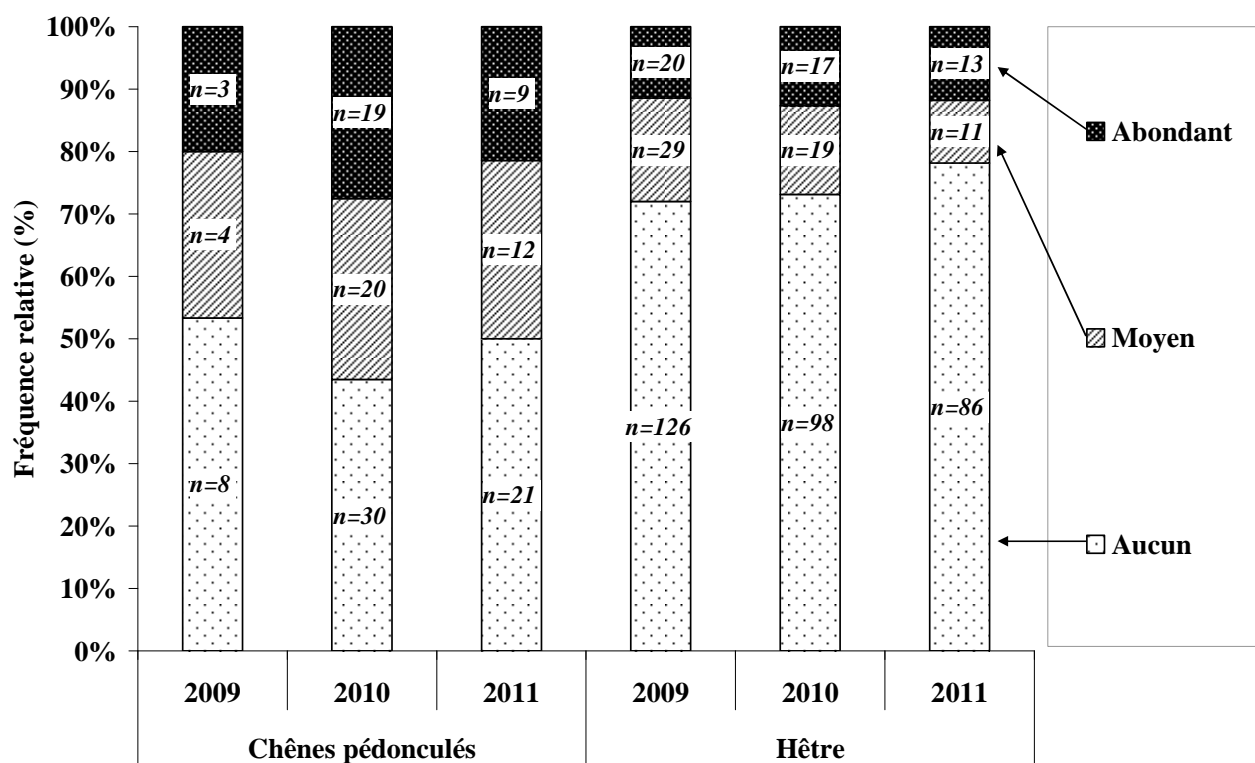


Figure 37. Distribution des arbres selon le volume de pousses épïcormiques (2010)

5.3. Détermination de l'âge par comptage des cernes

Jusqu'à présent, l'influence de l'âge n'a pu être vérifiée en forêt de Soignes car l'âge des arbres n'était pas connu avec une précision satisfaisante, en particulier les arbres les plus vieux (Timal, 2006). En 2011, l'âge de 72 arbres a été déterminé par carottage et comptage des cernes (Tableau 7).

Tableau 7. Comparaison des âges estimés lors du carottage et les âges estimés par Grégory Timal (2006).

<i>Placette</i>	<i>Nombre de carottes</i>	<i>Circonférence moyenne</i>		<i>Âge (carottage, 2011)</i>		<i>Âge (Timal, 2006)</i>	<i>Écart entre les âges estimés</i>
2877	4	214	(14)	123	(10)	147	25
2879	3	219	(14)	133	(8)	147	14
3031	6	182	(8)	107	(10)	120	13
3033	5	189	(17)	113	(5)	120	7
3345	3	233	(23)	175	(12)	202	27
3349	3	253	(7)	172	(5)	193	21
3509	5	177	(24)	145	(21)	191	46
3511	3	228	(10)	157	(7)	193	36
3669	3	219	(12)	154	(17)	194	40
3671	4	235	(19)	172	(5)	194	22
3831	5	216	(6)	155	(14)	201	46
3989	6	250	(11)	150	(13)	192	42
4147	4	98	(1)	54	(12)	72	19
4151	7	109	(15)	50	(6)	73	23
4458	2	116	(18)	46	(8)	64	18
4469	5	256	(30)	158	(8)	178	20
4618	2	135	(26)	47	(1)	64	17
4625	6	168	(20)	112	(10)	148	36
4778	6	143	(15)	90	(19)	133	43
4783	4	220	(17)	127	(3)	137	11
4785	5	197	(4)	126	(8)	148	22
4928	6	130	(4)	58	(4)	68	10
4947	2	195	(0)	141	(5)	160	20

La relation entre la circonférence du tronc et le nombre de cernes peut être mise en évidence par régression linéaire (Figure 38). Une relation de type linéaire peut être établie de manière significative ($p < 0,0001$). Le coefficient R^2 (0,73) indique que l'âge explique 73% de la variabilité observée au niveau de la circonférence.

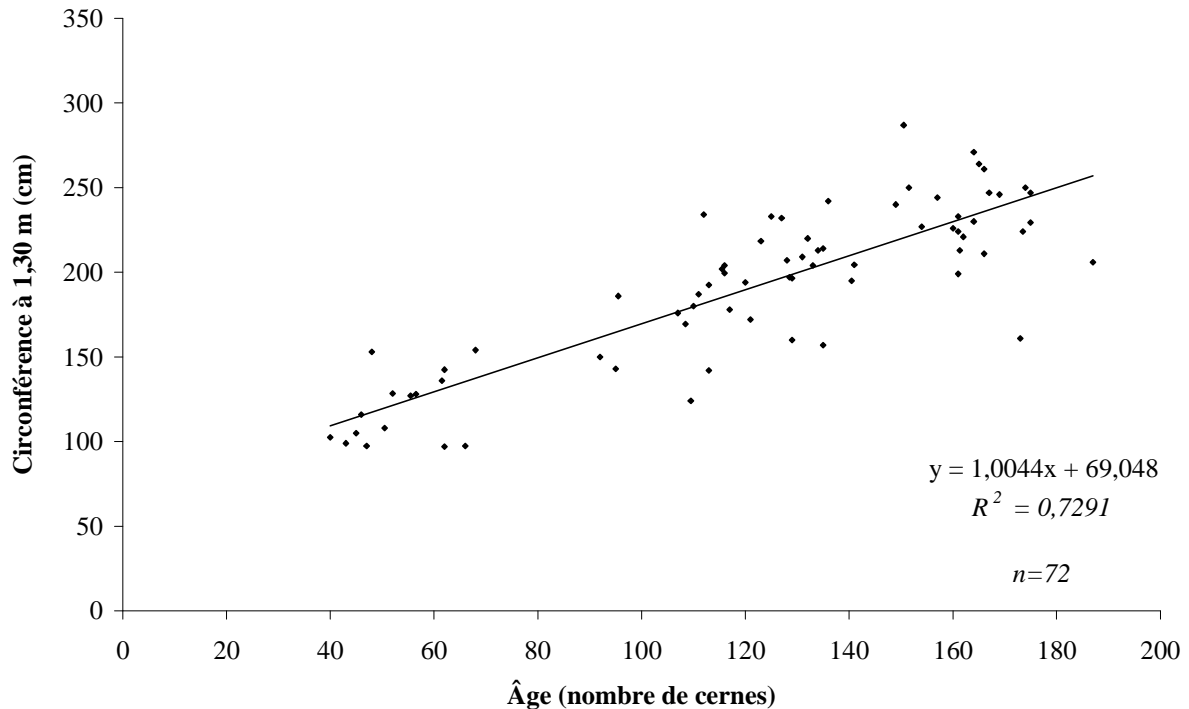


Figure 38. Relation entre la circonférence et l'âge des arbres sondés.

On note que, pour un âge donné, la variabilité de la circonférence peut être assez grande. La circonférence dépend en effet, outre l'âge de l'arbre, de nombreux facteurs, comme la densité du peuplement ou les conditions du milieu. Pour ces raisons, les circonférences des arbres observés peuvent être très différentes au sein d'une même placette (Tableau 19, en annexe), alors que les peuplements sont pour la plupart supposés équiennes.

5.4. *Relations entre la défoliation et d'autres variables*

L'effet de certaines variables sur la défoliation est évalué par deux tests : (i) une ANOVA à un critère si la variable est divisée en classes ; (ii) une régression si c'est un variable continue. Dans la présentation des résultats, la valeur p est indiquée. Pour un même facteur, les moyennes correspondant aux différents niveaux ont été comparées grâce au test de Tukey (comparaisons multiples de moyennes). Le niveau de significativité retenu est de 5%. Dans la présentation des résultats, les classes comportant des lettres communes ne sont pas significativement différentes. Les ANOVA et les tests statistiques ont été réalisés à l'aide du logiciel JMP 8. Les effectifs peuvent différer de ceux présentés plus haut, étant donné que certains arbres n'ont pas été notés pour certains critères.

Circonférence du tronc

Comme en 2009 et en 2010, sur les hêtres, un effet significatif des classes de circonférence du tronc sur la défoliation a pu être mis en évidence ($p < 0,0001$ en 2011) (Figure 39). Pour les chênes au contraire, les données de 2009, de 2010 et de 2011 ne permettent pas de conclure ($p = 0,4827$ en 2011). Les effectifs sont trop peu nombreux et trop inégaux entre les classes de circonférence (Figure 40).

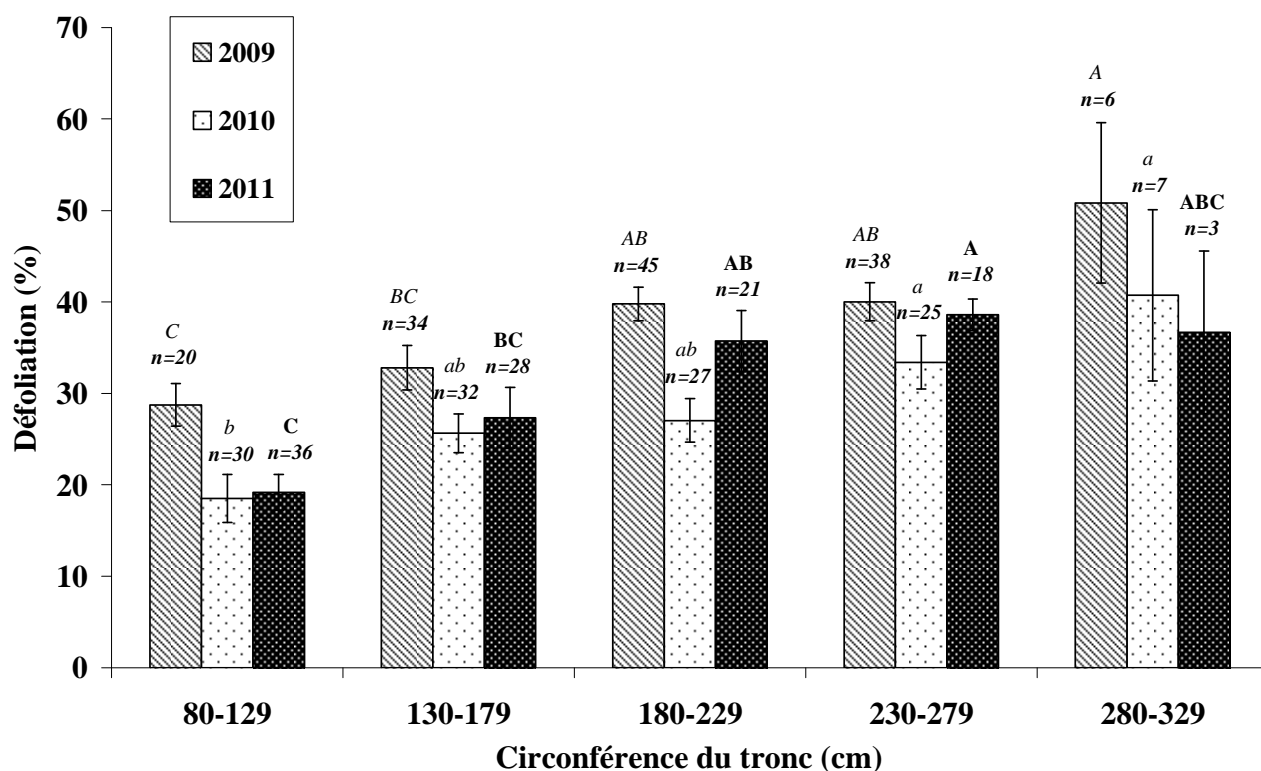


Figure 39. Défoliations moyennes par classes de circonférence (hêtre)

La barre d'erreur correspond à l'erreur standard et les effectifs sont donnés pour chaque classe de circonférence. Pour chaque année, les classes présentant une ou des lettres communes ne sont pas significativement différentes.
2009 : majuscules italiques ; 2010 : minuscules italiques ; 2011 : gras majuscule

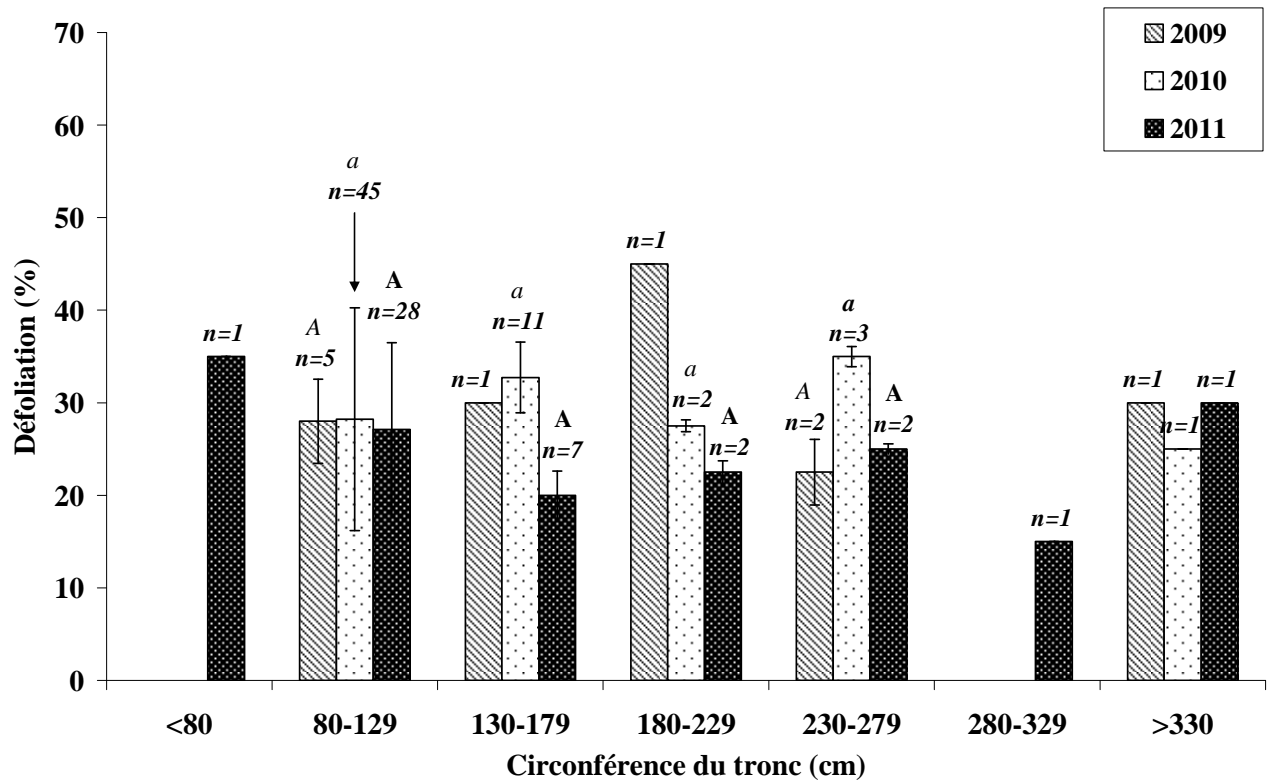


Figure 40. Défoliations moyennes par classes de circonférence (chênes pédonculés)

La barre d'erreur correspond à l'erreur standard et les effectifs sont donnés pour chaque classe de circonférence. Pour chaque année, les classes présentant une ou des lettres communes ne sont pas significativement différentes.

2009 : majuscules italiques ; 2010 : minuscules italiques ; 2011 : gras majuscule

La relation entre la défoliation et la circonférence du tronc peut également être mise en évidence par régression linéaire. Pour le hêtre, une relation de type linéaire entre la défoliation et la circonférence peut être établie de manière significative ($p < 0,0001$). Le coefficient R^2 indique que l'effet de la circonférence du tronc explique 29% de la variabilité observée au niveau de la défoliation (10% en 2010). Le reste de la variabilité dépend d'autres facteurs.

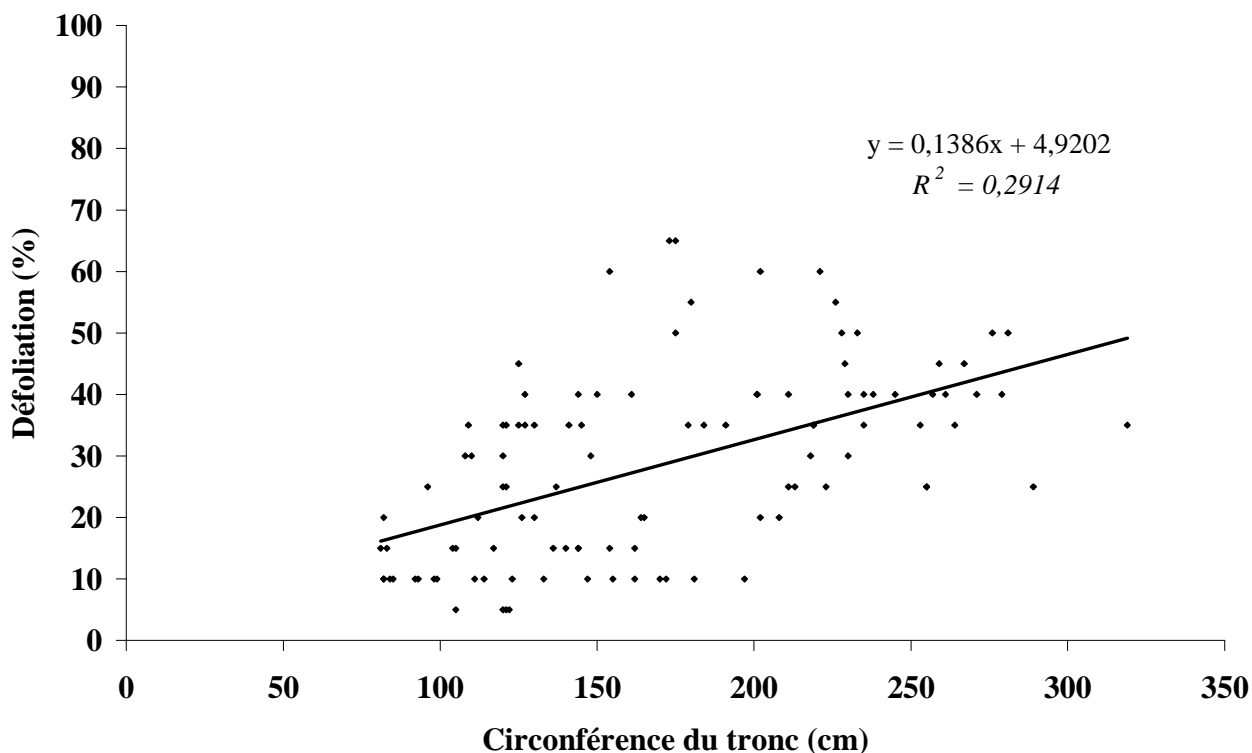


Figure 41. Droite de régression entre la circonférence du tronc à 1,50m et la défoliation (hêtre, 2011, n=106)

Fructification

La fructification est contrôlée par de nombreux facteurs (photopériode, humidité, température, pollinisation, etc.). Une fructification abondante est fréquemment constatée l'année qui suit une sécheresse (Laurent et Lecomte, 2005 ; Nageleisen et al., 2010). Par ailleurs, une relation entre abondance de fruits et forte défoliation a déjà été observée en hêtre (Schmidt, 1991 ; Göttlein et Pruscha, 1996 ; Eichhorn et al., 2005 ; Fischer et al., 2010). Cela peut notamment s'expliquer par le fait que la fructification modifie plus ou moins fortement l'aspect de l'arbre et influence donc la notation de la défoliation. Au niveau physiologique, les fortes faînaies mobilisent une part importante de nutriments, en particulier de l'azote, qui n'est plus disponible pour la feuillaison.

En 2011, en hêtre, la défoliation moyenne était de 16% pour une fructification nulle ou normale et de 37% pour une fructification abondante. La défoliation en fonction du niveau de fructification montre une relation très nette ($p < 0,0001$) (Figure 42). En chêne, la défoliation moyenne était de 25% pour une fructification nulle ou normale et de 28% pour une fructification abondante ; la défoliation en fonction du niveau de fructification ne montre pas de relation ($p = 0,6522$) (Figure 43).

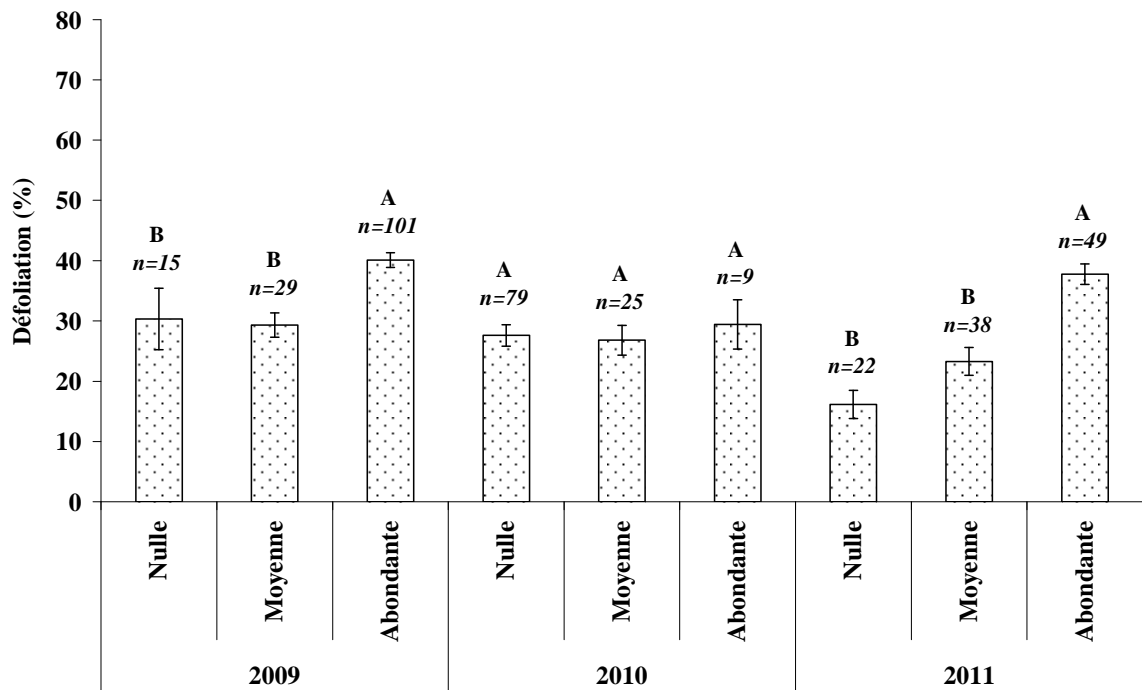


Figure 42. Défoliation moyenne par niveau de fructification (hêtre)

La barre d'erreur correspond à l'erreur standard et les effectifs sont donnés pour chaque niveau de fructification. Pour chaque année, les niveaux présentant une ou des lettres communes ne sont pas significativement différents.

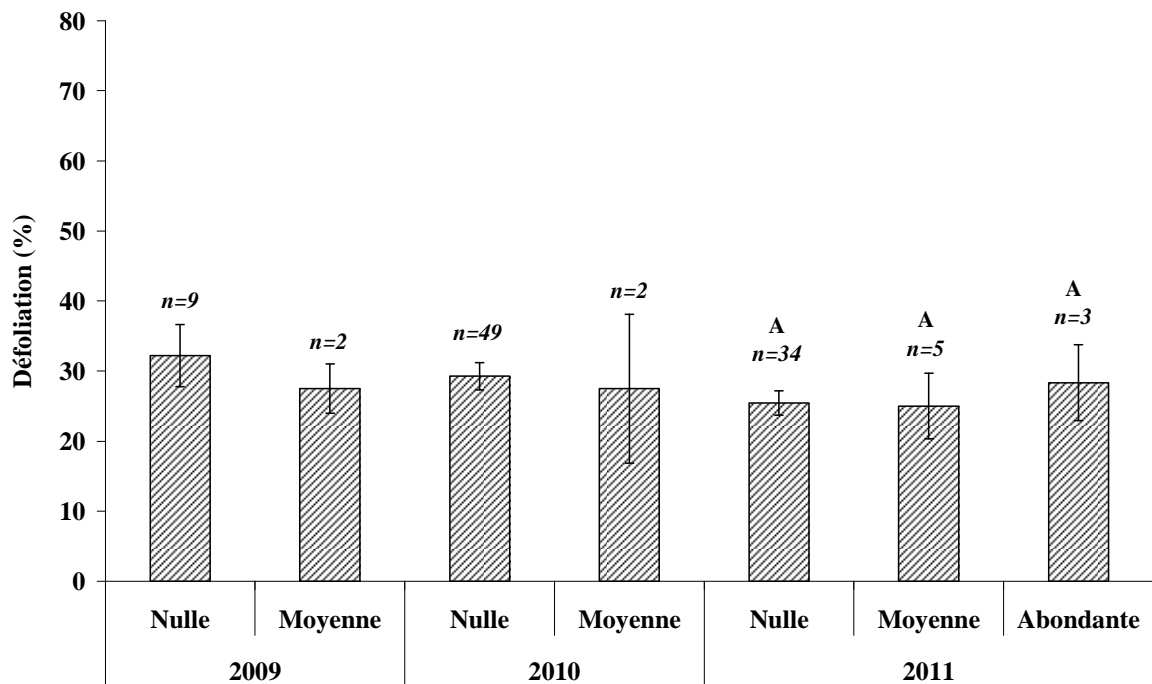


Figure 43. Défoliation moyenne par niveau de fructification (chênes pédonculés)

La barre d'erreur correspond à l'erreur standard et les effectifs sont donnés pour chaque niveau de fructification. Pour chaque année, les niveaux présentant une ou des lettres communes ne sont pas significativement différents.

Structure de la couronne

Chez le hêtre, la relation entre défoliation et structure de la couronne est très nette ($p < 0,0001$) (Figure 44). Il paraît assez évident que la simplification progressive de la ramification s'accompagne d'une augmentation de la défoliation.

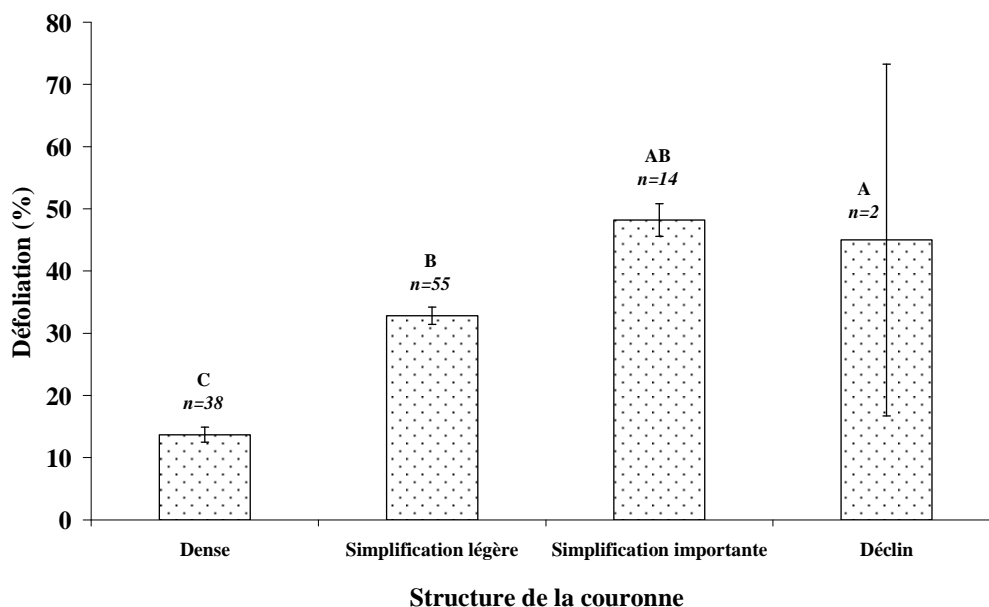


Figure 44. Défoliation moyenne par structure de la couronne (hêtre)

La barre d'erreur correspond à l'erreur standard et les effectifs sont donnés pour chaque niveau de structure. Les niveaux présentant une ou des lettres communes ne sont pas significativement différents.

Chez les chênes, la relation entre défoliation et structure de la couronne est très nette également ($p < 0,0001$) (Figure 45). Aucun chêne à couronne déclinante n'a été signalé.

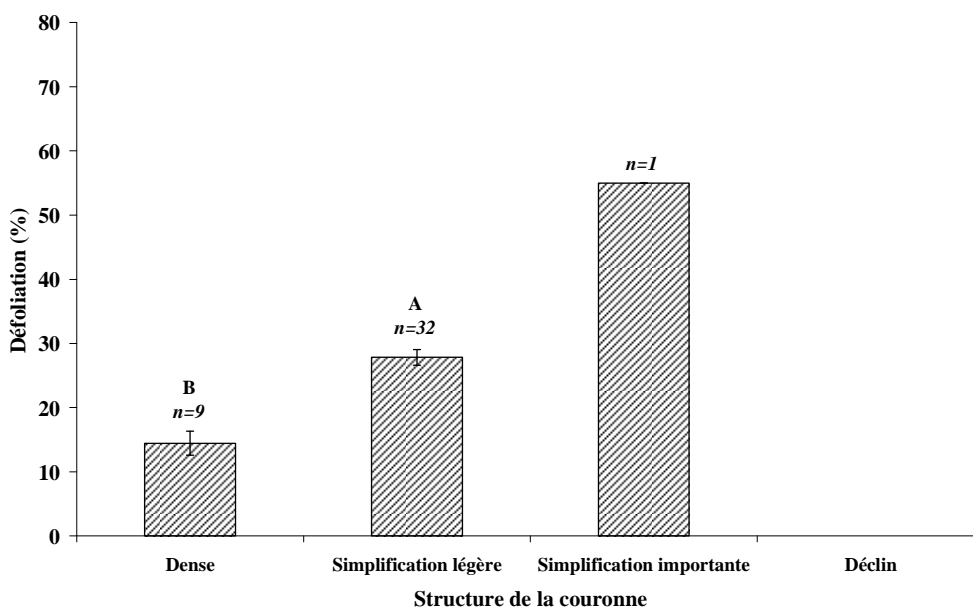


Figure 45. Défoliation moyenne par structure de la couronne (chênes pédonculés)

La barre d'erreur correspond à l'erreur standard et les effectifs sont donnés pour chaque niveau de structure. Les niveaux présentant une ou des lettres communes ne sont pas significativement différents.

Concurrence

Pour le hêtre, la défoliation semble d'autant plus grande que la concurrence est faible ($p = 0,0020$) (Figure 46). La différence se marque surtout entre les classes « 1 et 2 côtés » et la classe « 4 côtés ». Les hêtres en croissance libre sont en moyenne moins défoliés que les hêtres touchés sur 1 ou 2 côtés. Les hêtres serrés de tous côtés par leurs voisins (« 4 côtés ») sont les moins défoliés. La relation est plus marquée en 2011 qu'en 2010, où les hêtres en croissance libre avaient une défoliation moyenne de 50% (35% aujourd'hui). Les hêtres dont 1 côté était touché avaient une défoliation moyenne de 22% en 2010, contre 39% aujourd'hui.

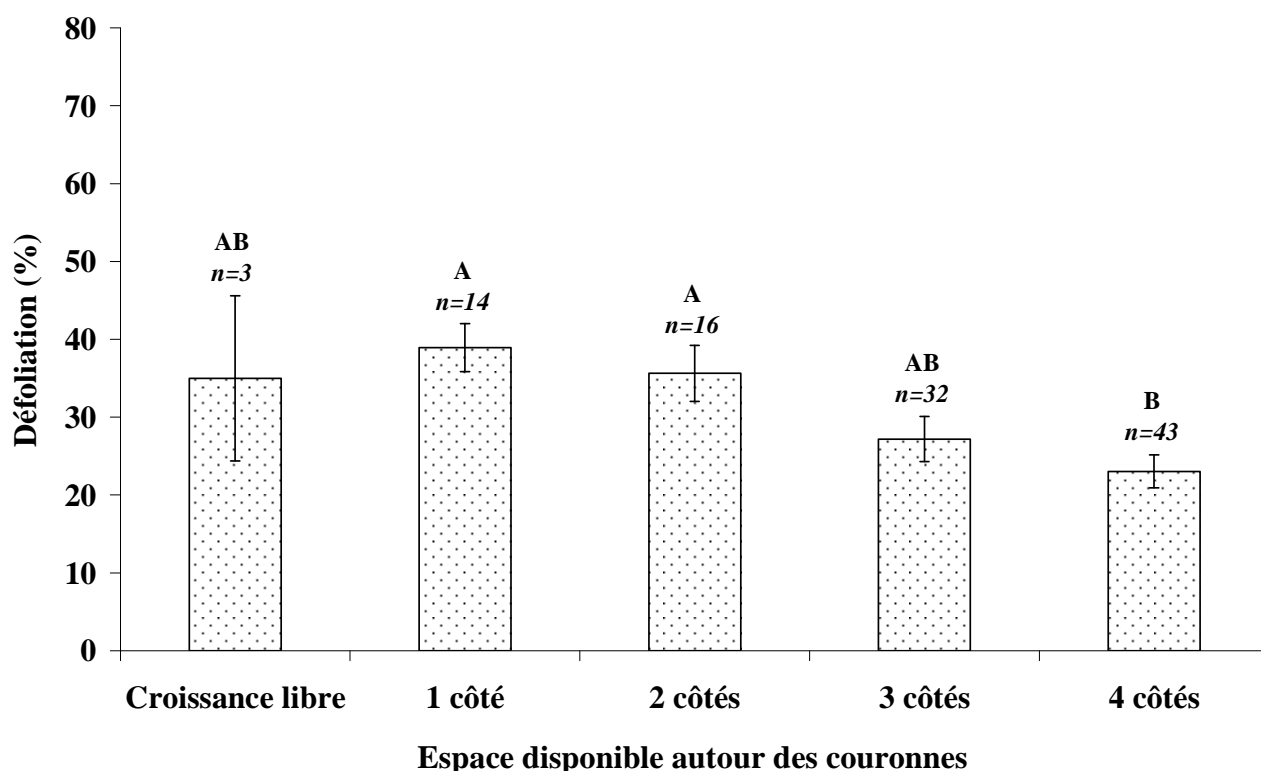


Figure 46. Défoliation moyenne selon la concurrence (hêtre, 2011)

La barre d'erreur correspond à l'erreur standard et les effectifs sont donnés pour chaque niveau de concurrence. Les niveaux présentant une ou des lettres communes ne sont pas significativement différents.

Contrairement à ce qui est observé chez le hêtre, le degré de concurrence n'influence pas la défoliation des chênes ($p = 0,7836$, Figure 47). Les ordres de grandeur sont les mêmes que ceux observés en 2011.

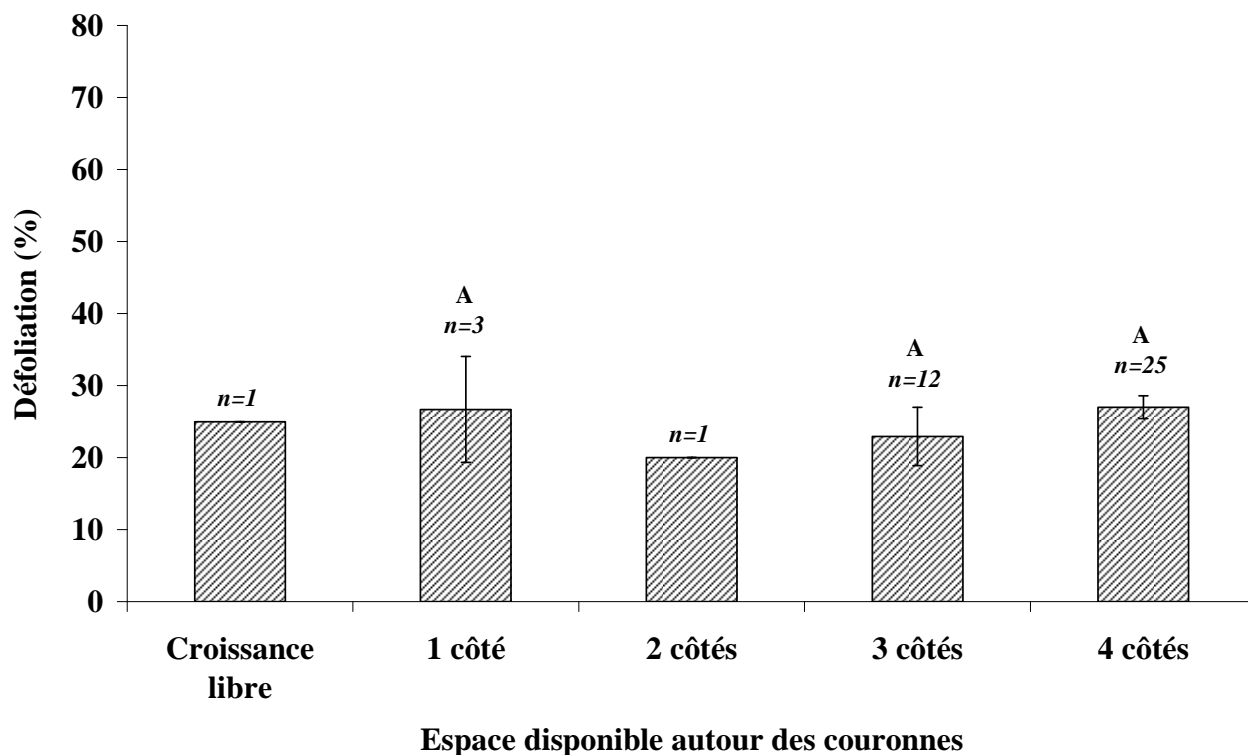


Figure 47. Défoliation moyenne selon la concurrence (chênes pédonculés, 2011).

La barre d'erreur correspond à l'erreur standard et les effectifs sont donnés pour chaque niveau de concurrence. Les niveaux présentant une ou des lettres communes ne sont pas significativement différents.

Chez le hêtre, une relation entre défoliation et espace disponible autour des couronnes a déjà été observée par Göttlein et Pruscha (1996), Dobbertin et Brang (2001) et Eichhorn et al. (2005). On peut supposer que les arbres moins concurrencés sont davantage soumis aux facteurs du milieu (vent, chute d'arbres voisins, ravageurs, etc.) (Seidling, 1999), ou encore qu'une ouverture des peuplements peut être une source de stress pour le hêtre, de tempérament sciaphile (Laurent et Lecomte, 2005).

M. Peter Roskams, de l'INBO (communication personnelle, avril 2011), fait remarquer que, plus un arbre est concurrencé, plus la partie observable de la couronne, c'est-à-dire la couronne hors compétition, se réduit. L'estimation de la défoliation se fait sur un volume de feuillage plus faible. La couronne observable étant alors plus serrée, elle apparaît plus dense, donc souvent moins défeuillée qu'une couronne isolée entièrement visible.

Grosseur relative

L'appréciation du rang social peut varier entre opérateur (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 de la grosseur relative avec la défoliation à l'aide d'une régression. La régression présente l'avantage de nécessiter l'estimation de seulement deux paramètres (pente et intercept) qui sont donc ajustés avec une meilleure précision que les paramètres de l'ANOVA.

La grosseur relative a été calculée pour les hêtres, sur les placettes en hêtraie. La relation pour les chênes n'a pas été évaluée car nous disposons de trop peu de données. Pour rappel, le seuil d'inventaire est fixé à 80 cm de circonférence à 1,50m de hauteur. Pour le hêtre, une relation de type linéaire entre la défoliation et la grosseur relative peut être établie de manière significative, tant en 2009 ($p = 0,006$) qu'en 2010 ($p = 0,0011$) et 2011 ($p = 0,0013$). Le coefficient R^2 indique que l'effet de la grosseur relative n'explique qu'entre 5 et 10% de la variabilité observée au niveau de la défoliation. On note cependant une tendance de la défoliation à croître avec la grosseur relative, c'est-à-dire que plus l'arbre domine le peuplement par ses dimensions, plus il est susceptible d'avoir une défoliation élevée.

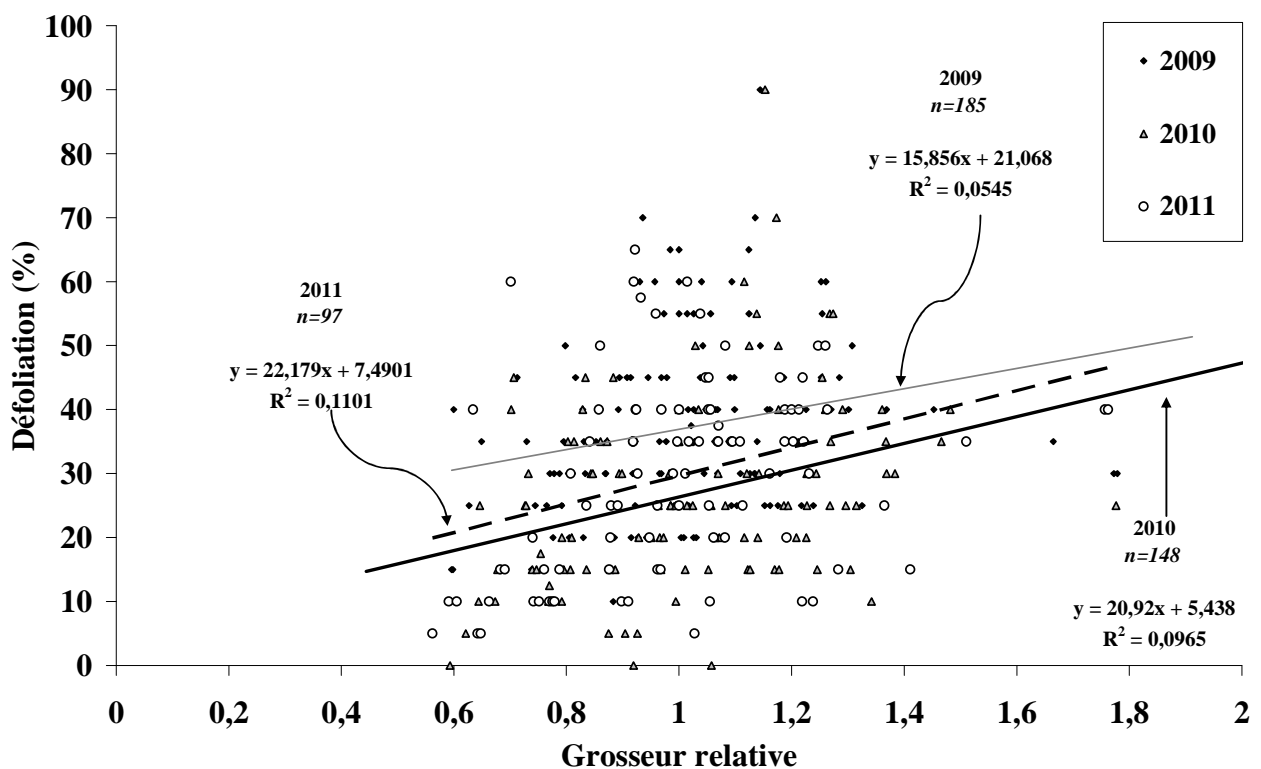


Figure 48. Relation entre la grosseur relative et défoliation, en hêtraie.

Fermeture du couvert

Une relation entre l'âge de la placette et la fermeture du couvert peut être établie de manière significative ($p = 0,0251$) (Figure 50). La fermeture du couvert a tendance à diminuer à mesure que le peuplement (la placette) vieillit. Le coefficient R^2 indique que l'âge et la fermeture du couvert sont liés à 21%.

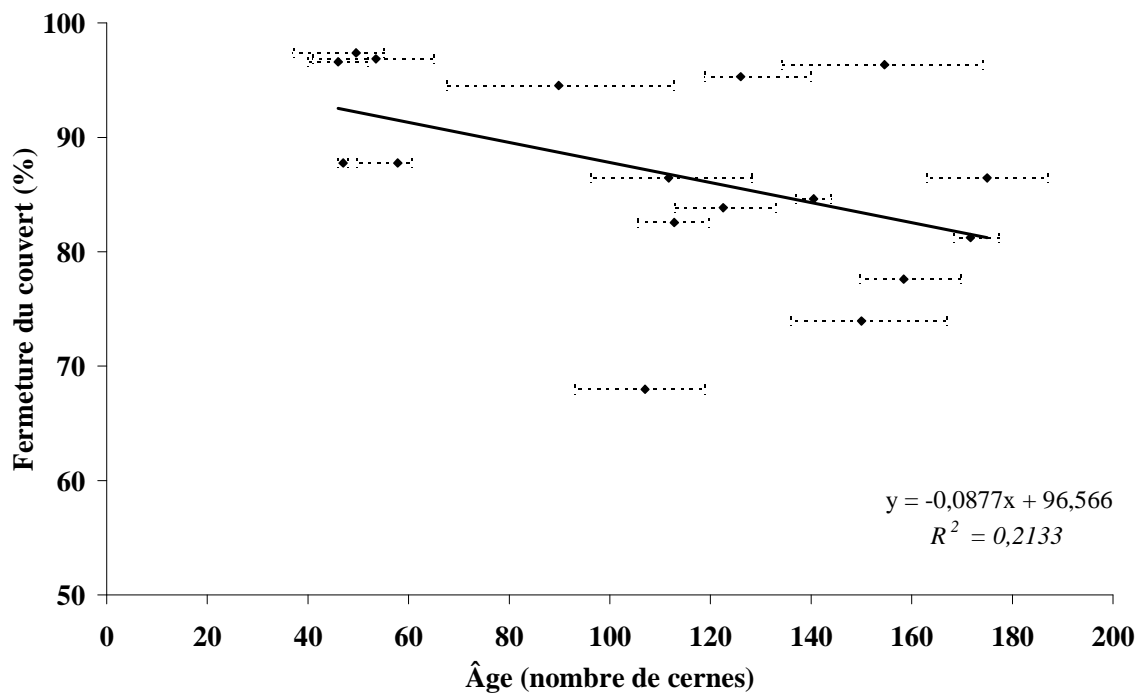


Figure 49. Relation entre l'âge de la placette et la fermeture du couvert (2011).

Les barres correspondent aux âges maximum et minimum pour chaque placette.

Une relation entre la fermeture du couvert et la défoliation moyenne de la placette peut être établie de manière significative ($p = 0,0030$) (Figure 50). On note une tendance de la défoliation à diminuer à mesure que le couvert se ferme, ce qui confirme la relation observée entre concurrence et défoliation. La comparaison de la Figure 49 et de la Figure 50 suggère que l'âge des placettes n'est pas un facteur sous-jacent à l'effet de la fermeture du couvert sur la défoliation moyenne.

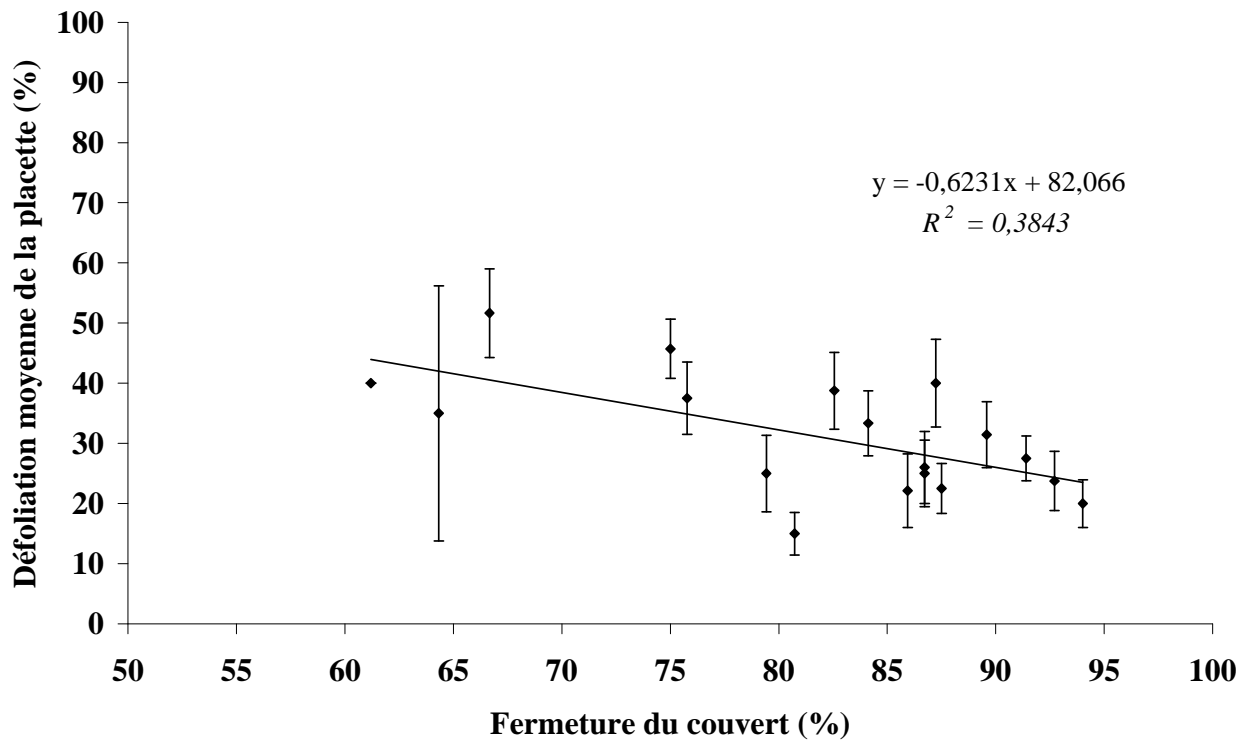


Figure 50. Relation entre la défoliation moyenne des placettes et la fermeture du couvert (n=18).

Les barres d'erreur correspondent à l'erreur-standard de la défoliation par placette.

Âge

Les récentes campagnes sanitaires réalisées en forêt de Soignes montrent qu'entre 10% et 29% de la variabilité de la défoliation s'explique par la dimension (§ 5.2). L'augmentation de la défoliation moyenne avec la circonférence des arbres laisse supposer que l'âge est un facteur sous-jacent. Une corrélation entre âge et défoliation est par exemple constatée depuis vingt ans sur le réseau « Département Santé des Forêts » (DSF, France) (Nageleisen et al., 2010). L'influence de l'âge sur la vitalité s'explique par une fragilisation de l'arbre : un arbre âgé aura subi davantage d'aléas (blessures, attaques parasitaires, sécheresse) qu'un jeune arbre. Par ailleurs, le vieillissement se traduit généralement par une réduction générale de la croissance (Comps et al., 1994 ; Nageleisen et al., 2010). L'équilibre des fonctions vitales est alors modifié, rendant l'arbre plus sensible à certains stress. Les vieux arbres sont ainsi plus sensibles aux stress hydriques (Allen et al., 2010), notamment parce que le rapport entre les surfaces de transpiration et la capacité d'absorption des racines est plus grand (Penninckx et al., 1999).

La défoliation des arbres sondés a été comparée à la défoliation moyenne des placettes régulières de suivi sanitaire (Figure 52). Etant donné la similarité des défoliations observées en 2010 et 2011, les valeurs ont été comparées pour ces deux années. On remarque, tant en 2010 qu'en 2011, pour quatre placettes, la défoliation des arbres sondés dépasse de plus de 10% la défoliation moyenne des placettes. Le Tableau 8 montre que les arbres des placettes pour lesquelles cet écart est observé ont moins de 60 ans ou plus de 110 ans.

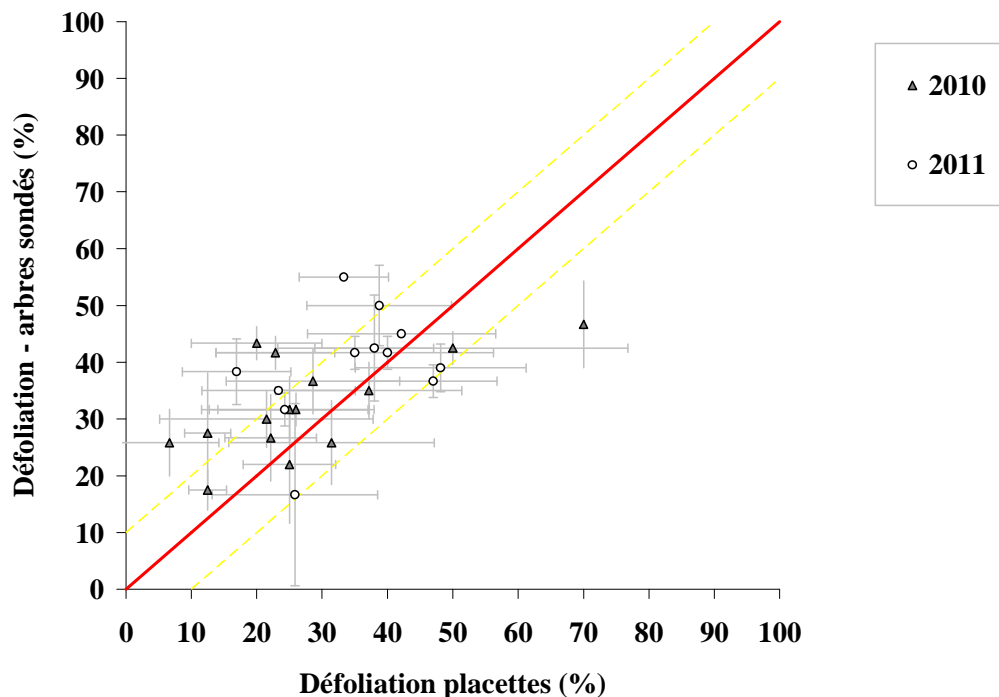


Figure 51. Comparaison des estimations de la défoliation moyennes entre les arbres sondés et les placettes de suivi sanitaire. En 2010 : 15 placettes ; en 2011 : 12 placettes.

Les pointillés représentent un intervalle de 10% par rapport à la droite 1:1 (correspondance parfaite). Les barres d'erreur correspondent à l'erreur-standard de la défoliation par placette.

Tableau 8. Âge des placettes pour lesquelles un écart est observé

<i>Année</i>	<i>Placette</i>	<i>Âge</i>
2010	4151	50 ans
	4458	46 ans
	4783	126 ans
	4785	126 ans
2011	3349	171 ans
	4625	111 ans
	4928	58 ans
	4947	140 ans

Une relation de type linéaire entre la défoliation et l'âge des arbres sondés peut être établie de manière significative ($p < 0,0001$) (Figure 52). Le coefficient R^2 (0,30) indique que l'âge explique près de 30% de la variabilité observée de la défoliation.

Sur le réseau DSF (France), on note une défoliation de l'ordre de 25 à 30% pour des feuillus âgés de 100 à 120 ans (Nageleisen et al., 2010), ce qui est légèrement inférieur à ce qui est observé en forêt de Soignes.

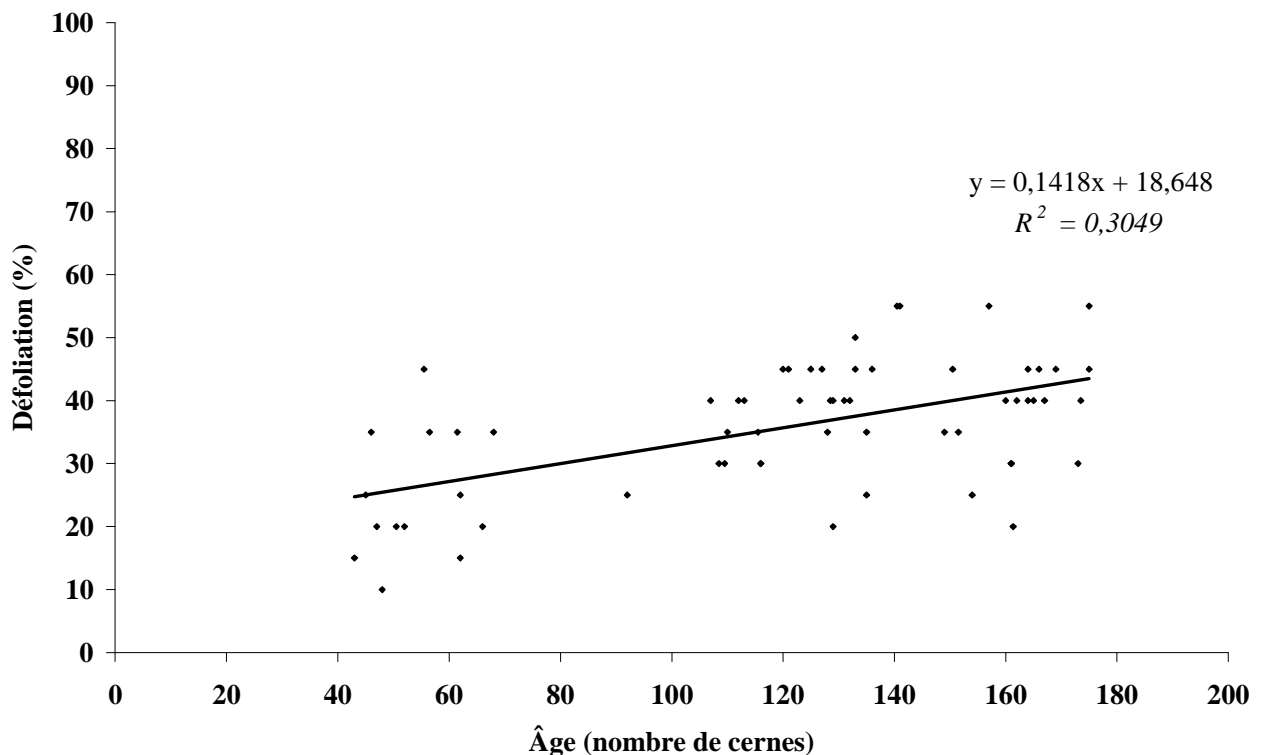


Figure 52. Relation entre âge et défoliation des arbres sondés (n=62).

Les arbres de la plupart des placettes sont répartis de part et d'autre de la droite de régression. Cependant, la placette 4928 est largement au-dessus, et les placettes 3509 et 4147 sont largement en-dessous de cette droite (Tableau 9). Là aussi, nous constatons que les arbres de ces placettes ont moins de 60 ans ou plus de 110 ans.

Tableau 9. Défoliation et âge des placettes 3509, 4147 et 4928.

Placette	Nombre d'arbres sondés	Moyenne de la défoliation (%)		Moyenne de l'âge	
3509	5	28	(6)	145	(21)
4147	3	17	(3)	57	(12)
4928	3	38	(6)	58	(3)

Connaissant l'âge et la circonférence, il est possible de calculer l'accroissement annuel en circonférence (rapport de la circonférence par l'âge). On remarque une augmentation de la défoliation à mesure que l'accroissement diminue (Figure 53), même si la relation n'est pas significative ($p = 0,1408$). Il faut interpréter cette relation en se rappelant que l'accroissement diminue également avec l'âge (Figure 54) : la Figure 53 montre que les hêtres de 150 à 175 ans ont globalement un accroissement moindre que les hêtres de moins de 100 ans. Dans le même temps, la défoliation augmente avec l'âge.

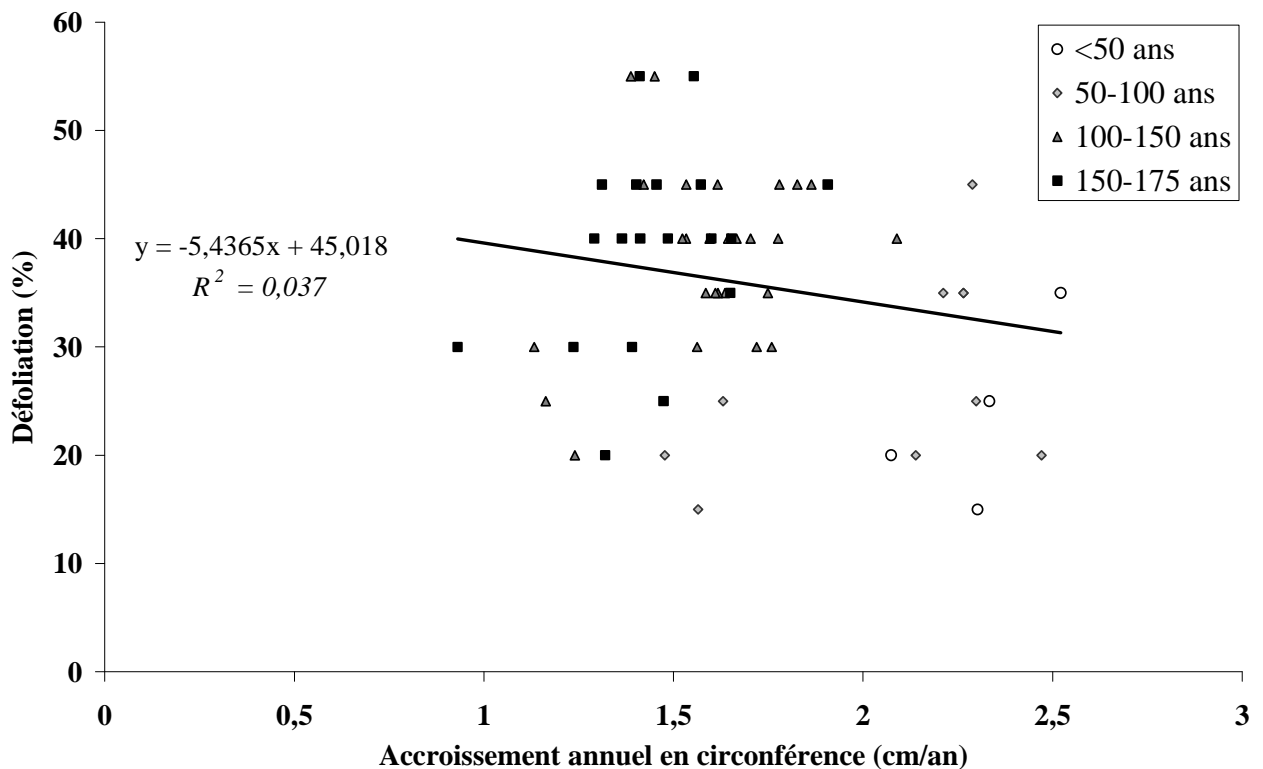


Figure 53. Relation entre accroissement annuel en circonférence et défoliation (hêtre, n=62)

La Figure 53 montre que la défoliation de l'arbre sondé est très variable pour un accroissement donné. En mettant en relation les résidus de la défoliation et l'âge des arbres sondés (Figure 54), on observe que les résidus sont d'autant plus grands que l'arbre est âgé ($p = 0,0028$). Cependant, la moyenne des résidus est très proche de 0.



Figure 54. Évolution des résidus (Figure 53) avec l'âge des hêtres sondés (n=62)

5.5. Dommages et symptômes

Les dégâts occasionnés aux arbres peuvent altérer la qualité des produits forestiers, mais aussi la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes (Laurent et Lecomte, 2005). Les dommages diffèrent sensiblement d'une essence à l'autre. Les feuilles décolorées constituent le symptôme le plus couramment rencontré sur les chênes, tandis que ce sont les rameaux morts qui sont principalement observés sur le hêtre (Figure 55).

Tableau 10. Symptômes et dommages les plus fréquemment notés en 2011 (hêtre).

<i>Partie affectée</i>		<i>Symptôme</i>	<i>Nombre de cas</i>	
			<i>Détails</i>	<i>Total</i>
Feuilles		Dévorées	11	
		Décolorées vert clair à jaune	4	
		Décolorées rouge/brun	10	28
		Décolorées bronze	1	
		Feuilles naines	2	
Branches	Rameaux de l'année en cours	Morts ou mourants	17	
	Branches < 2cm	Déformées	1	
		Mortes ou mourantes	25	
	Branches 2 à 10 cm	Mortes ou mourantes	17	69
	Branches > 10 cm	Cassées	1	
		Mortes ou mourantes	6	
	Branches diam. Variables	Mortes ou mourantes	2	
Tronc	Dans la couronne	Blessures	1	
	Sous la couronne	Blessures	12	
		Déformé	4	
	Hauteur d'homme	Déformé	6	33
		Collet	Blessures	
	Entier	Champignons	1	
		Arthropodes	1	
	Blessures	5		

Tableau 11. Symptômes et dommages les plus fréquemment notés en 2011 (chênes).

Partie affectée	Symptôme	Nombre de cas		
		Détails	Total	
Feuilles	Dévorées	42	61	
	Décolorées vert clair à jaune	3		
	Décolorées rouge/brun	15		
	Décolorées bronze	1		
Branches	Branches 2 à 10 cm	Mortes ou mourantes	2	3
	Branches > 10 cm	Mortes ou mourantes	1	
Tronc	Sous la couronne	Déformé	2	19
		Blessures	5	
		Écoulement de sève	1	
	Hauteur d'homme	Blessures	4	
		Écoulement de sève	1	
	Collet	Blessures	6	

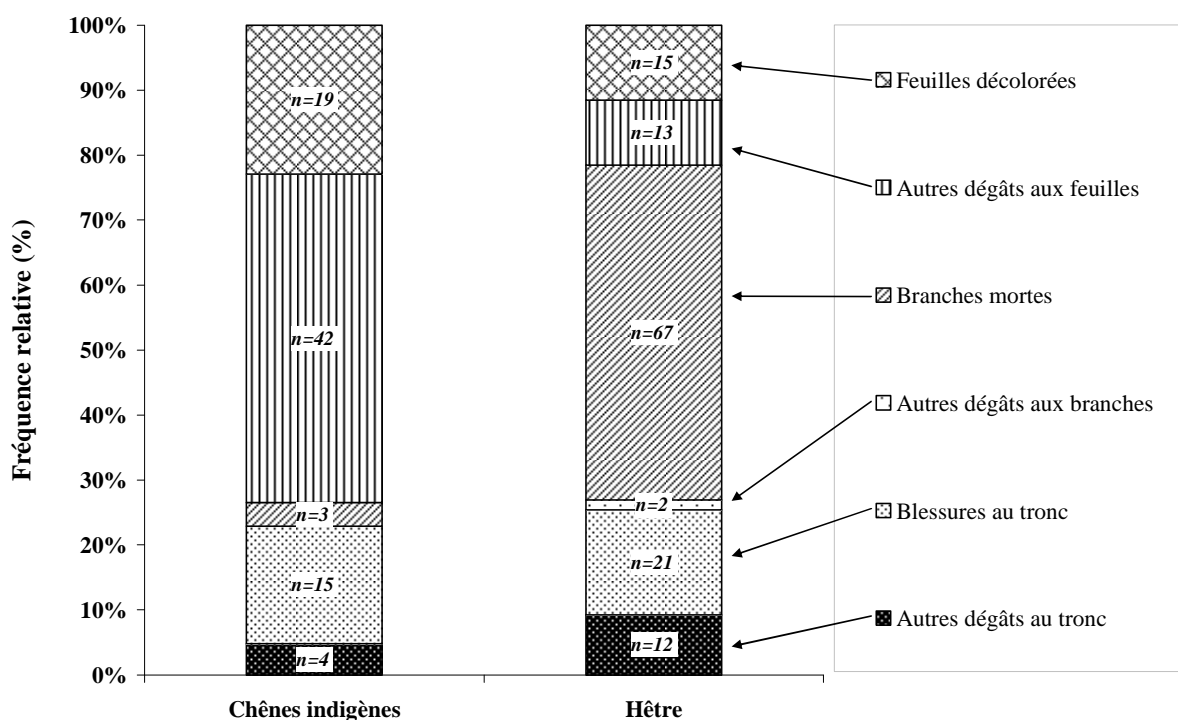


Figure 55. Distribution des symptômes et dommages signalés en 2011 selon les essences.

Plusieurs symptômes ou dommages peuvent être signalés pour chaque arbre.

Rabotage des cimes

Sur certains arbres, on observe les premiers indices d'une descente de cime : dessèchement progressif des branches, depuis les plus fines jusqu'aux plus épaisses, en partant du sommet de la couronne vers le centre (Sioen et al., 2010). On peut supposer que, suite à des épisodes venteux comme ceux de l'été 2010, les branches mortes tombent et que la couronne se resserre sur sa partie basse, qui devient la nouvelle partie à observer. La défoliation se réduit alors après avoir atteint des niveaux assez élevés. Les hêtres portant des branches mortes représentaient deux tiers de l'échantillon en 2009, un tiers seulement en 2010. En 2011, 26 arbres (hêtres et chênes confondus) présentent des branches mortes ou manquantes en proportions importantes. Ces arbres sont susceptibles d'être dans un processus de rabotage de cime. Le Tableau 13 présente les arbres pour lesquels des rameaux morts ont été rapportés et dont la défoliation a diminué depuis 2009.

Tableau 12. Arbres portant des rameaux morts et pour lesquels une diminution de la défoliation a été observée.

<i>Placette</i>	<i>Arbre</i>	<i>Essence</i>	<i>Défoliation</i>			<i>Diminution de la défoliation</i>
			<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	
4449	17	Chêne pédonculé	30	35	30	5
2877	7	Hêtre	45	30	-	15
3511	5	Hêtre	35	25	-	10
3511	7	Hêtre	45	25	-	20
3831	1	Hêtre	40	20	-	20
3831	5	Hêtre	50	35	-	15
3831	7	Hêtre	50	25	-	25
3989	2	Hêtre	45	-	35	10
3989	3	Hêtre	35	-	25	10
4145	8	Hêtre	50	20	-	30
4783	1	Hêtre	40	35	-	5

Feuilles décolorées

Les feuilles décolorées représentent un peu plus de 20% des cas signalés en chênes, et 10% des cas signalés en hêtre. On note sur certaines placettes une forte proportion d'arbres présentant des feuilles décolorées (Tableau 13).

Tableau 13. Trois placettes comportant une forte proportion d'arbres aux feuilles décolorées

<i>Placette</i>		<i>Triage</i>	<i>Proportion d'arbres aux feuilles décolorées (%)</i>
4529	Chênaie	Rouge-Cloître	30,3%
3033	Hêtraie	Infante	30%
3349	Hêtraie	Bonniers	28,6%

Défoliateurs

Des placettes, particulièrement en chênaie, sont fortement touchées par les défoliateurs (Tableau 14). Or, il existe une relation entre défoliation et présence d'insectes (Eichhorn et al., 2005). Plus des trois quarts des chênes présentent des symptômes de défoliateurs. Le diagnostic doit cependant être confirmé par un phytopathologiste.

Tableau 14. Trois placettes comportant une forte proportion d'arbres touchés par des défoliateurs.

<i>Placette</i>		<i>Triage</i>	<i>Proportion d'arbres touchés par des défoliateurs (%)</i>
4449	Chênaie	Rouge-Cloître	62,5%
2791	Chênaie	Saint-Hubert	55,6%
4529	Chênaie	Rouge-Cloître	48,5%

Le 2 mai 2011, le prof. Jean-Claude Grégoire (ULB), Mme Laurence Delahaye (DEMNA) et MM. Bart Swerts et Erwin Verkenne (Bruxelles-Environnement) ont visité la chênaie des Trois-Couleurs (où se trouvent les placettes 4449 et 4529). Ils y ont recueilli des feuilles sur les chênes, par battage des branches basses. Quelques espèces de lépidoptères phyllophages ont été déterminées (Tableau 15).

Tableau 15. Lépidoptères identifiés le 2 mai 2011 aux Trois-Couleurs (triage du Rouge-Cloître).

<i>Famille</i>	<i>Genre et espèce</i>	<i>Remarques</i>
<i>Eriocraniidae</i>	<i>Dyseriocrania subpurpurella</i>	-
<i>Geometridae</i>	<i>Agriopis leucophaearia</i> (hibernie grisâtre)	Inféodé aux chênes. Défoliateur précoce (Glavendekic et Medarevic, 2010).
	<i>Agriopis marginaria</i>	Inféodé aux chênes. Défoliateur précoce (Glavendekic et Medarevic, 2010).
	<i>Agriopis aurantiaria</i> (?)	-
	<i>Apocheima pilosaria</i>	Cause relativement peu de dommages (Tello et al., 2005)
<i>Noctuidae</i>	<i>Orthosia cerasi</i>	-
<i>Lymantriidae</i>	<i>Lymantria dispar</i> (bombyx disparate)	Polyphage, donc risque de contagion à d'autres genres d'arbres que le chêne. Peut causer une défoliation importante, parfois jusqu'à la mort de l'arbre (Tello et al., 2005 ; Nageleisen et al., 2010).

Les défoliateurs précoces détruisent les premiers bourgeons et les jeunes feuilles, 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 défoliateurs⁹ plus tardifs ou par le mildiou, qui détériorent la repousse. Dans ces conditions, le chêne est fortement fragilisé (Glavendekic et Medarevic, 2010).

Dégâts au tronc

Les blessures au tronc (meurtrissures d'origine accidentelle, plaies diverses, etc.) sont les dégâts les plus fréquents, devant les déformations, tant chez le hêtre que chez les chênes. Les plaies dues à l'exploitation (élagage, abattage, débardage, vandalisme, Figure 61) 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). Aucun coup de soleil n'a été directement observé sur une placette de suivi sanitaire, mais des cas ont été signalés sur des arbres situés aux environs de la placette 2877 (drève des Bonniers, triage de Saint-Hubert).

Ustulina deusta a été signalé sur le hêtre n°7 de la placette 3197 (triage de Saint-Hubert, Figure 60) par Bram Aertsen et Bart Swerts. Vandekerkhove et al. (2003) avaient déjà noté la présence d'*Ustulina deusta* sur des débris de hêtre mort dans la réserve forestière de la

⁹ *Lymantria dispar* est connu pour consommer à la fois les pousses de printemps et les pousses d'été du chêne.

Kersselaerspleyn (Groenendael), en Forêt de Soignes flamande. *Ustulina deusta* 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).

Les figures ci-dessous illustrent quelques symptômes rencontrés incidemment en forêt de Soignes bruxelloise. Les rejets de sciure blanche sont attribués à des insectes xylémophages. Les suintements noirâtres sur le tronc peuvent être dus à des insectes cambiphages (agriles), des champignons (armillaire), ou à des épisodes de gel (Nageleisen, 2010).



Figure 56. Sciures relevées à l'entour de trous, sur un hêtre du triage de Bonne-Odeur.



Figure 57. Suintements noirâtres sur un hêtre du triage de Bonne-Odeur.



Figure 58. Suintements noirâtres sur un hêtre du triage de Bonne-Odeur.



Figure 59. Blessure au tronc sur un chêne pédonculé (placette 3595, triage des Bonniers).



Figure 60. *Ustulina deusta* sur le hêtre n°7 de la placette 3197 (trilage de Saint-Hubert).



Figure 61. Dégât d'exploitation ancien sur hêtre.

6. Discussion

Dans les rubriques suivantes, nous discutons les différentes influences possibles qui pourraient expliquer en partie la perte de vitalité en forêt de Soignes.

6.1. Causes possibles du dépérissement

Climat et apports atmosphériques

Le printemps 2011 a été particulièrement sec (§ 1.2). Il est cependant difficile d'estimer son effet sur la défoliation observée en 2011. Aucun dégât ou symptôme directement attribuable au climat n'a été rapporté. À titre d'information, les agents du réseau RENECOFOR (France) n'ont pas rapporté de signes alarmants en 2011 (communication de Manuel Nicolas (ONF), juillet 2011).

Il est intéressant d'étudier l'évolution des largeurs de cernes des hêtres de la forêt de Soignes. Sylvie La Spina (ULB), dans le cadre de sa thèse de doctorat (2011) sur la réaction des hêtres au stress hydrique, a carotté 42 hêtres, dominants ou non (Tableau 16). La placette expérimentale est située en seconde brigade, dans le triage des Trois Fontaines, coupe II, entre l'E411, le chemin de Diependelle et la drève du Relais des Dames, sur un sol lessivé acide typique de forêt de Soignes, avec présence de fragipan. La récolte et l'analyse des carottes ont été réalisées en collaboration technique avec l'UCL. Raphaële Vander Perre (UCL), dans le cadre de l'action 2.2.2. de l'accord-cadre (Région wallonne), a procédé en 2010 à un carottage sur 18 hêtres dominants répartis sur deux sites ardennais (Vecmont et La-Roche-en-Ardenne) (Tableau 16).

Tableau 16. Comparaison des échantillons dendrochronologiques.

	<i>Forêt de Soignes</i>	<i>Ardenne</i>
Année de prélèvement	2011	2009
Effectif	42	18
Circonférence minimum (cm)	51	102
Circonférence maximum (cm)	153	211
Circonférence moyenne (cm)	91	150
Écart-type de la circonférence (cm)	26	31
Âge moyen estimé	> 30 ans	> 70 ans

Les séries dendrochronologiques issues de ces analyses de carottes sont présentées à la Figure 62 et à la Figure 63. En Ardenne, durant les deux à trois ans qui suivent les épisodes de sécheresse (1976, 1989 et 2003), la largeur des cernes diminue de manière nette. Ce phénomène ne s'observe pas sur le site expérimental en forêt de Soignes. Cela laisse supposer que les effets de la sécheresse y sont moins marqués. Les études de Tanguy Manise (accord-cadre UCL-DNF, 2011) montrent d'ailleurs, pour le site de la forêt de Soignes, que la réserve en eau utile est de l'ordre de 206 mm, alors qu'en Ardenne elle oscille entre 100 et 150 mm (communication personnelle, septembre 2011). Les arbres disposent a priori d'une réserve en eau importante en forêt de Soignes. Des analyses plus poussées en matière de déficit en eau

en forêt de Soignes doivent être effectuées, mais il convient d'explorer d'autres pistes. La largeur des cernes reste plus ou moins stable en Ardenne, alors que sur le site expérimental de la forêt de Soignes, après une décroissance entre 1971 et 1978, la largeur augmente. Cette augmentation peut être l'effet d'éclaircies passées. Mais les largeurs de cernes du site sonien sont globalement plus élevées et plus durables qu'en Ardenne, ce qui suggère une augmentation de la productivité liée à des dépôts azotés¹⁰. Si c'est le cas, l'azote n'est plus un facteur limitant (dépassement de la charge critique en azote), ce qui engendre en contrepartie une perturbation de la nutrition minérale, voire un lessivage d'éléments nutritifs (Laurent et Lecomte, 2005). Une analyse foliaire¹¹ serait un moyen de confirmer cette hypothèse.

Il faut bien garder à l'esprit que la densité, l'âge et la productivité des peuplements échantillonnés sont fort différents. L'influence de ces paramètres sur les tendances observées n'est pas connue. S'il semble bien que chacun des peuplements réagit différemment aux épisodes de sécheresse climatique, il reste cependant impossible de conclure définitivement sur les tendances et les niveaux observés.

¹⁰ Environ 9,8 kg/ha.an relevés en 2007 au bois de Lauzelle, à Louvain-la-Neuve (source UCL).

¹¹ Prélèvement de feuilles au sommet de la couronne et calculs des teneurs en nutriments en laboratoire.

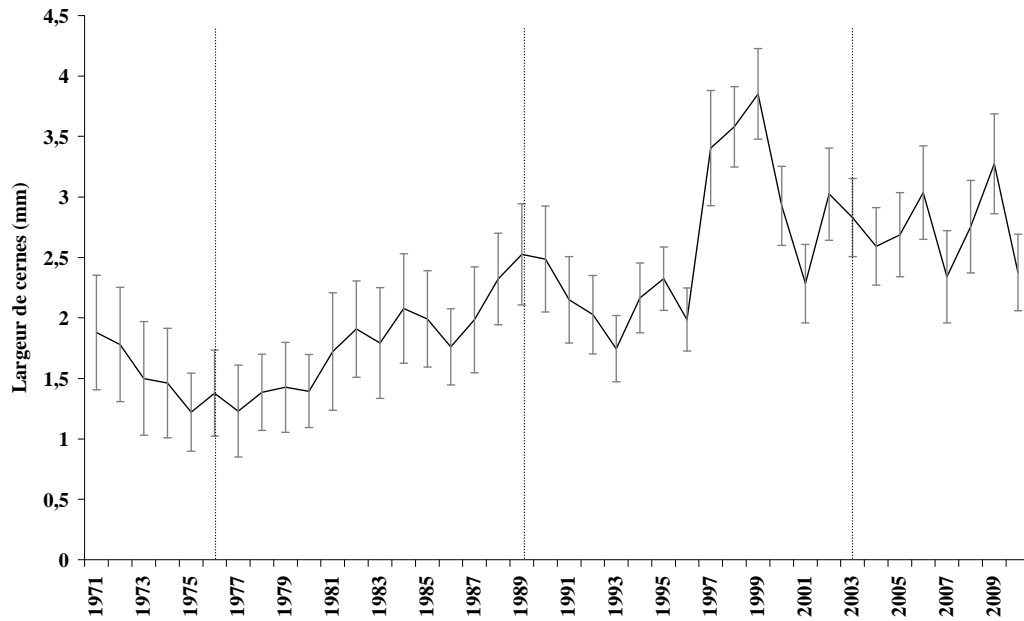


Figure 62. Largeurs de cornes (mm) observés en forêt de Soignes

(Sylvie La Spina, ULB, 2011)

Les barres d'erreur indiquent l'intervalle de confiance ($\alpha=0,05$).

Les barres indiquent les années de sécheresse.

42 arbres sondés.

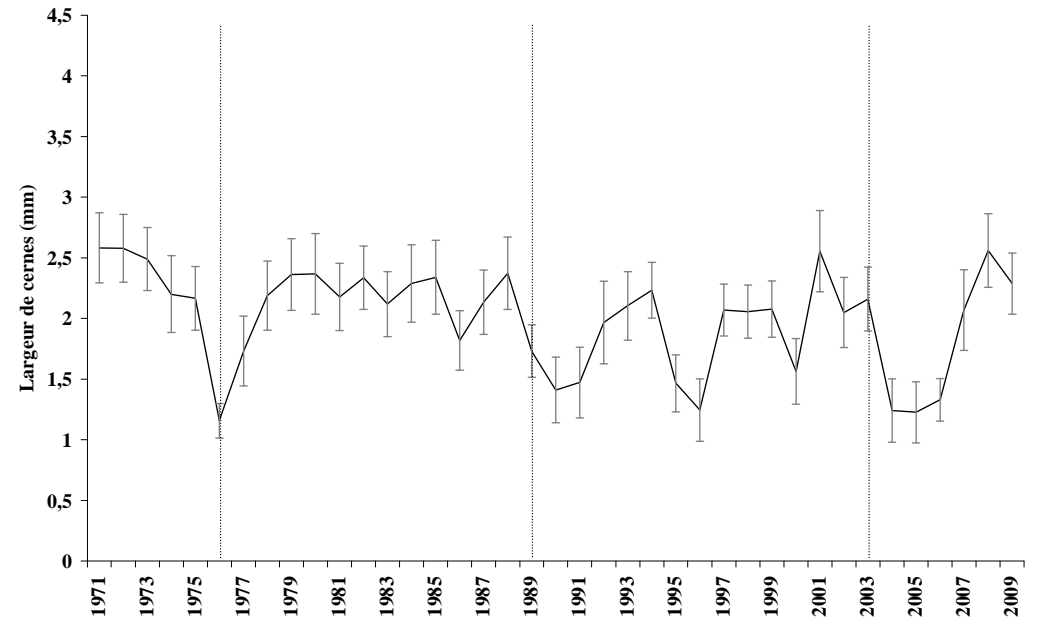


Figure 63. Largeurs de cornes (mm) observées en Ardenne.

(Raphaèle Vander Perre, UCL, 2011)

Les barres d'erreur indiquent l'intervalle de confiance ($\alpha=0,05$).

Les barres indiquent les années de sécheresse.

18 arbres sondés.

Adéquation des essences de chênes avec la station

Chêne pédonculé et chêne sessile ne partagent pas les mêmes exigences écologiques. Le chêne pédonculé pousse de préférence sur des sols fertiles, meubles, frais et profonds. Il supporte mal les sites hydromorphes. Le chêne sessile, lui, admet des sols pauvres et superficiels mais rejette les sols alluviaux, les gleys et les engorgements superficiels. Le chêne sessile supporte assez bien les sécheresses. Le système racinaire des chênes peut s'enfoncer très profondément (c'est particulièrement le cas pour le chêne pédonculé), sauf dans le cas des sols très argileux, où l'enracinement devient traçant, les racines étant concentrées au-dessus de 50 cm de profondeur. Les sols de nature hydromorphique ou argileuse conduisent à une détérioration du système racinaire du chêne pédonculé, qui a des répercussions sur l'état de la couronne elle-même (Thomas et Hartmann, 1998).

Les travaux de Daise et al. (2009) permettent de classer les chênes suivis lors de la campagne sanitaire selon leurs adéquations au site (Tableau 17, Figure 64 et Figure 65). On note que la majorité des chênes ne sont pas en situation optimale. Seul le site des Trois-Couleurs est favorable aux chênes indigènes, particulièrement le chêne sessile (Figure 65).

Tableau 17. Adéquations des essences de chênes aux stations.

<i>Essence</i>	<i>Placettes</i>	<i>Adéquation</i>
Chêne pédonculé	2791, 3033	Tolérance
	3197, 3595, 4781	Limite de tolérance
	4449, 4529	En station
Chêne sessile	2791, 4529	Tolérance
	4781	Optimum

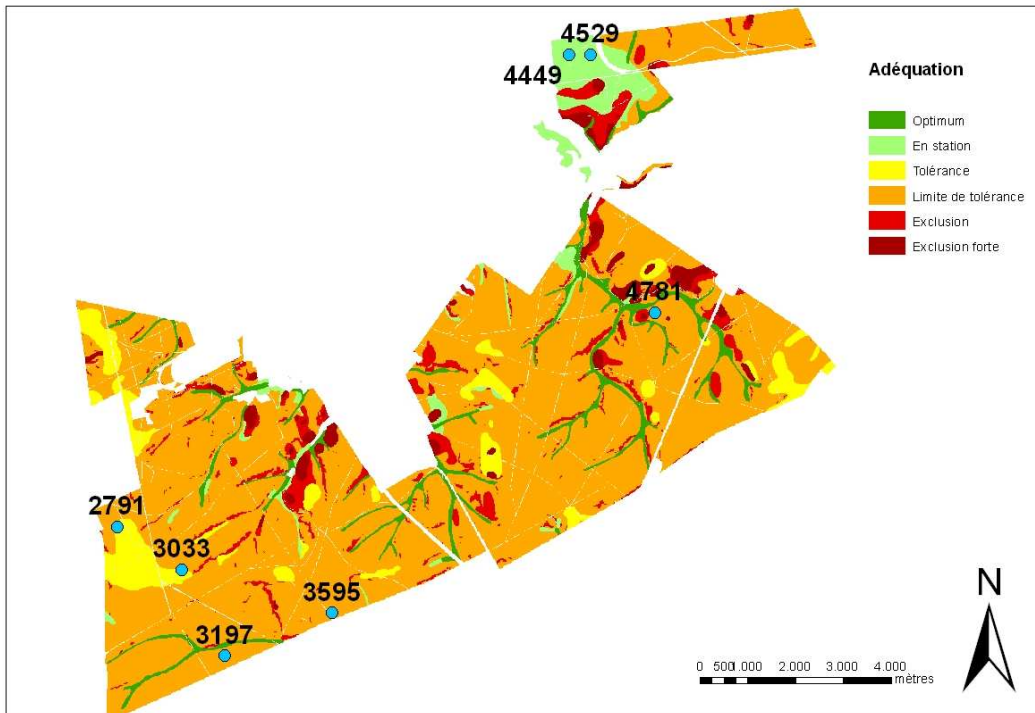


Figure 64. Carte des stations du chêne pédonculé (Daise et al., 2009) et placettes du suivi sanitaire comportant des chênes pédonculés.

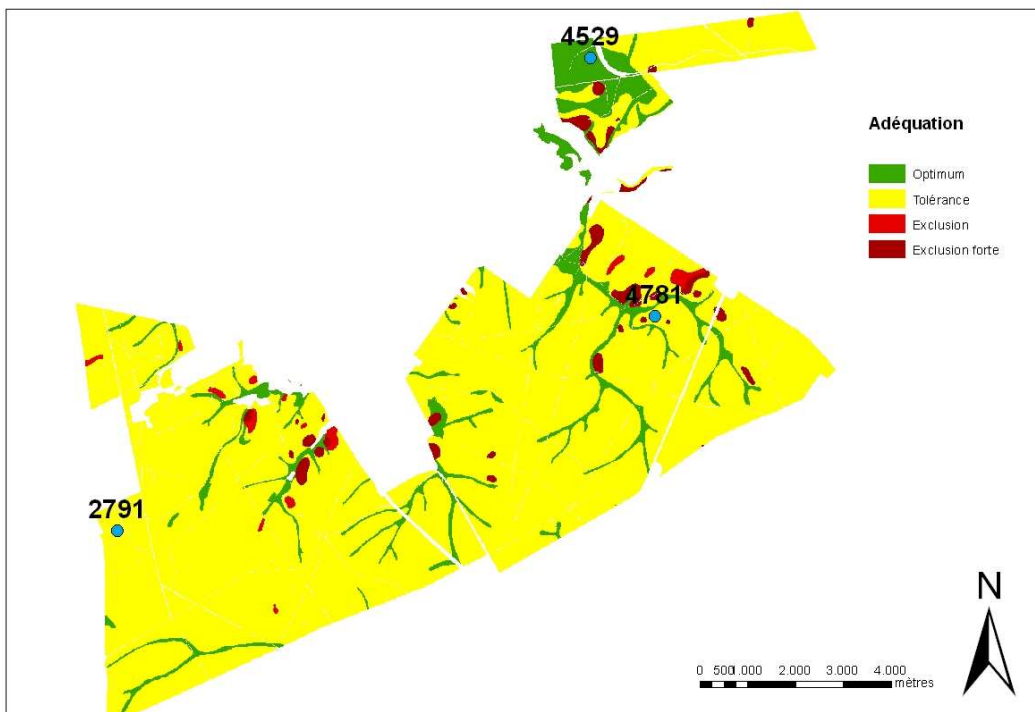


Figure 65. Carte des stations du chêne sessile (Daise et al., 2009) et placettes du suivi sanitaire comportant des chênes sessiles.

6.2. Sylviculture

Les réponses du gestionnaire face à la perte de vitalité des peuplements peuvent être curatives d'une part et préventives d'autre part.

Mesures curatives

Une des premières mesures curatives est la récolte des arbres d'intérêt économique dont plus de 50% de la couronne n'est plus fonctionnelle (branches mortes, déficit de feuilles). Cette récolte doit être limitée au strict nécessaire, c'est-à-dire en évitant la déstructuration des peuplements. Elle doit de plus être effectuée en évitant toute dégradation du sol (Nageleisen, 2010).

Mesures préventives

Au sein des peuplements, existent des phénomènes de compétition pour les ressources en eau, en nutriments et en énergie. Une forte densité peut rendre le peuplement plus sensible aux stress (Allen et al., 2010). Une sylviculture adaptée peut, dans une certaine mesure, limiter les sources de stress et contrebalancer l'influence du climat sur la croissance des arbres et des peuplements. Les éclaircies peuvent modifier les conditions de la compétition en limitant les trop fortes concurrences, notamment pour l'eau (Cescatti et Piutti, 1998 ; Chmura et al., 2011). De manière générale, les éclaircies doivent intervenir précocement plutôt que tardivement (Nageleisen et al., 2010).

En 2011, nous avons constaté, en hêtre, une relation très étroite entre âge et circonférence. L'augmentation de la défoliation avec la circonférence des hêtres, observée depuis 2009, suggère de réduire l'âge d'exploitabilité des peuplements pour en maintenir la vitalité. Un âge d'exploitabilité trop élevé peut en effet rendre la forêt plus vulnérable (Nageleisen et al., 2010).

Sur le long terme, il est conseillé de diversifier la hêtraie en y ajoutant des essences les mieux adaptées aux conditions actuelles et futures de la station (Laurent et Lecomte, 2005 ; Daise et al., 2009 ; Allen et al., 2010). Le mélange d'essences permet en effet d'augmenter la résilience du massif et de diminuer l'accès des parasites spécifiques à leurs hôtes (Chmura et al., 2011 ; Nageleisen et al., 2011).

Enfin, le suivi sanitaire doit être régulier pour pouvoir intervenir à temps en cas de problème. En particulier, l'attention devra être portée à déceler les prémices de ravageurs. En effet, dans la perspective du changement climatique, les épisodes de sécheresse prolongée et les vagues de chaleur devraient faciliter le développement de ravageurs et de maladies, et notamment des xylophages et des espèces thermophiles (Lindner et al., 2010 ; Chmura et al., 2011).

6.3. Mise à jour du dispositif de suivi

En 2010, la placette 3669 a été mise à blanc. De nombreux hêtres des placettes 3671, 4147 et 4947 sont martelés, y compris des arbres témoins (§ 3.1). Il est donc utile de procéder au remplacement de ces placettes. Le Tableau 18 propose des placettes de remplacement. Elles sont situées sur la grille systématique initiale, dans des peuplements similaires en termes de typologie et d'âge. Seule la placette 4065 a été décalée par rapport à cette grille pour rester dans le type de peuplement.

Tableau 18. Placettes de remplacement.

Les âges sont rapportés à l'année 2011. On note que la typologie proposée par Timal (2006) ne correspond à l'âge mesuré par carottage que pour la placette 4947.

<i>Placette</i>	<i>Placettes à remplacer</i>					<i>Placette</i>	<i>Placettes de remplacement</i>				
	<i>Lambert X</i>	<i>Lambert Y</i>	<i>Âge (Timal, 2006)</i>	<i>Âge (carottage)</i>	<i>Typologie (Timal, 2006)</i>		<i>Lambert X</i>	<i>Lambert Y</i>	<i>Âge (Timal, 2006)</i>	<i>Typologie (Timal, 2006)</i>	
3669	153300	163700	190	154	hêtraies pures, plus de 180 ans	3670	153300	163500	190	hêtraies pures, plus de 180 ans	
3671	153300	163300	190	172	hêtraies pures, plus de 180 ans	3672	153300	163100	190	hêtraies pures, plus de 180 ans	
4147	154500	164100	68	54	hêtraies pures, 60-120 ans	4065	154300	164500	76	hêtraies pures, 60-120 ans	
4947	156500	164100	156	141	hêtraies pures, 120-180 ans	4867	156300	164100	156	hêtraies pures, 120-180 ans	

7. Conclusion et perspectives

Les hêtres et les chênes de la forêt de Soignes présentent un état de santé moyen. La défoliation moyenne y est légèrement plus élevée qu'en Flandre, mais elle du même ordre de grandeur qu'en Wallonie (§ 5.1). Néanmoins, les chiffres wallons et flamands recouvrent une diversité de situations trop importante pour être pertinemment comparés aux chiffres de la forêt de Soignes.

La perte de vitalité observée en forêt de Soignes peut être attribuée à un certain nombre de facteurs. Les séries dendrochronologiques disponibles ne montrent pas d'influence nette de la sécheresse sur la vitalité des arbres, mais ces analyses doivent encore être approfondies.

À l'avenir, il pourrait être utile d'affiner le diagnostic de la décoloration des feuilles. Il serait possible de relever les symptômes dus à l'ozone de ceux causés par d'autres facteurs (sécheresse, champignons, virus, etc.). Une clef simplifiée des symptômes visibles à l'œil nu est proposée par l'ONF (ONF, 2008), sur base des travaux de Günthardt-Goerg et Vollenweider (2006). L'influence du sol (bilan hydrique, fragipan) reste largement méconnue. En ce qui concerne les propriétés chimiques du sol, l'hypothèse d'une influence des dépôts azotés sur la croissance des arbres doit quant à elle être vérifiée par analyse foliaire.

8. Bibliographie

- 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 pp.
- Alderweireld, M. (2007). Étude sur la mise en place d'inventaires du patrimoine forestier de la Région Bruxelles-Capitale : guide méthodologique, convention FUSAGx-IBGE 2007. 108 pp.
- Allen, C., Macalady, A., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D.D., Hogg, E.H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.-H., Allard, G., Running, S.W., Semerci, A., Cobb, N., 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259, 660-684.
- Baudry, O., Charmetant, C., Ponette, Q., 2010. Le climat lumineux en forêt et quelques outils d'estimation. *Forêt Wallonne*, 107 : 42-54.
- Bréda, N., 1999. L'indice foliaire des couverts forestiers: mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Revue Forestière Française*, 51, 135-150.
- Castro, J., Gracia, C.A., Zamora, R., Navarro, R., Vennetier, M., Gadbin-Henry, C., Borgniet, L., 2007. Forest dieback in Europe: climate drivers, symptoms, and physiological processes. Communication au congrès ESA/SER, San Jose, Californie, 5-10 août 2007.
- Cescatti, A., Piutti, E., 1998. Silvicultural alternatives, competition regime and sensitivity to climate in a European beech forest. *Forest Ecology and Management*, 102, 213-223.
- Charru, M., Seynave, I., Morneau, F., Bontemps, J.-D., 2010. Recent changes in forest productivity: An analysis of national forest inventory data for common beech (*Fagus sylvatica* L.) in north-eastern France. *Forest Ecology and Management* 260: 864-874.
- Chmura, D.J., Anderson, P.D., Howe, G.T., Harrington, C.A., Halofsky, J.E., Peterson, D.L., Shaw, D.C., St.Clair, J. B., 2011. Forest responses to climate change in the northwestern United States: Ecophysiological foundations for adaptive management. *Forest Ecology and Management*, 261 : 1121-1142.
- Comps, B., Letouzey, J., Savoie, J.-M., 1987. Phénologie du couvert arborescent dans une chênaie-hêtraie d'Aquitaine. *Annales des Sciences Forestières*, 44 : 153-170.
- 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 pp.
- Dhôte, J.-F., 1991. Modélisation de la croissance des peuplements réguliers de hêtre : dynamique des hiérarchies sociales et facteurs de production. *Ann. For. Sci.* 48, 389-416.

- Dhôte, J.-F., 1999. Compétition entre classes sociales chez le chêne sessile et le hêtre. *Revue Forestière Française*, 51 :309-325.
- Dobbertin, M., Brang, P., 2001. Crown defoliation improves tree mortality models. *Forest Ecology and Management*, 141, 271-284.
- 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.
- Ghosh, S, Innes, J. L., Hoffmann, C., 1995. Observer variation as a source of error in assessments of crown condition through time. *Forest Science*, 41, 235-254.
- Glavendekic, M., Medarevic, M.J., 2010. Insect defoliators and their influence on oak forests in the Djerdap National Park, Serbia. *Arch. Biol. Sci., Belgrade*, 62, 1137-1141.
- Günthardt-Goerg, M.S., Vollenweider, P., 2006. Linking stress with macroscopic and microscopic leaf response in trees: New diagnostic perspectives. *Environmental Pollution*, 147: 467-488.
- Innes J. L. (1993). *Forest Health : Its Assessment and Status*. CAB International, Wallingford. 677 p.
- Johnson, J., Jacob, M., 2010. Monitoring the effects of air pollution on forest condition in Europe: is crown defoliation an adequate indicator? *iForest*, 3, 86-88
- Kohler, M., Kockermann, B., Peichl, M., Schmitt, J., Reif, A., 2006. Impacts of the droughts 2003 on the crown condition of suppressed and intermediate beech trees (*Fagus sylvatica* L.) at the ecotone between beech and downy oak forest in the nature reserve Innerberg, Sudbaden. *Allgemeine Forest und Jagdzeitung*, 177, 86-91.
- Klap, J., Oude Voshaar, J, De Vries, W, Erisman, J., 2000. Effects of environmental stress on forest crown condition in Europe. Part IV. Statistical analysis of relationships. *Water Air and Soil Pollution*, 119, 387-420.
- Kremer, A., Dupouey, J.-L., Deans, J. D., Cottrell, J., Csaikl, U., Finkeldey, R., Espinel, S., Jensen, J., Kleinschmit, J., Van Dam, B., Ducouso, A., Forrest, I., Lopez de Heredia, U., Lowe, A., Tutkova, M., Munro, R.C., Steinhoff, S., Badeau, V., 2002. Leaf morphological differentiation between *Quercus robur* and *Quercus petraea* is stable across western European mixed oak stands. *Ann. For. Sci.*, 59, 777-787.
- Langohr, R., 2010. Quelques facteurs édaphiques dans l'écosystème forêt de Soignes. *Forêt Wallonne*, 105, 3-14.
- Laurent, C., Lecomte, H., 2005. La santé des forêts. *Res For* 3, 202-207. Disponible sur <http://environnement.wallonie.be>.
- Lebourgeois, F., Bréda, N., Ulrich, E., Granier, A., 2005. Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees*, 19: 385-401.

- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., Lexer, M. J., Marchetti, M., 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 259, 698-709.
- Manion, P.D., 1981. *Tree disease concepts*. Englewood Cliffs N.J., Prentice Hall. 324 p.
- Nageleisen, L.-M., Piou, D., Saintonge, F.X., Riou-Nivert, P., 2010. *La santé des forêts*. IDF, 608 pp.
- Noirfalise A., 1984. *Forêts et stations forestières en Belgique*. Gembloux, Presses Agronomiques de Gembloux, 234 pp.
- Office national des forêts (ONF). Direction technique et commerciale bois, 2008. 15 ans de suivi des écosystèmes forestiers. Résultats, acquis et perspectives de RENECOFOR. *Rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série n° 4*. 166 pp.
- Pedersen, B. S., 1998 (a). The role of stress in the mortality of midwestern oaks as indicated by growth prior to death. *Ecology*, 79, 79-93.
- Pedersen, B. S., 1998 (b). Modeling tree mortality in response to short- and long-term environmental stresses. *Ecological Modelling*, 105, 347-351.
- Penninckx, V., Meerts, J., Herbauts, J., Gruber, W., 1997. Étude dendroécologique et dendrochimique du hêtre en Forêt de Soignes. *Forêt Wallonne*, 30, 20-21.
- Penninckx, V., Meerts, J., Herbauts, J., Gruber, W., 1999. Ring width and element concentrations in beech (*Fagus sylvatica* L.) from a periurban forest in central Belgium. *Forest Ecology and Management* 113, 23-33.
- Perrin, R., 1981. Dommages causés aux hêtres et aux hêtraies – le champignon. In : *Le Hêtre*, Paris, INRA, 613 p.
- Seidel, D., Fleck, S., Leuschner, C., 2011. Review of ground-based methods to measure the distribution of biomass in forest canopies. *Annals of Forest Science*, 68: 225-244.
- Sioen, G., Roskams, P., Coenen, S., 2010. *Bosvitaliteitsinventaris 2009. Resultaten van de kroonbeoordelingen in het bosvitaliteitsmeetnet. Rapport de l'INBO (Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek)*, Bruxelles, 73 pp.
- Thomas, F., Hartmann, G., 1998. Tree rooting patterns and soil water relations of healthy and damaged stands of mature oak (*Quercus robur* L. and *Quercus petraea* [Matt] Liebl.). *Plant and Soil* 203: 145-158, 1998.
- Timal, G., 2006. *Mise à jour de la carte des peuplements. Document annexe de la convention CDAF-IBGE 2003-2005*. 5 pp.

- Tello, M.L., Tomalak, M., Siwecki, R., Gáper, J., Motta, E., Mateo-Sagasta, E., 2005. Biotic Urban Growing Conditions – Threats, Pests and Diseases. In: Urban Forests and Trees, Springer, 325-365.
- Vandekerkhove, K., van Dort, K., Baeté, H., Walley, R., 2003. Species richness of mosses, fungi and vascular plants on coarse woody debris of beech in the Flemish forest reserve 'Kersselaerspleyn' (Zoniënwoud). Scripta Bot. Belg. 24, 83-91.
- Van der Werf, G.W., Sass-Klaassen, U. G. W., Mohren G.M.J., 2007. The impact of the 2003 summer drought on the intra-annual growth pattern of beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) on a dry site in the Netherlands. Dendrochronologia, 25, 103-112.

Annexes

Comparaison des circonférences des arbres sondés

La circonférence sur écorce a été mesurée à 1,30m sur les arbres sondés (Tableau 19)¹². Nous pouvons donc comparer ces valeurs aux circonférences des hêtres des placettes sanitaires mesurées durant les étés 2009 et 2010. On constate que les hêtres sondés ont des circonférences similaires aux hêtres observés lors du suivi sanitaire. Les quelques divergences (placettes 4147 et 4458) s'expliquent par l'abaissement du seuil d'inventaire, qui est passé de 100 cm en 2009 à 80 cm en 2010.

¹² Pour certaines placettes, plus de 3 arbres ont été sondés, ils ne sont pas présentés ici.

Tableau 19. Circonférence et nombre de cernes des arbres sondés.

<i>Placette</i>	Campagne de carottage								Campagnes sanitaires			
	Arbre 1		Arbre 2		Arbre 3		Moyennes		<i>Circonférence moyenne (cm) par placette en 2009</i>		<i>Circonférence moyenne (cm) par placette en 2010</i>	
	<i>C130 (cm)</i>	<i>Nombre de cernes</i>	<i>C130 (cm)</i>	<i>Nombre de cernes</i>	<i>C130 (cm)</i>	<i>Nombre de cernes</i>	<i>C130 (cm)</i>	<i>Nombre de cernes</i>				
2877	209	131	204	116	234	112	216	123	213	(36)	214	(36)
2879	205	141	220	132	233	125	219	133	224	(-)	224	(-)
3031	172	121	180	110	193	113	182	107	186	(24)		
3033	170	109	200	116	202	116	191	113	169	(56)	169	(56)
3345	206	187	246	169			226	175	207	(40)		
3349	247	175	250	174	261	166	253	172	253	(29)		
3509	160	129	199	161	207	128	189	145	193	(41)	180	(55)
3511	221	162	224	161	240	149	228	157	229	(50)	229	(47)
3669	211	166	213	134	233	161	219	154	227	(28)		
3671	224	174	230	175	264	165	239	172	256	(-)		
3831	213	161	214	135	227	154	218	155	227	(38)	238	(46)
3989		133	242	136	244	157	243	150	266	(37)		
4145	210		219		225		218		198	(41)	198	(41)
4147	97	62	98	66	99	43	98	54	173	(96)	102	(19)
4151	105	45	108	51	143	62	119	50				
4307	193		203		237		211		221	(81)		
4309	206		222		220		216		217	(12)		
4458	92		103	40	129	52	108	46	160	(97)	125	(67)
4467	99		116				108		111	(10)	104	(15)
4469	226	160	230	164	247	167	234	158	250	(34)	253	(36)
4618	116	46	130		153	48	133	47	133	(31)		
4625	142	113	143	95	187	111	157	112	162	(73)		
4778	124	110	150	92	154	68	143	90	148	(23)	129	(33)
4783	197	129	219	123	232		216	127	213	(56)	218	(54)
4785	194	120	197	129	204	133	198	126	194	(47)	179	(43)
4928	127	56	128	57	136	62	130	58	126	(20)		
4947	195	141	198		224		206	141	204	(30)		

