

Université
catholique de
Louvain



Bruxelles-Environnement
IBGE



Service Public de
Wallonie –
Département de
la Nature et des
Forêts



*Earth and Life
Institute
Environmental
Sciences*



Suivi de l'état sanitaire

*Par observation au sol et par télédétection
en forêt de Soignes bruxelloise*

*Par télédétection
en forêt wallonne*

2010

RAPPORT COMPLET

Promoteurs

Prof. Q. Ponette
Prof. P. Defourny

Appui scientifique

Dr. Mathieu Jonard

Réalisation

Ir. Steve Braem (forêt de Soignes)
Dr. Julien Radoux (Région wallonne)

Novembre ~
décembre 2010

Université catholique
de Louvain



Bruxelles-Environnement
IBGE



*Earth and Life Institute
Environmental Sciences*



Suivi de l'état sanitaire en forêt de Soignes bruxelloise 2010

Promoteurs Prof. Q. Ponette
Prof. P. Defourny

Appui scientifique Dr. Mathieu Jonard

Réalisation Ir. Steve Braem

Décembre 2010

Convention UCL – Bruxelles Environnement 2010
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 »

Promoteurs : Prof. Quentin Ponette et Prof. Pierre Defourny

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. Entre le 1^{er} juillet et le 20 août 2010, 193 arbres (142 hêtres et 51 chênes indigènes) répartis sur 22 placettes ont été observés par les adjoints forestiers de Bruxelles Environnement - IBGE. La défoliation a été estimée sur 146 de ces arbres (102 hêtres et 44 chênes indigènes). La défoliation moyenne du hêtre (27,3%) est moins élevée que celle des chênes (28,5%). En moyenne, pour les 87 arbres évalués tant en 2009 qu'en 2010, la défoliation des hêtres a diminué de 7,3%, et la défoliation des chênes a diminué de 5%. La fructification notée en 2010 est faible, en comparaison avec ce qui était observé en 2009. Une décoloration modérée à sévère est observée sur près de 10% des hêtres et de 25% des chênes. Les principaux dégâts observés sont des rameaux et des branches mortes pour le hêtre et des feuilles décolorées pour les chênes.

La campagne 2010 d'observation sanitaire est le deuxième pas vers la constitution d'une série temporelle sur l'état de santé de la forêt de Soignes bruxelloise. Il est pour l'instant juste possible de comparer les données de 2010 à celles de l'année précédente. La diminution de la défoliation moyenne entre 2009 et 2010 semble être notamment imputable à la moindre fructification observée en 2010. En effet, les arbres présentant une fructification abondante ont en moyenne une défoliation plus élevée de l'ordre de 10% ; en 2010, la proportion de ces arbres a fortement chuté par rapport à 2009. La défoliation des chênes semble être en partie de nature accidentelle (attaque de défoliateurs, vent, etc.), tandis que chez le hêtre, il s'agit d'un processus de perte de vitalité qui s'aggrave progressivement avec le temps. Ainsi, 10% de la variabilité de la défoliation s'explique par la dimension. D'autres facteurs, comme le rabotage des cimes ou des variations dans les conditions de croissance, peuvent encore expliquer l'évolution de la défoliation.

L'opportunité d'estimer l'état sanitaire par photo-interprétation a été évaluée. La défoliation de 65 arbres (hêtres et chênes) répartis le long de la drève de Lorraine a été estimée sur le terrain durant l'été 2009. Leurs positions ont également été calculées pour que leurs couronnes puissent être retrouvées sur les images. La classe de défoliation estimée par photo-interprétation est comparée à celle notée sur le terrain pour évaluer le degré d'exactitude de l'analyse de l'image. Les images ont d'abord été interprétées en deux dimensions (65 arbres repérés sur des orthophotoplans infrarouges) à l'aide d'une clef établie par Hildebrandt (1992), où les couronnes sont rangées en 5 classes de défoliation. Les images ont ensuite été interprétées en trois dimensions (19 arbres repérés sur stéréoscopie infrarouge), à l'aide de la clef d'Hildebrandt puis d'une méthode originale pour les degrés de défoliation plus fins.

La photo-interprétation 2D basée sur la clef d'Hildebrandt semble globalement plus avantageuse que celle basée sur la stéréoscopie. En effet, 80% des arbres repérés sur l'image sont rangés dans la bonne classe de défoliation lorsqu'on utilise les orthophotoplans, alors que cette proportion retombe à 26% pour la stéréoscopie. Cependant, la stéréoscopie permet de distinguer des niveaux de défoliation plus fins lorsqu'on se fie à la restitution 3D (deux tiers d'arbres dont la défoliation est correctement évaluée à 10% près), mais le nombre limité d'arbres observés (19) ne permet pas de conclure de manière définitive. Par ailleurs, les orthophotoplans sont facilement disponibles et sont prêts à l'usage sur un support informatique classique, alors que la stéréoscopie nécessite un équipement plus spécialisé.

Date de fin : novembre 2010

Table des matières

1. Campagnes d’observation au sol de l’état sanitaire	7
1.1. Contexte	7
1.1.1. <i>Objectifs</i>	7
1.1.2. <i>Brève description de la forêt de Soignes</i>	8
1.2. Campagne d’observation 2010.....	9
1.2.1. <i>Plan d’échantillonnage</i>	9
1.2.2. <i>Protocole d’évaluation</i>	12
1.2.3. <i>Caractéristiques des arbres observés</i>	12
Effectif.....	12
Concurrence	14
Statut social	15
Visibilité.....	16
1.2.4. <i>Encodage et traitement des données</i>	17
1.2.5. <i>Contrôle-qualité</i>	17
1.3. Résultats	19
1.3.1. <i>Défoliation</i>	19
Défoliation moyenne par essence.....	19
Évolution de la défoliation moyenne entre 2009 et 2010.....	25
1.3.2. <i>Autres variables relatives à l’état sanitaire</i>	29
Fructification	29
Décoloration	31
Structure de la couronne.....	32
Pousses épicorniques.....	34
1.3.3. <i>Relations entre la défoliation et d’autres variables</i>	35
Circonférence du tronc	36

Fructification	38
Structure de la couronne.....	39
Concurrence	41
1.3.4. <i>Dommages et symptômes</i>	43
1.4. Conclusion et perspectives	45
2. Autres travaux	46
2.1. Prélèvement de carottes sur les hêtres.....	46
2.2. Base de données	46
3. Analyse de l'état sanitaire par photo-interprétation	47
3.1. Contexte	47
3.2. Méthodologie	47
3.2.1. <i>Images analysées</i>	49
3.2.2. <i>Données de terrain</i>	51
3.2.3. <i>Photo-interprétation des orthophotoplans 2009</i>	52
3.2.4. <i>Photo-interprétation des orthophotoplans 2006</i>	56
3.2.5. <i>Photo-interprétation par stéréoscopie</i>	58
3.3. Comparaison des méthodes.....	62
3.4. Conclusion et perspectives	63
4. Références	64
5. Annexes.....	67

1. Campagnes d'observation au sol de l'état sanitaire

1.1. Contexte

1.1.1. Objectifs

En 2009, la Région bruxelloise s'est dotée d'un système d'observation permanent de la vitalité des peuplements. En effet, la forêt de Soignes présente une certaine vulnérabilité du fait de la proximité de grands centres urbains (pollution atmosphérique, fréquentation importante), de conditions édaphiques particulières (fragipan, compaction des sols par l'exploitation forestière et les activités de loisir, etc.) et de la nature des peuplements forestiers (composition spécifique dominée par le hêtre (cf. § 1.1.2), etc.). Le fonctionnement des écosystèmes forestiers est également affecté par l'évolution du climat qui devrait se traduire, entre autres, par une augmentation de la longueur de la saison de végétation, une augmentation des sécheresses en période de végétation, 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.

Le système d'observation de l'état sanitaire 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.).

1.1.2. Brève description de la forêt de Soignes

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).

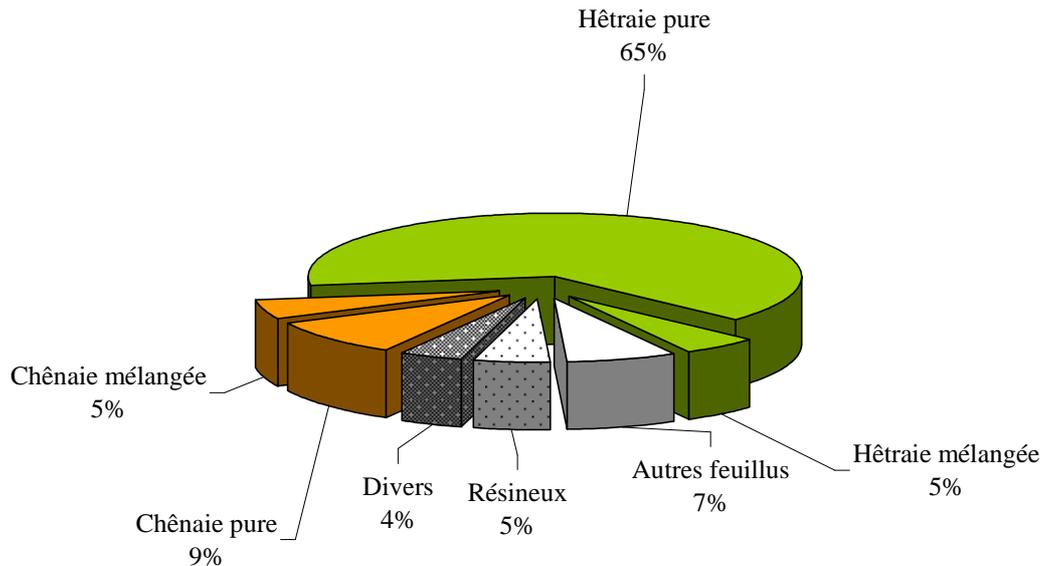


Figure 1. Proportions des types de peuplements en forêt de Soignes bruxelloise (Timal, 2006)

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. 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), se trouve un horizon induré appelé *fragipan*, constitué de veines claires plus meubles. Au-dessus du fragipan (de 0 à 40 cm de profondeur), se trouvent 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. 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. C'est dans cette couche profonde que les hêtres viennent puiser l'eau et les éléments nutritifs nécessaires (Langhor, 2010).

1.2. Campagne d'observation 2010

Les activités suivantes ont été réalisées en 2010 :

- (i) L'observation de l'état sanitaire sur 22 placettes de la forêt de Soignes, comprenant :
 - a. l'adaptation du plan d'échantillonnage,
 - b. les observations proprement dites.
- (ii) Le contrôle-qualité, comprenant :
 - a. la formation des adjoints forestiers de Bruxelles Environnement – IBGE¹ à l'observation de l'état sanitaire,
 - b. la revisite de 8 placettes de suivi sanitaire par l'UCL.
- (iii) L'analyse des données relatives à l'état sanitaire recueillies en 2010.
- (iv) L'élaboration d'une base de données avec une interface d'encodage.

1.2.1. Plan d'échantillonnage

Pour être représentatives des peuplements de la forêt de Soignes bruxelloise (§ 1.1.2), 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 (CDAF²) en 2006. Elles sont positionnées sur la grille systématique de l'Inventaire du Patrimoine Forestier de la Région de Bruxelles-Capitale, mis en place en 2007 par Matthieu Alderweireld. 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 2 et Figure 3). Ces deux sous-échantillons comportent chacun une quinzaine de placettes et sont visités alternativement d'une année à l'autre (Tableau 1).

Tableau 1. Placettes des sous-échantillons. Les numéros correspondent aux identifiants des placettes.

	<i>Années paires (15 placettes)</i>	<i>Années impaires (13 placettes)</i>
Placettes en hêtraie	2877, 2879, 3509, 3511, 3831, 4145, 4147, 4151, 4458, 4467, 4469, 4778, 4783, 4785, 5101	3031, 3033, 3345, 3349, 3669, 3671, 3989, 4307, 4309, 4618, 4625, 4928, 4947
Placettes en chênaie	3197, 3595, 2791, 4781, 4449, 4529 (6 placettes)	

¹ Ci-après dénommé *BE-IBGE*.

² Centre de Développement Agro-Forestier (Chimay).

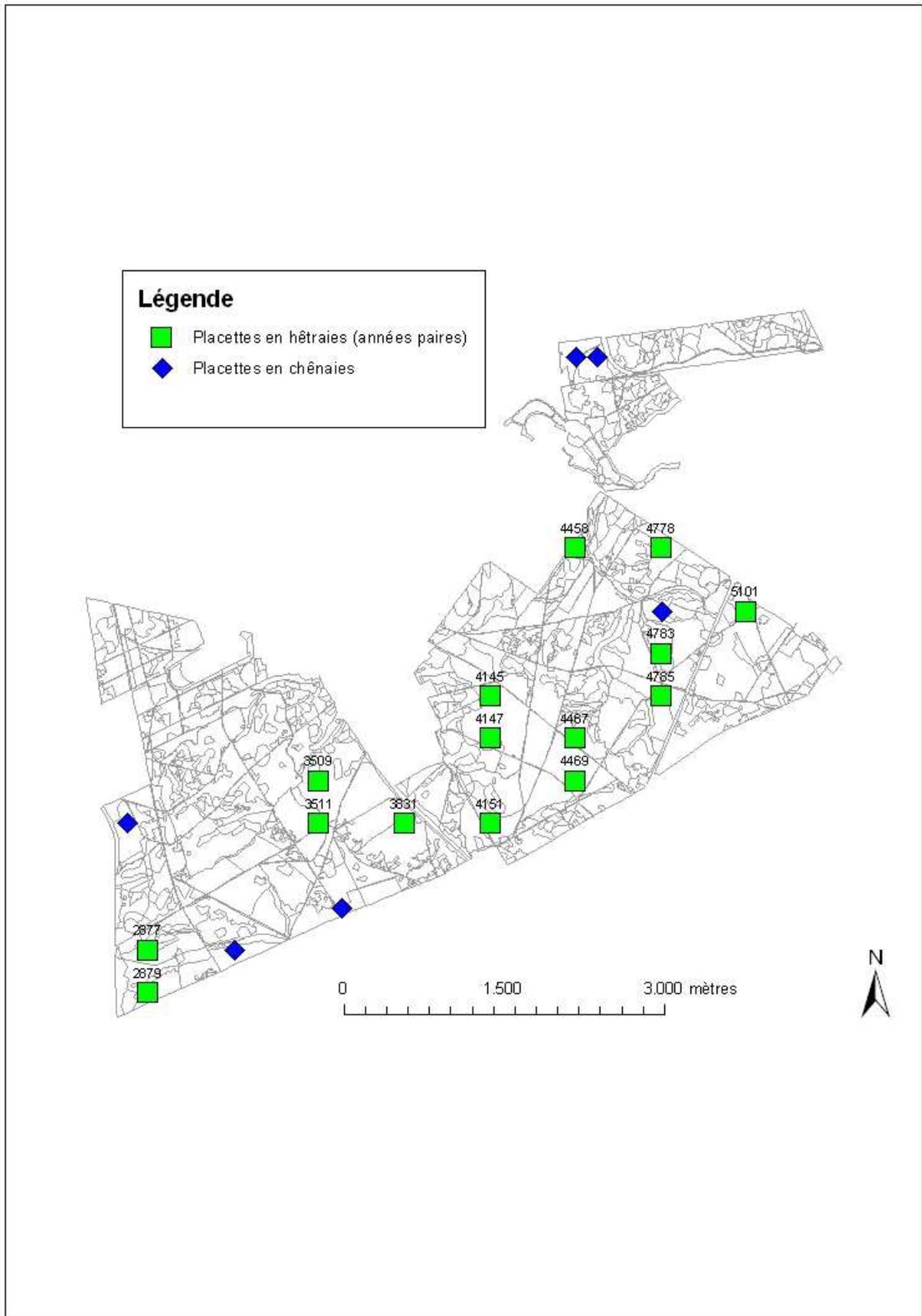


Figure 2. Positions des placettes des sous-échantillons – années paires

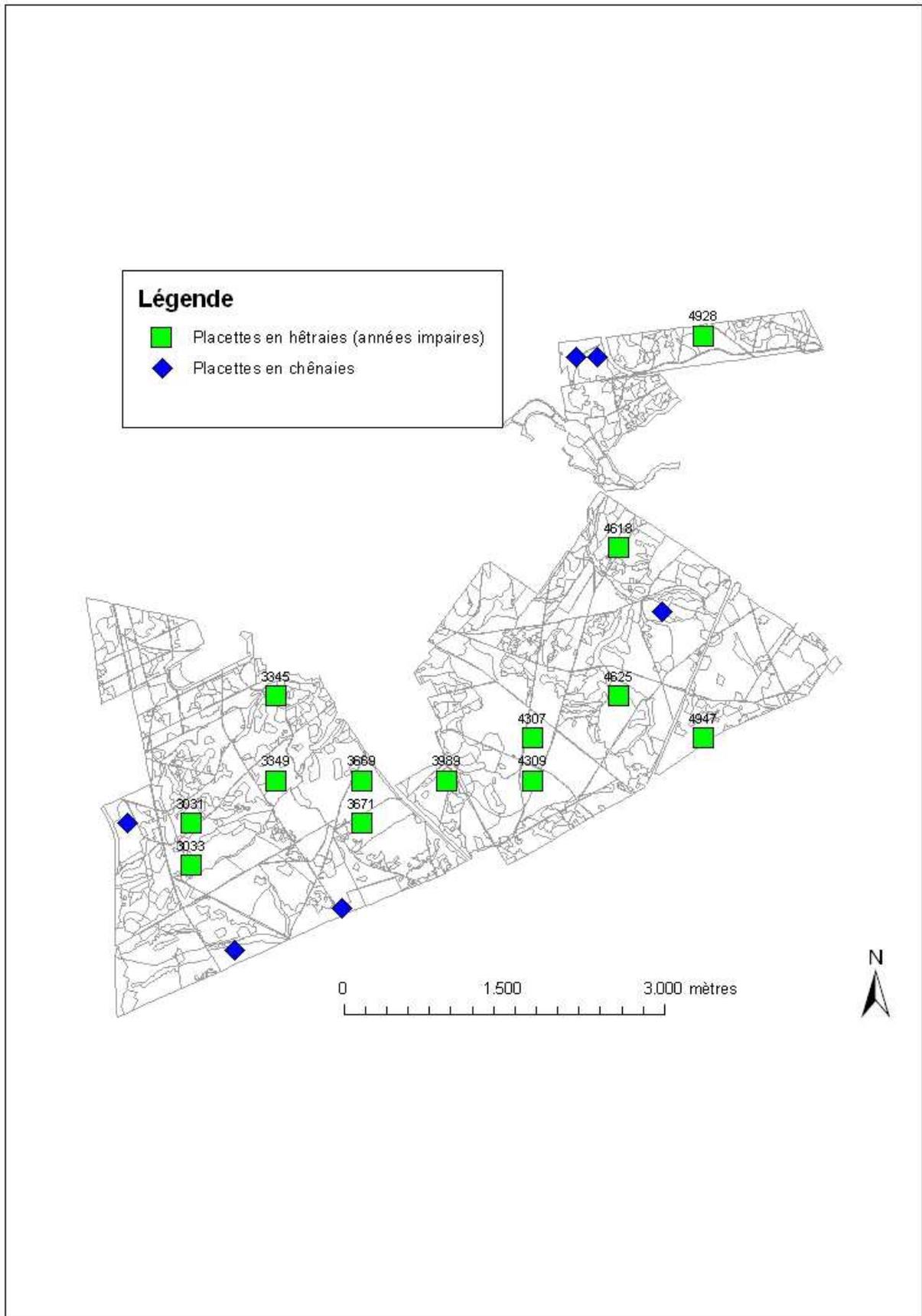


Figure 3. Positions des placettes des sous-échantillons – années impaires

Les arbres observés sont ceux dont la couronne capte la lumière. Les arbres surcimés ne sont pas observés car trop influencés par la concurrence. Le seuil de sélection des arbres avait été fixé à 80 cm de circonférence à 1,5 m de hauteur en 2009, mais le seuil utilisé en pratique par les adjoints forestiers était de 100 cm. En 2010, une attention particulière a été portée pour respecter le seuil de 80 cm. Dans les 28 placettes en hêtraie, 10 arbres (hêtres ou chênes) au plus sont récoltés dans le rayon maximum de 18 m autour de la placette. Dans les 6 placettes en chênaie, 15 chênes indigènes au plus ont été récoltés dans un rayon maximum de 30 m autour de la placette. Cette adaptation était nécessaire pour renforcer l'effectif des chênes dans l'échantillon.

1.2.2. *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. L'arbre est décrit en trois étapes : (i) description des conditions d'observation, (ii) évaluation proprement dite de l'état du houppier, et (iii) description des 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 (Braem *et al.*, 2009 ; Eichhorn *et al.*, 2010 ; Braem *et al.*, 2010).

1.2.3. *Caractéristiques des arbres observés*

Effectif

En 2010, 22 placettes ont été visitées³. Cent-nonante-trois arbres (142 hêtres et 51 chênes indigènes) ont été observés pour au moins un critère sanitaire. Ils sont ci-après désignés « arbres observés ». La défoliation a pu être estimée pour les 146 arbres (102 hêtres et 44 chênes) dont la couronne était visible. Ils sont ci-après désignés « arbres notés ». La Figure 4 et la Figure 5 montrent les distributions des arbres selon ces deux catégories.

³ La placette 3031, située en hêtraie et dont la visite était prévue en 2011, a été observée par erreur en 2010.

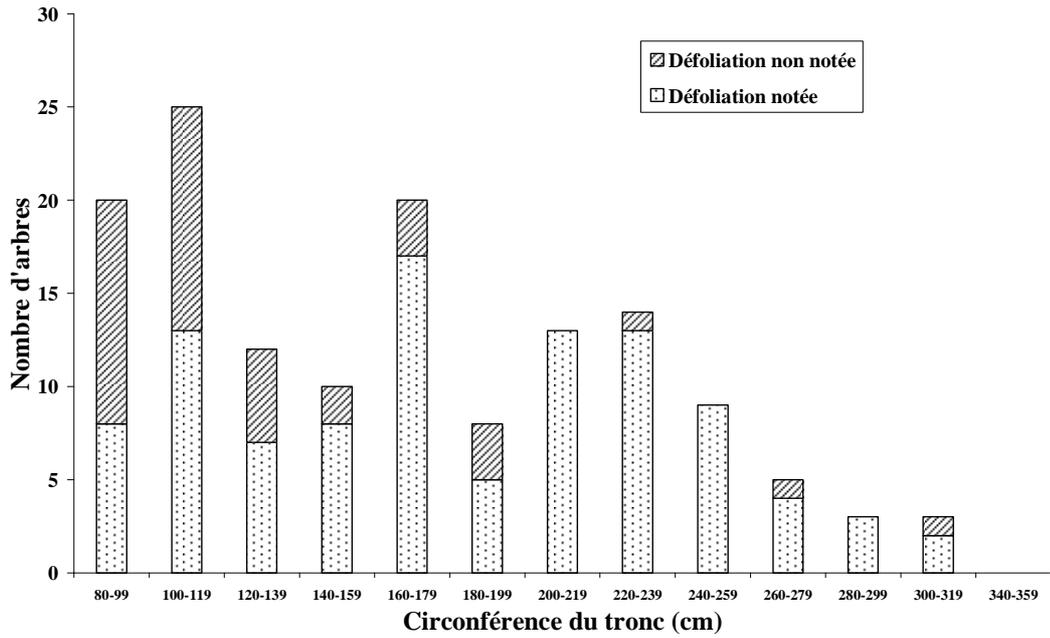


Figure 4. Distribution des arbres selon les classes de circonférences (2010)

142 hêtres ont été observés ; la défoliation a été notée pour 102 d'entre eux.

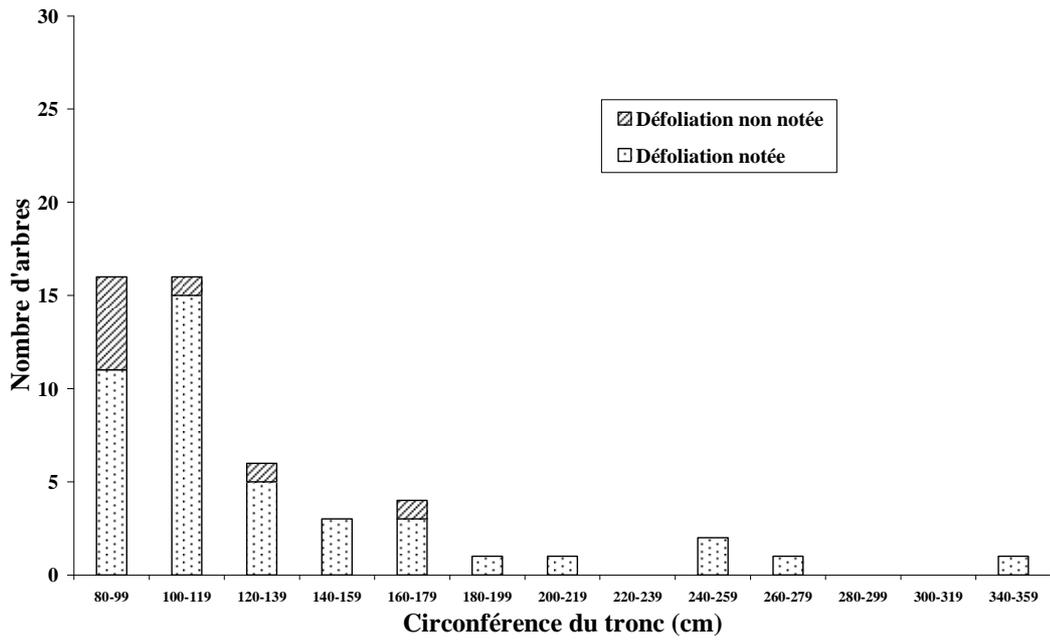


Figure 5. Distribution des arbres selon les classes de circonférences (2010)

51 chênes indigènes ont été observés ; la défoliation a été notée pour 44 d'entre eux.

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 6). Seuls 2% des hêtres croissent sans contraintes. Les chênes suivent les mêmes proportions.

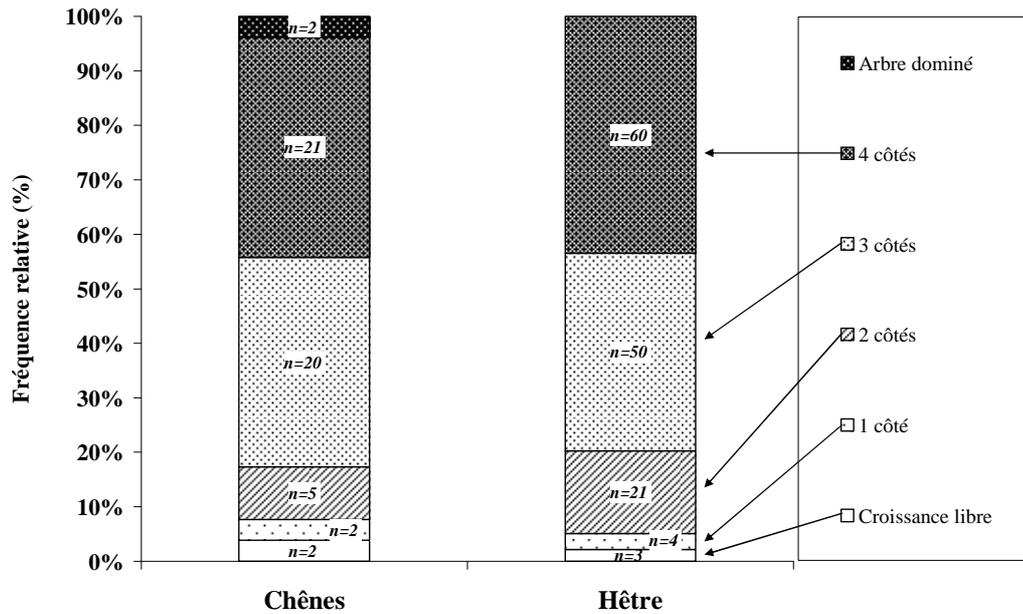


Figure 6. Distribution des arbres observés selon le degré de concurrence (2010)

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. Connaître le statut social permet de mieux interpréter l'état de la couronne d'un arbre. Quatre classes sont définies (Eichhorn *et al.*, 2010) :

- i. Dominant : arbres dont les couronnes dépassent le niveau moyen de la canopée, ou arbre en croissance libre
- ii. Codominant : arbres dont les couronnes s'insèrent dans le niveau moyen de la canopée
- iii. Sous-dominant : arbres dont les couronnes, bien qu'insérées dans la canopée, sont légèrement en-dessous de la hauteur moyenne
- iv. Dominé⁴ : arbres largement dépassés par leurs voisins et ne recevant aucune lumière directe.

La Figure 7 montre qu'en 2010 une majorité des arbres sont dominants ou codominants. Près d'un tiers des hêtres observés est dominant ; la moitié est codominante. Près de 15% des chênes observés sont dominants ; les deux-tiers sont codominants. En 2009, c'était trois quarts des hêtres observés qui étaient dominants, et près de 20% qui étaient codominants. Cela s'explique probablement par le fait que l'échantillon d'arbres observé en 2010 diffère de celui observé en 2009. On peut aussi supposer qu'avec l'expérience qu'ils ont acquise, les observateurs distinguent mieux les classes sociales décrites par l'*ICP Forests*. Par ailleurs, si on rassemble les deux premières classes sociales en une même catégorie « dominant », et les deux dernières classes sociales en une même catégorie « dominé », les proportions approximatives de 80%/20% sont observées tant en 2009 qu'en 2010.

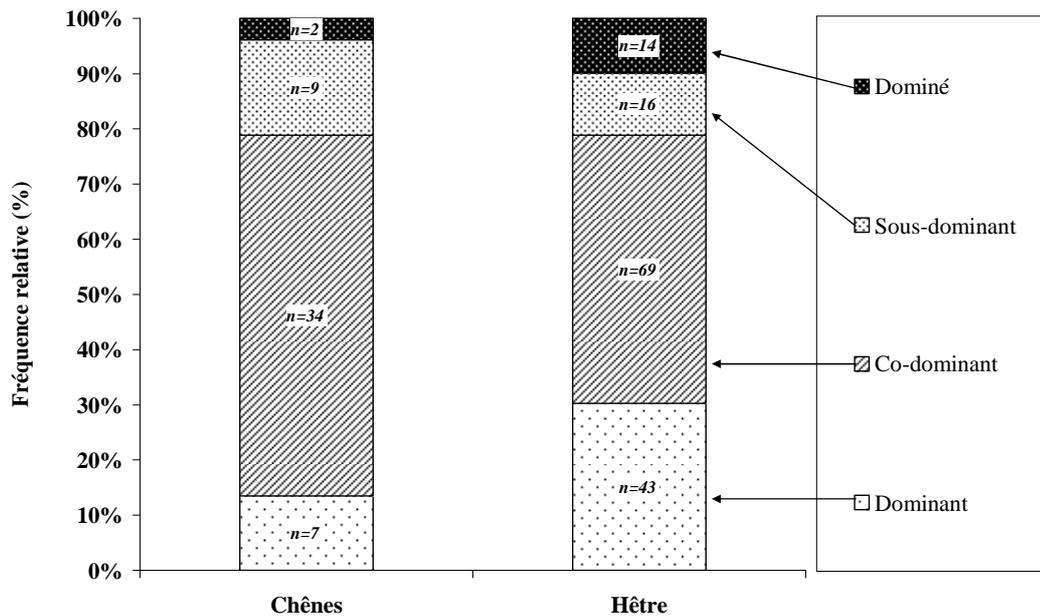


Figure 7. Distribution des arbres observés selon le statut social (2010)

⁴ Les arbres dominés sont néanmoins retenus dans les analyses.

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 mais à contre-jour,
- iv. couronne masquée, c'est-à-dire cachée par les couronnes voisines.

Les arbres parfaitement visibles ne constituent qu'un quart de l'échantillon de hêtre, et un dixième de l'échantillon de chênes (Figure 8). Près de 40% des hêtres sont classés en masqués, la plupart ayant une circonférence comprise entre 90 et 190 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. La concurrence a donc un lien direct avec la visibilité.

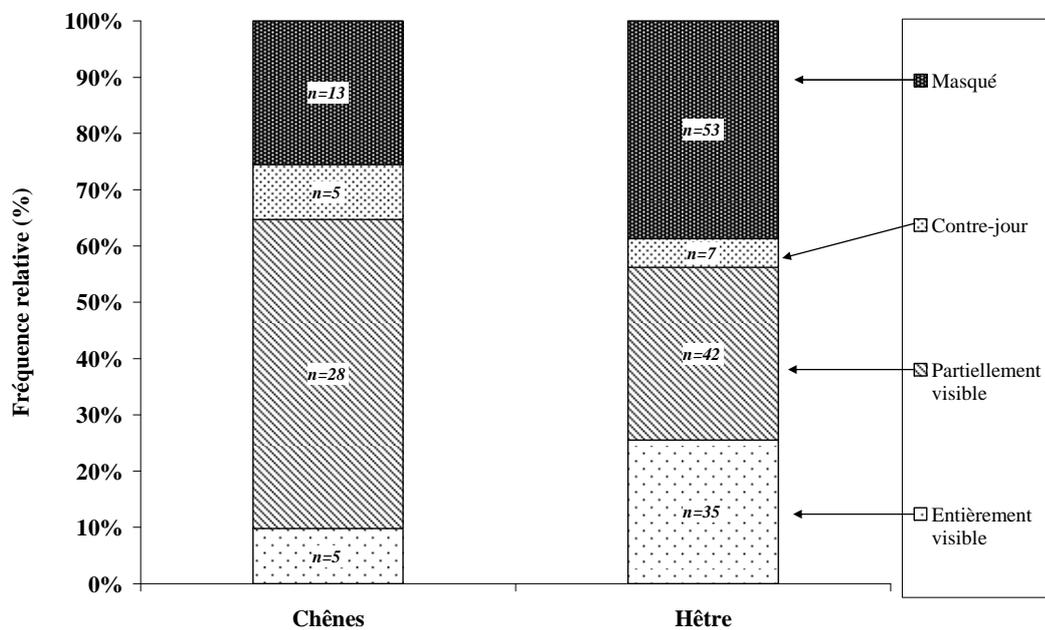


Figure 8. Distribution des arbres observés selon le degré de visibilité (2010)

1.2.4. Encodage et traitement des données

L'ensemble des données recueillies au cours de la campagne 2010 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.

1.2.5. Contrôle-qualité

Des contrôles au niveau régional 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 terrain. Ces deux points ont été réalisés pour la forêt de Soignes bruxelloise.

Les adjoints forestiers de BE – IBGE chargés du suivi sanitaire ont été formés au protocole européen *ICP Forests* lors d'une formation théorique et pratique dispensée le 22 juin 2010. Durant cette formation, la méthode de Kremer (2010) pour distinguer les chênes sessiles des chênes pédonculés sur base de la morphologie des feuilles, a été présentée. Pour compléter cette formation, un photo-guide, un manuel et divers documents de travail ont été distribués aux adjoints. En outre, le protocole européen prévoit qu'au moins 5% des arbres échantillonnés soient analysés une première fois par les observateurs (ici, BE – IBGE), une deuxième fois 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). Dans le cas présent, 5 placettes en hêtraie et 3 placettes en chênaie ont été contrôlées, pour un total de 73 arbres revisités par l'UCL sur les 203 observés en 2010 (soit 36 %). Mais parmi ce lot, le nombre d'arbres observés à la fois par l'UCL et par BE – IBGE tombe à 47 (soit 23%). Les adjoints forestiers n'ont en effet pas observé certains arbres dont les couronnes étaient trop peu visibles (voir ci-dessous).

À l'issue de la campagne 2010, il s'avère que 65% des évaluations de la défoliation effectuées par les adjoints forestiers et contrôlées par l'UCL concordent à 10% près (Figure 9), ce qui est légèrement inférieur à l'objectif. La défoliation des chênes estimée par BE-IBGE est sous-estimée de près de 8%. Quant aux hêtres, la variabilité des défoliations estimées par BE-IBGE est répartie équitablement autour de la droite de correspondance parfaite. Les défoliations des chênes estimées par l'UCL s'étalent entre 5 et 35%, alors que les défoliations estimées par BE-IBGE s'étalent entre 5 et 25%. Les défoliations des hêtres estimées par l'UCL s'étalent entre 5 et 75%, alors que les défoliations estimées par BE-IBGE s'étalent entre 25 et 55%. Cela laisse supposer que les adjoints forestiers ont tendance à restreindre la gamme de variabilité de leurs estimations autour de la moyenne. À l'issue de ce constat, une journée de mise au point à l'attention des adjoints a eu lieu le 13 septembre 2010.

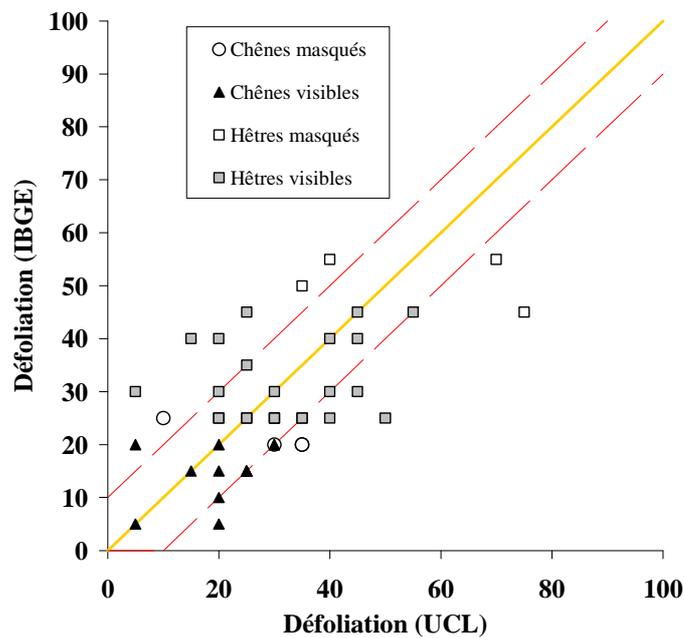


Figure 9. Comparaison des estimations de la défoliation sur les placettes contrôlées (47 arbres).
Les pointillés représentent un intervalle de 10% par rapport à la droite 1:1 (correspondance parfaite).

1.3. Résultats

Étant donné leur importance, les chiffres concernant la défoliation sont présentés en premier. Viennent ensuite les facteurs expliquant la défoliation. 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.

1.3.1. 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'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. La défoliation est un critère intégrateur qui reflète l'influence, entre autres, du climat, des conditions stationnelles (sol, historique du site, etc.), d'autres facteurs naturels (champignons, insectes) ou propres à l'arbre (âge, phénologie), ainsi que des facteurs anthropiques (coupes, etc.) (Johnson et Jacob, 2010). En ce sens, il donne une idée globale de la santé de l'arbre.

Défoliation moyenne par essence

La Figure 10 présente la défoliation moyenne par essence en 2010, calculée sur l'ensemble des arbres, peu importe la visibilité. La défoliation est de 27% pour le hêtre et de 29% pour les chênes.

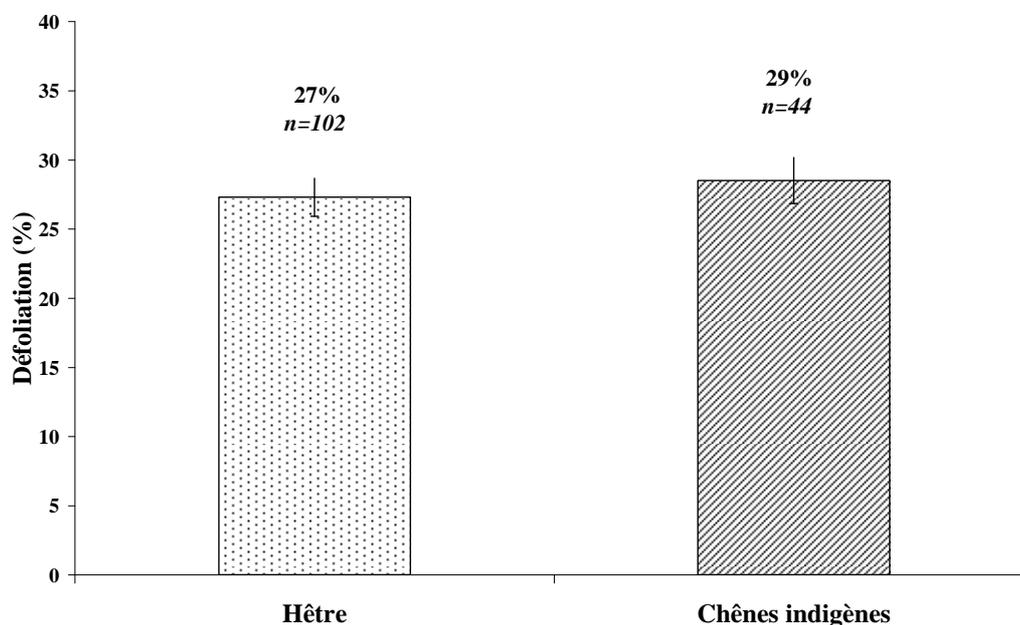


Figure 10. Défoliation moyenne par essence, 2010 (arbres masqués inclus)

Soixante-six arbres ont été classés en « masqués » en 2010. La défoliation a été notée pour 25 de ces arbres (17 hêtres, soit 17% de l'effectif des hêtres, et 8 chênes, soit 18% de l'effectif des chênes). En écartant ces arbres de l'échantillon, la défoliation passe à 29% pour le hêtre (augmentation de 2%) et 27% pour les chênes (diminution de 2%) (Figure 11). Par rapport aux chênes visibles, les chênes masqués ont une défoliation de 9% plus élevée (Tableau 2). Par rapport

aux hêtres visibles, les hêtres masqués ont une défoliation 8% moins élevée. La prise en compte des arbres masqués n'est donc pas négligeable dans le calcul de la défoliation moyenne.

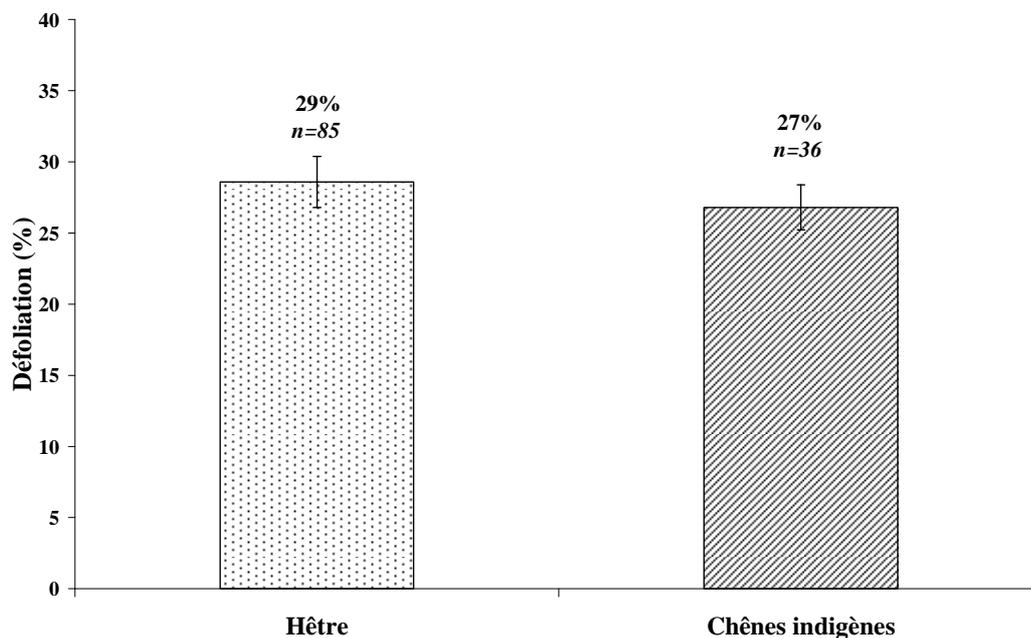


Figure 11. Défoliation moyenne par essence, 2010 (arbres masqués exclus)

Tableau 2. Moyennes de la défoliation et de la circonférence des arbres visibles et masqués (2010). Les écarts-types sont entre parenthèses.

		Moyenne de la défoliation		Circonférence à 1,5m de hauteur	
Hêtre	masqués	21	(8)	147	(53)
	visibles	29	(14)	180	(63)
	Total hêtre	27	(14)	168	(62)
Chênes	masqués	36	(9)	102	(18)
	visibles	27	(11)	137	(60)
	Total chênes	29	(11)	129	(55)

La défoliation chez le hêtre et les chênes suit une distribution de type log-normale étirée vers la droite (Figure 12). Un peu plus de 60% des hêtres et des chênes ont une défoliation supérieure ou égale à 25%. Aucun chêne ne présente une défoliation inférieure à 10%.

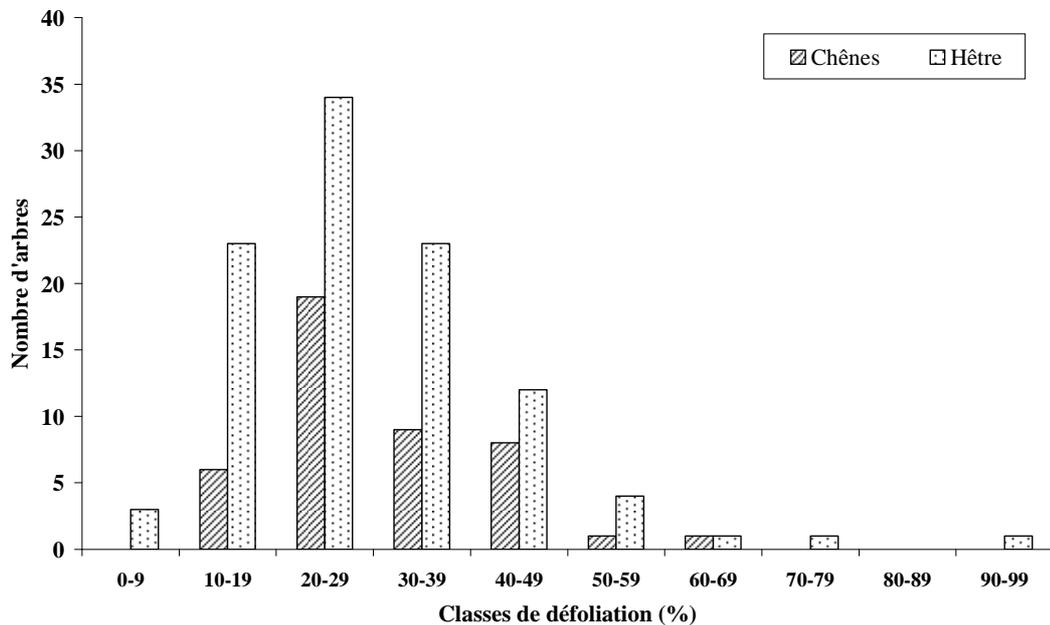


Figure 12. Distribution des arbres notés selon les classes de défoliation, 2010 (arbres masqués inclus)

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 purement indicatif et n'autorisent pas des conclusions définitives.

Entre 1991 et 2009, 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. De manière générale, la défoliation croît en Europe, toutes espèces confondues (Fischer *et al.*, 2010) (Figure 13). La Figure 14 retrace l'évolution de la défoliation du hêtre et des chênes pédonculé et sessile sur l'ancien réseau I de Wallonie. La Figure 15 montre l'évolution de la défoliation du hêtre sur le réseau II de Wallonie. Les figures suivantes présentent l'évolution de la défoliation du hêtre sur trois placettes de la forêt de Soignes flamande. Le Tableau 3 compare les défoliations moyennes de différentes essences pour l'Europe et des deux régions de Belgique.

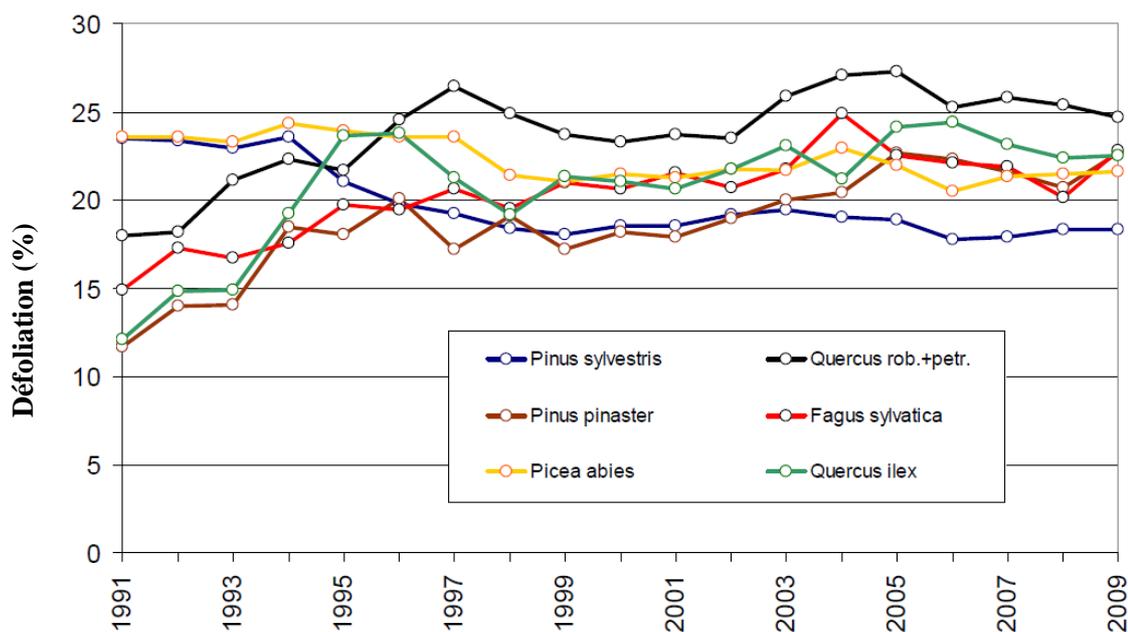


Figure 13. Évolution de la défoliation (pins, hêtre, chênes indigènes, épicéa) sur le réseau de niveau I sur l'ensemble de l'Europe, entre 1991 et 2009 (Fischer *et al.*, 2010)

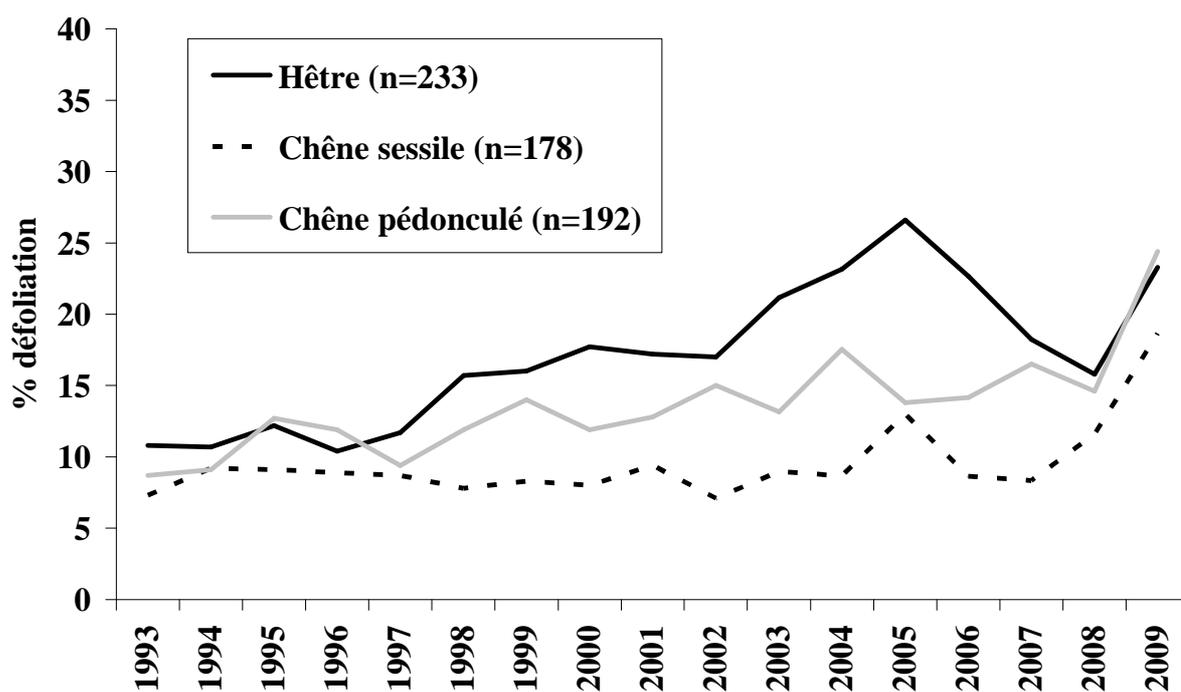


Figure 14. Évolution de la défoliation (hêtre, chênes indigènes, épicéa) sur l'ancien réseau de niveau I de Wallonie, entre 1993 et 2009 (C. Laurent, SPW, communication personnelle, 2010)

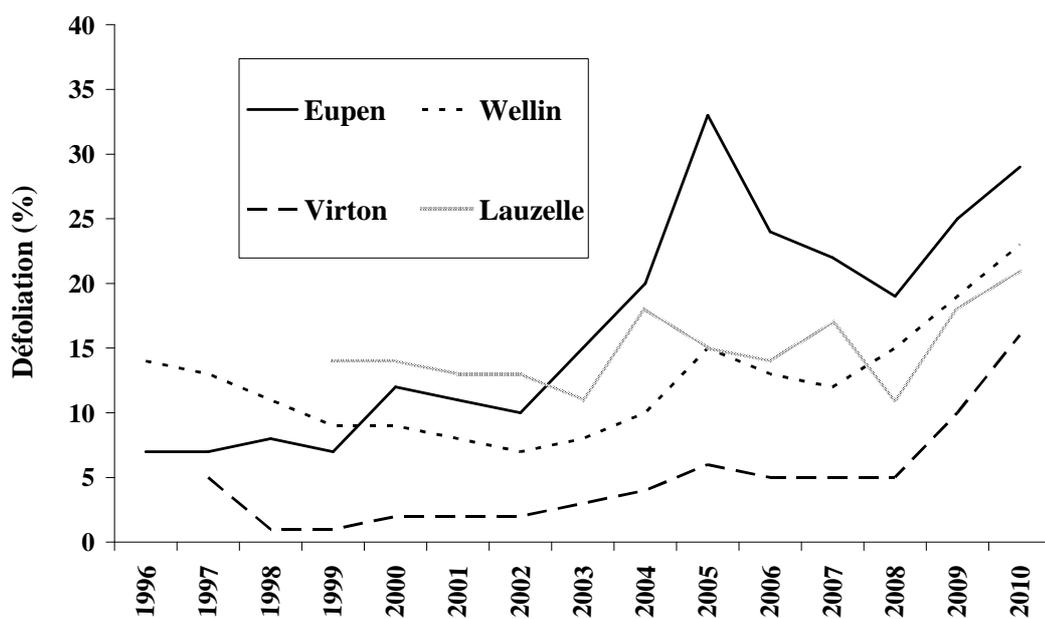


Figure 15. Évolution de la défoliation (hêtre) sur le réseau II de Wallonie, entre 1996 et 2010 (n=52 pour chaque placette)

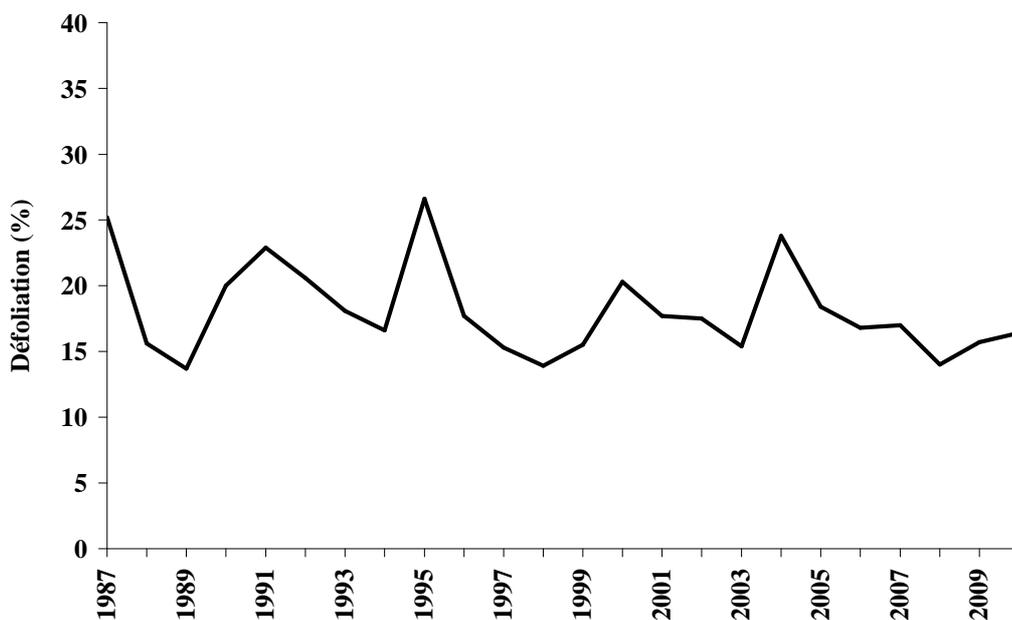


Figure 16. Évolution de la défoliation (hêtre) sur le réseau I en Flandre, entre 1987 et 2010 (G. Sioen, communication personnelle, 2010)

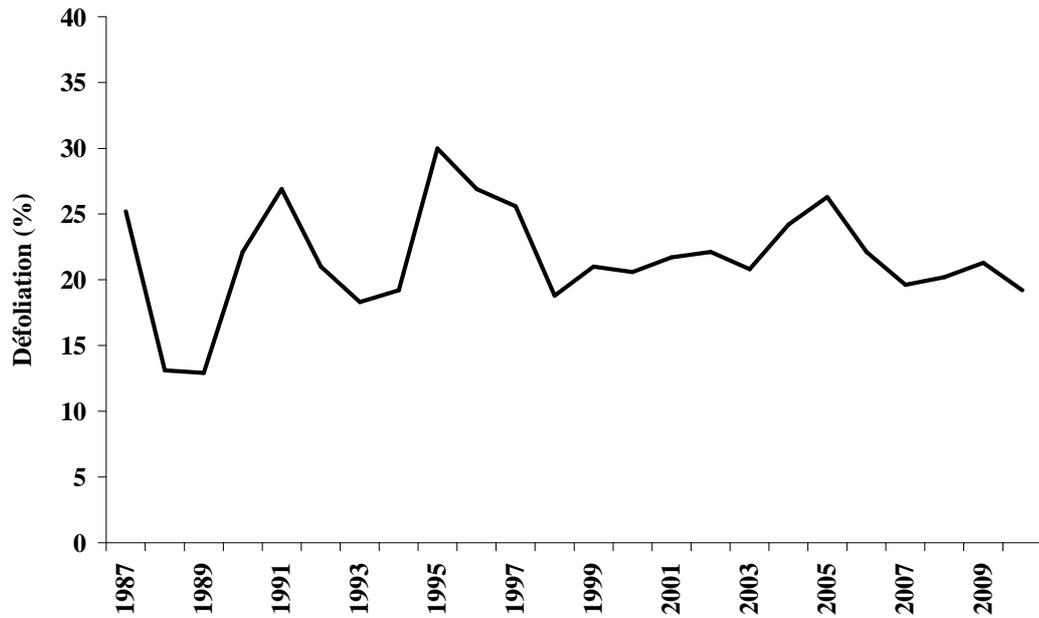


Figure 17. Évolution de la défoliation (hêtre) sur la placette de Tervuren (forêt de Soignes flamande), entre 1987 et 2010 (G. Sioen, communication personnelle, 2010)



Figure 18. Évolution de la défoliation (hêtre) sur la placette de Hoelaart (forêt de Soignes flamande), entre 1995 et 2010 (G. Sioen, communication personnelle, 2010)

Tableau 3. Comparaison des défoliations moyennes observées en Europe (2009) et en Belgique (2009, 2010) (réseau ICP Forests)

	<i>Europe (30 pays)</i>	<i>Allemagne</i>	<i>Flandre</i>	<i>Wallonie (ancien rés. I)</i>	<i>Wallonie (nouveau rés. I)</i>	<i>Wallonie (réseau II)</i>
Année	2009	2009	2009	2009	2010	2010
Hêtre	19,4%	27%	15,7%	23,3%	39%	23,1%
Chênes	23,7%	26,5%	21,7% (CP)	24,4% (CP) 18,7% (CS)	42% (CP) 33% (CS)	19,2% (CS)
Source	Fischer <i>et al</i> (2010)	Fischer <i>et al</i> (2010)	Fischer <i>et al</i> (2010)	C. Laurent (SPW)	UCL	UCL

Évolution de la défoliation moyenne entre 2009 et 2010

Entre 2009 et 2010, la défoliation moyenne globale a baissé de 10% pour le hêtre et de 1% pour les chênes (Figures 3 et 4). Cette variation n'est pas seulement imputable à l'évolution naturelle : en effet, en 2009, 34 placettes ont été visitées et 223 arbres analysés. En 2010, 22 placettes parmi ces 34 ont été visitées et 193 arbres analysés (§ 1.2.1). L'échantillon de 2010 n'est donc pas identique à celui de 2009.

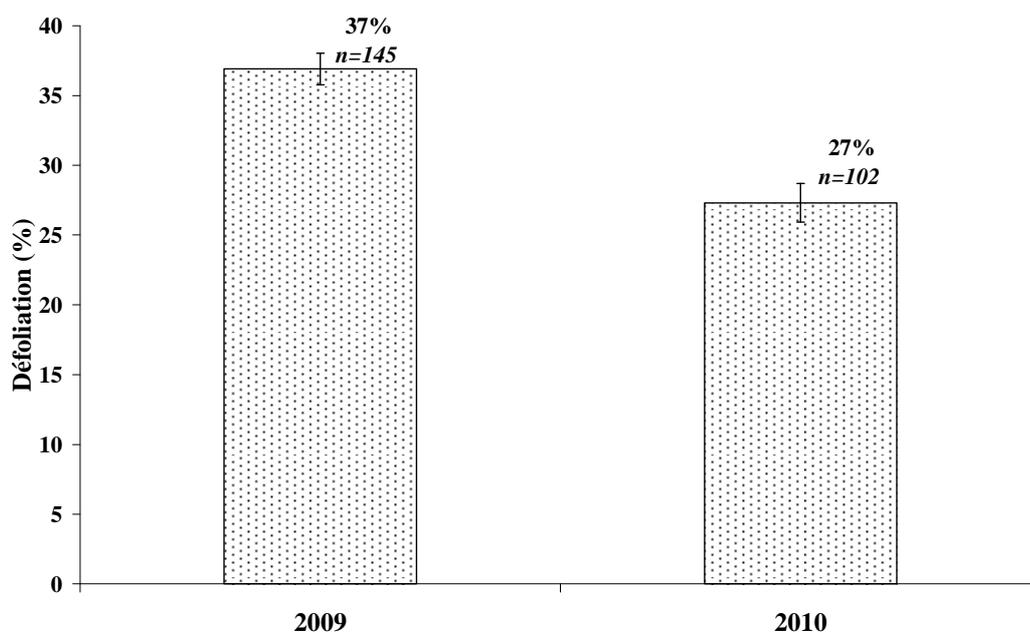


Figure 19. Défoliation moyenne en 2009 et en 2010 pour le hêtre (totalité des arbres notés chaque année)

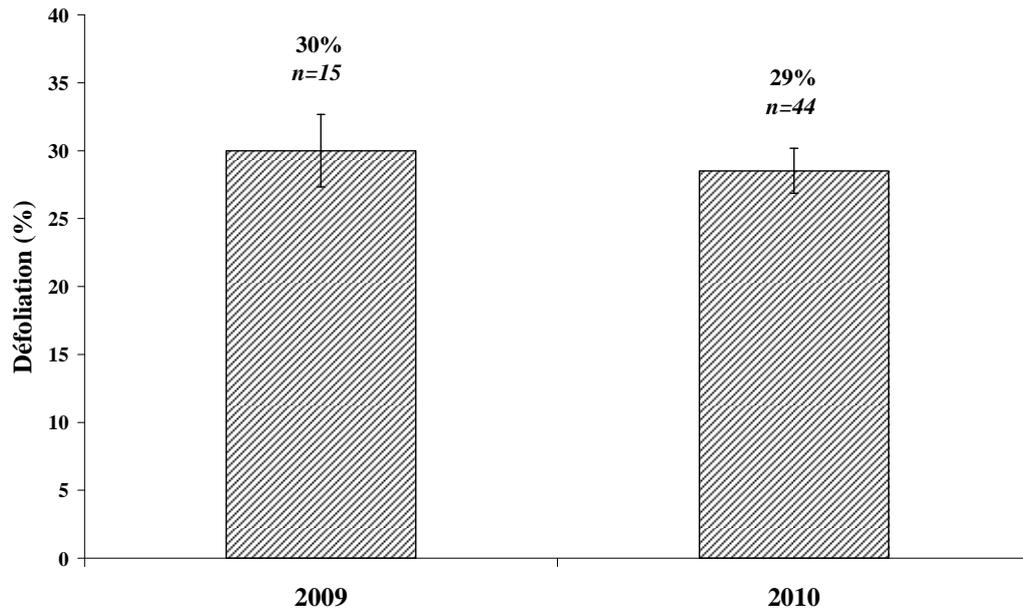


Figure 20. Défoliation moyenne en 2009 et en 2010 pour le chêne (totalité des arbres notés chaque année)

Pour évaluer l'évolution d'une année à l'autre, il faut comparer les 87 arbres notés à la fois en 2009 et en 2010. En moyenne, entre 2009 et 2010, la défoliation de chaque hêtre a diminué de 7,3%, et la défoliation de chaque chêne a diminué de 5% (Figure 21 et Figure 22). La Figure 23 montre que, pris individuellement, les arbres notés en 2009 et en 2010 présentent majoritairement une baisse de la défoliation. Cette évolution peut être attribuée à différents facteurs :

- le rabotage des cimes⁵,
- des conditions de croissance plus favorables,
- une moindre fructification en 2010 (§ 1.3.2).

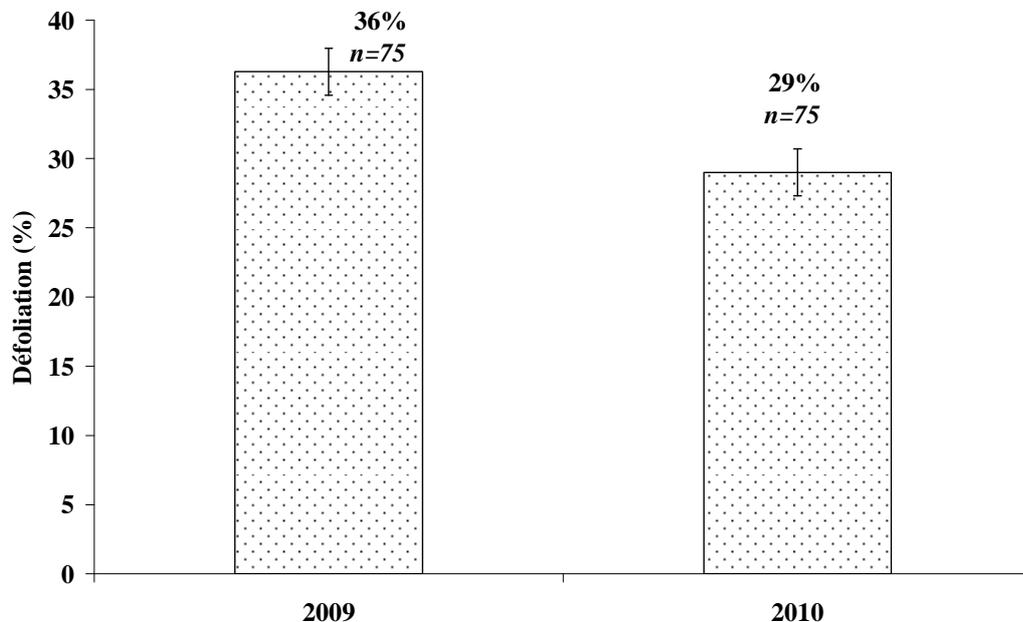


Figure 21. Défoliation moyenne en 2009 et 2010 pour le hêtre (arbres notés en 2009 et 2010)

⁵ 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.

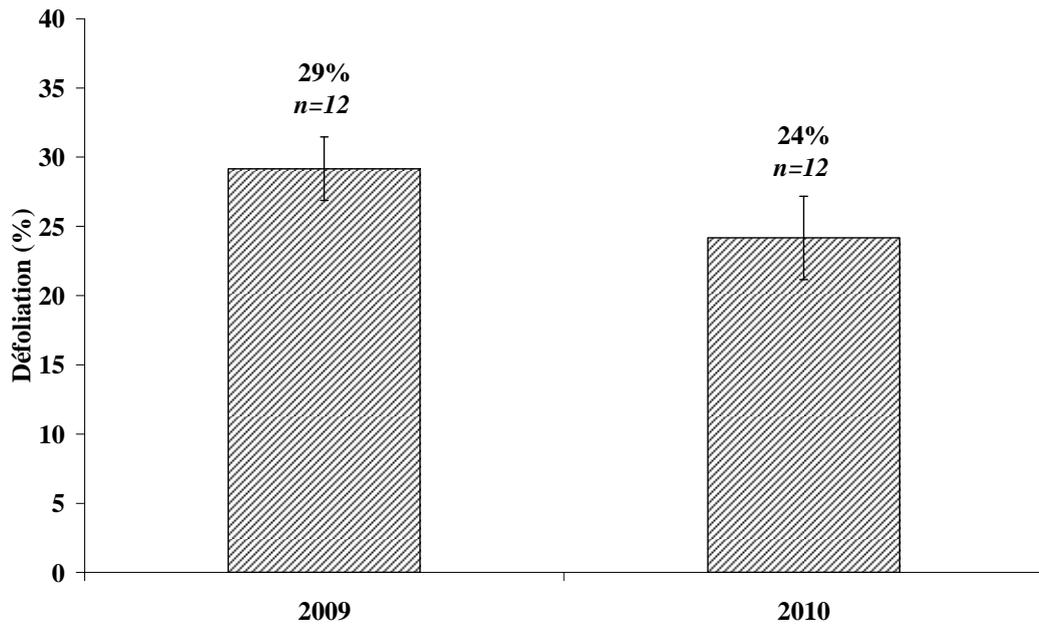


Figure 22. Défoliation moyenne en 2009 et 2010 pour le chêne (arbres notés en 2009 et 2010)

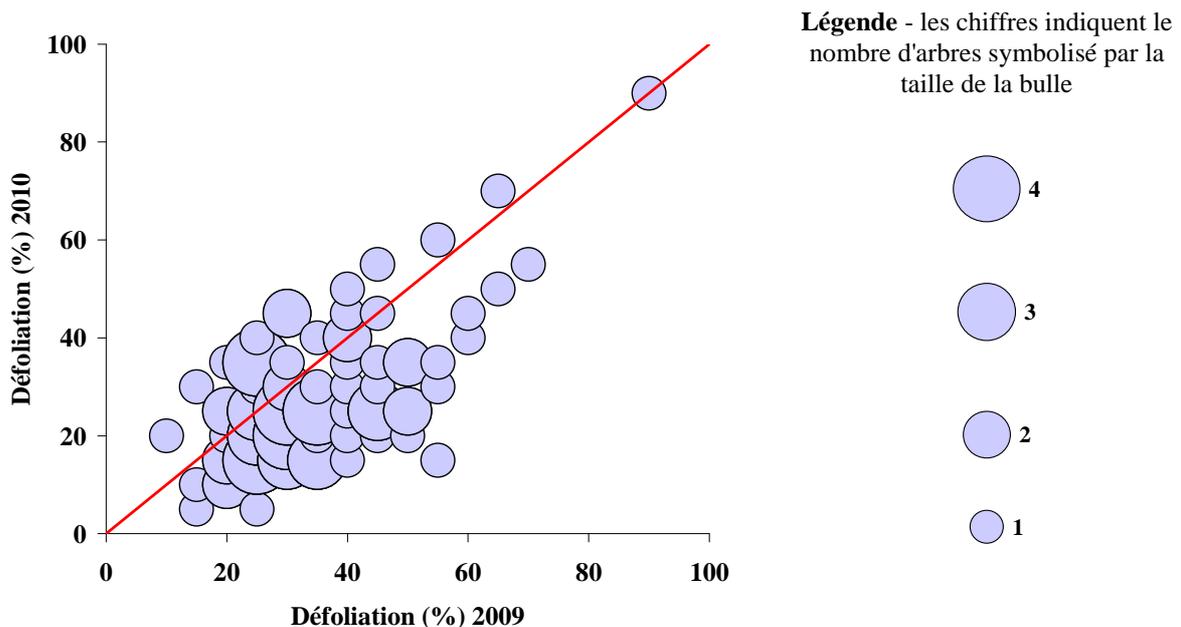


Figure 23. Comparaison des défoliations entre 2009 et 2010.

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

La Figure 24 et la Figure 25 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. Cependant, les hêtres restent globalement dans la

fourchette d'un niveau sanitaire intermédiaire. En 2009 comme en 2010, les chênes présentent un état de santé intermédiaire.

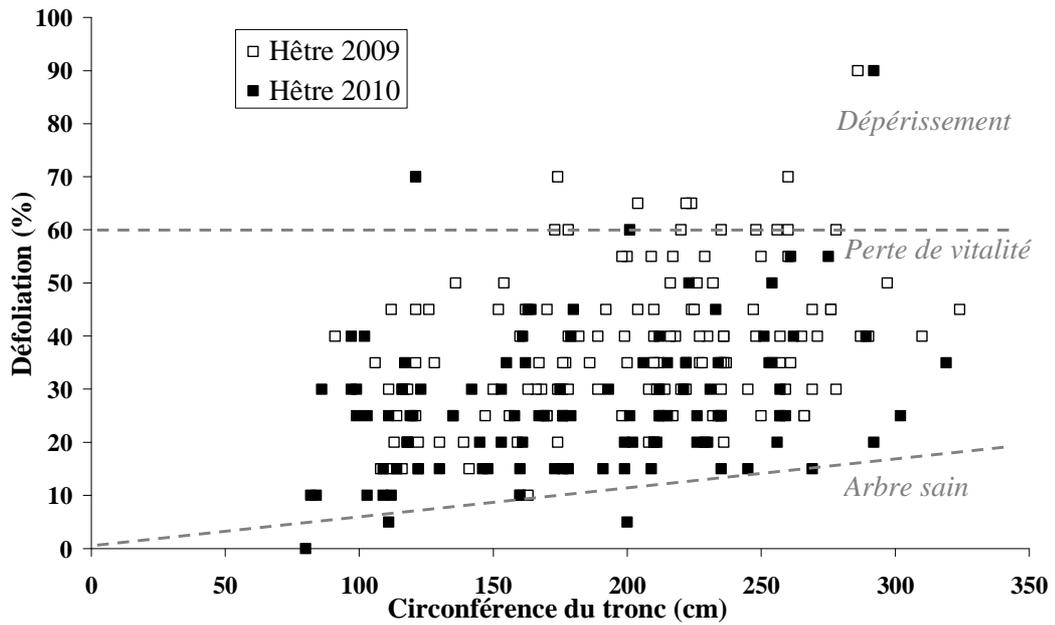


Figure 24. Défoliation en fonction de la circonférence du tronc (hêtre)

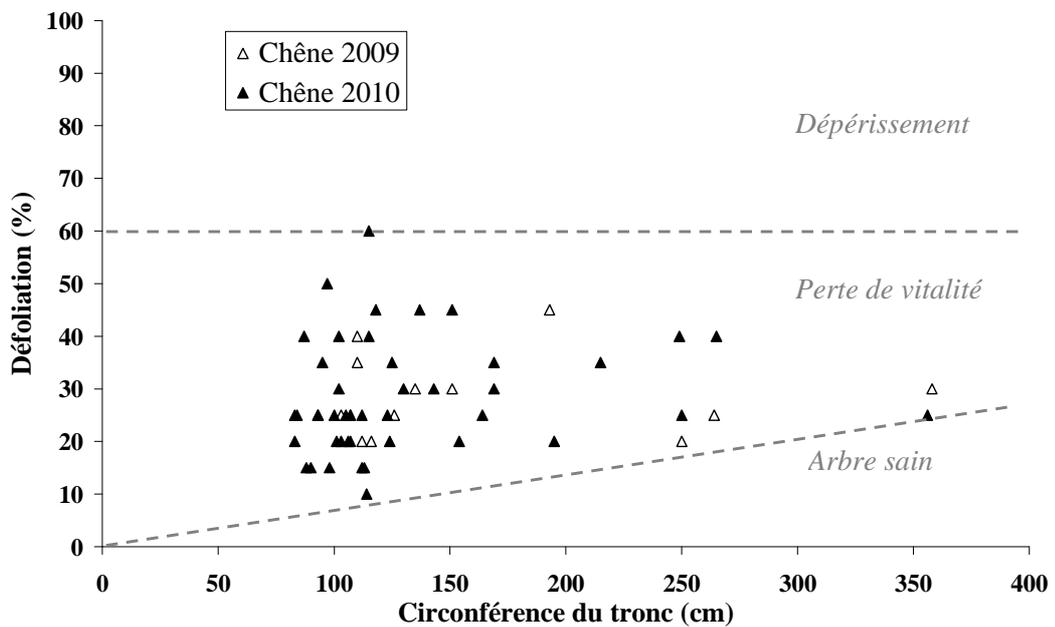


Figure 25. Défoliation en fonction de la circonférence du tronc (chênes)

1.3.2. Autres variables relatives à l'état sanitaire

Fructification

La fructification est le processus biologique de développement des fruits. Elle est contrôlée par de nombreux facteurs (photopériode, humidité, température, pollinisation, etc.). Le protocole standardisé prévoit d'estimer le volume de fruits dans la partie supérieure de la couronne. La fructification était abondante en 2009, tant pour le hêtre que pour les chênes (Braem *et al.*, 2010). On note une diminution de la fructification en 2010, particulièrement sur le hêtre, où la proportion d'arbres portant un volume élevé de fânes passe de 70% à moins de 7% (Figure 27 et Figure 28).

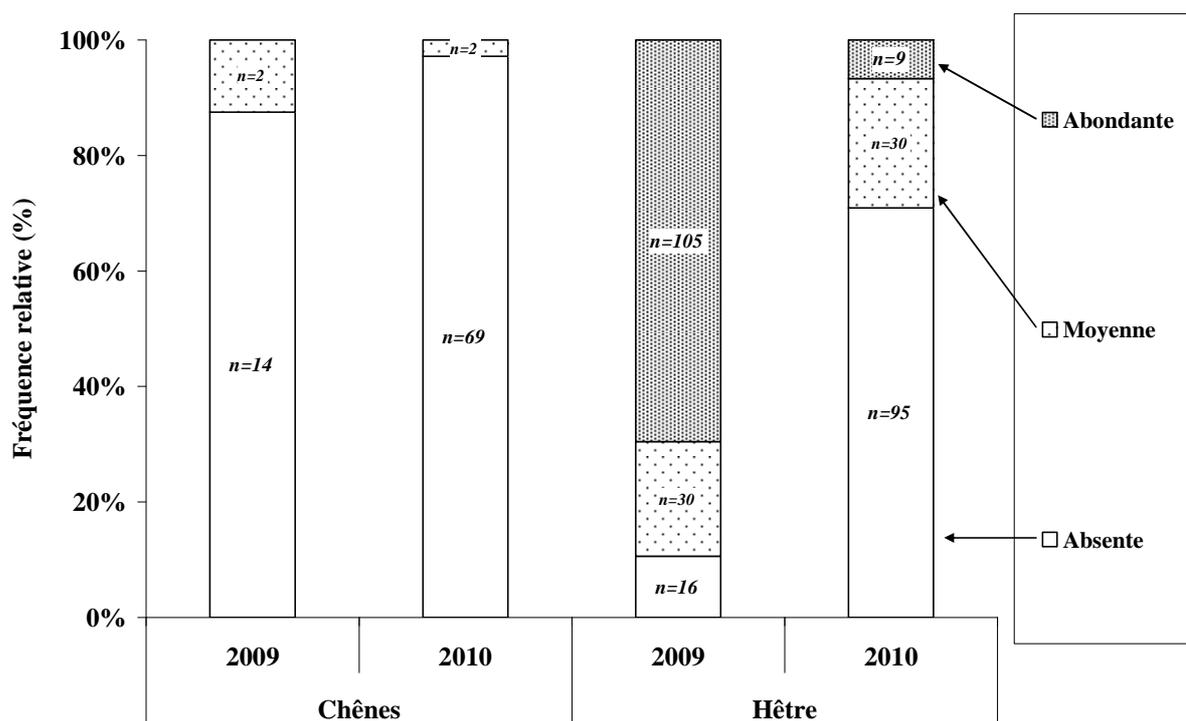


Figure 26. Distribution des arbres observés selon les niveaux de fructification et l'essence (2009 et 2010, pour chaque essence)

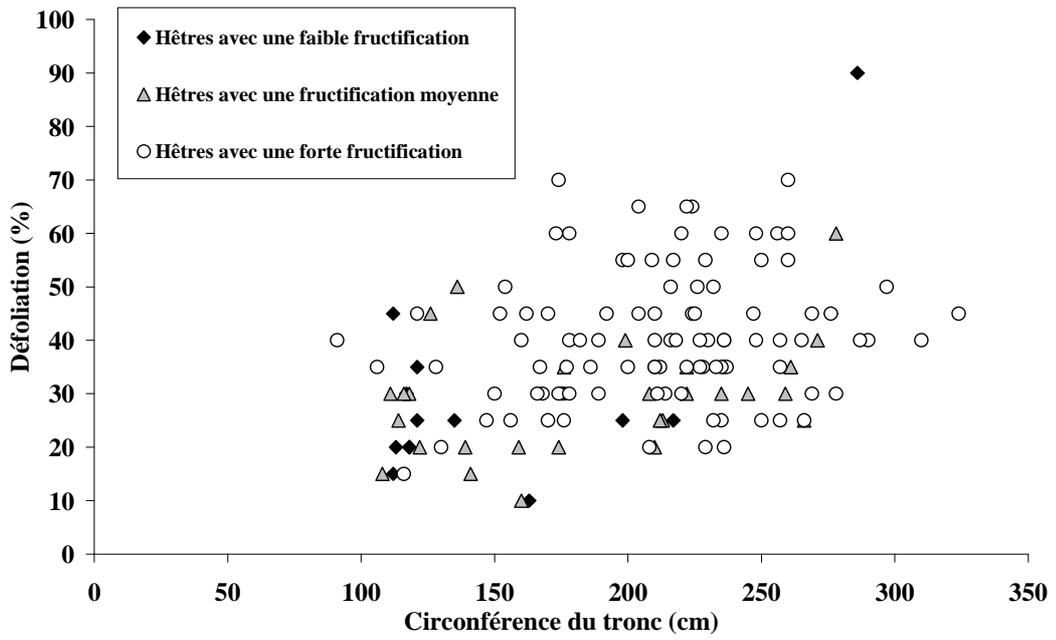


Figure 27. Distribution des hêtres selon la circonférence du tronc et le niveau de fructification (2009)

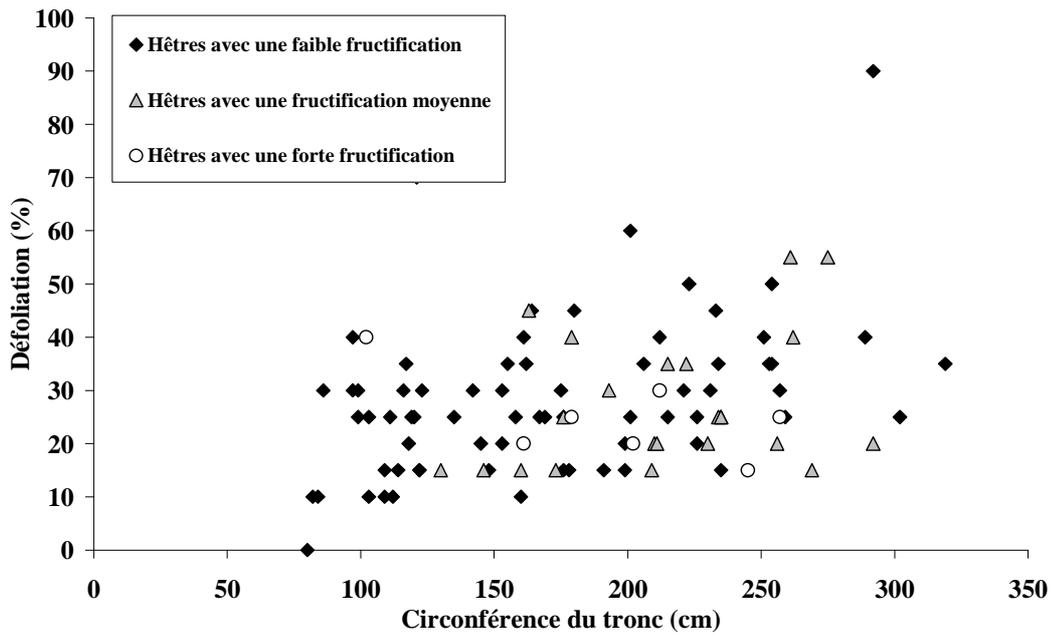


Figure 28. Distribution des hêtres selon la circonférence du tronc et le niveau de fructification (2010)

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 plupart des arbres analysés (chênes et hêtre confondus) ne présentent pas de décoloration (« décoloration inexistante », Figure 29). Pour le hêtre, les arbres avec une décoloration visible sont de l'ordre de 9%. Pour les chênes, la proportion monte à 25%.

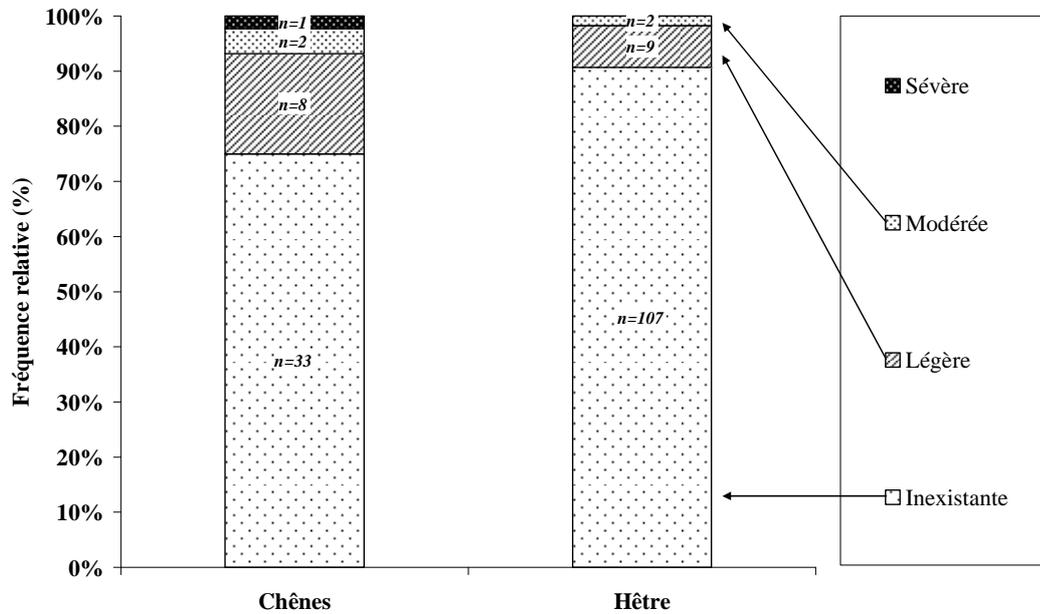


Figure 29. Distribution des arbres observés selon les classes de décoloration (2010)

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 30 et la Figure 31 proposent des illustrations et les codes associés pour les hêtres et les chênes.

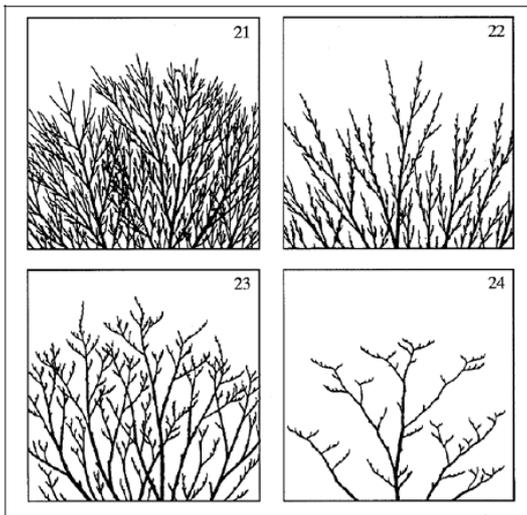


Figure 30. Les quatre stades du hêtre, avec leurs codes (Eichhorn *et al.*, 2006)

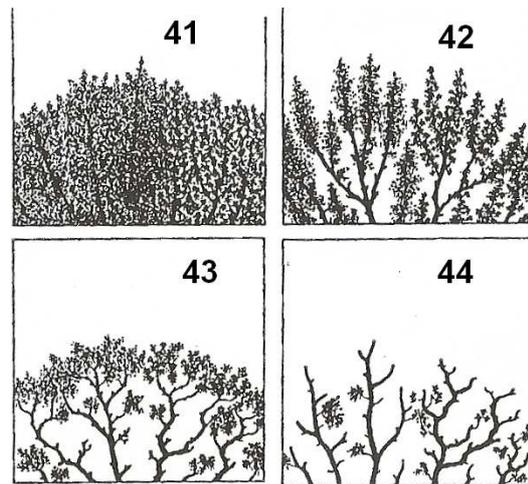


Figure 31. Les quatre stades des chênes, avec leurs codes (Eichhorn *et al.*, 2006)

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

Plus des deux tiers des hêtres analysés présentent en 2010 une simplification plus ou moins importante de la couronne (Figure 32). Cependant, les hêtres déclinants sont rares (5%). Plus de 90% des chênes analysés présentent en 2010 une simplification plus ou moins importante de la couronne. Aucun chêne déclinant n'est observé.

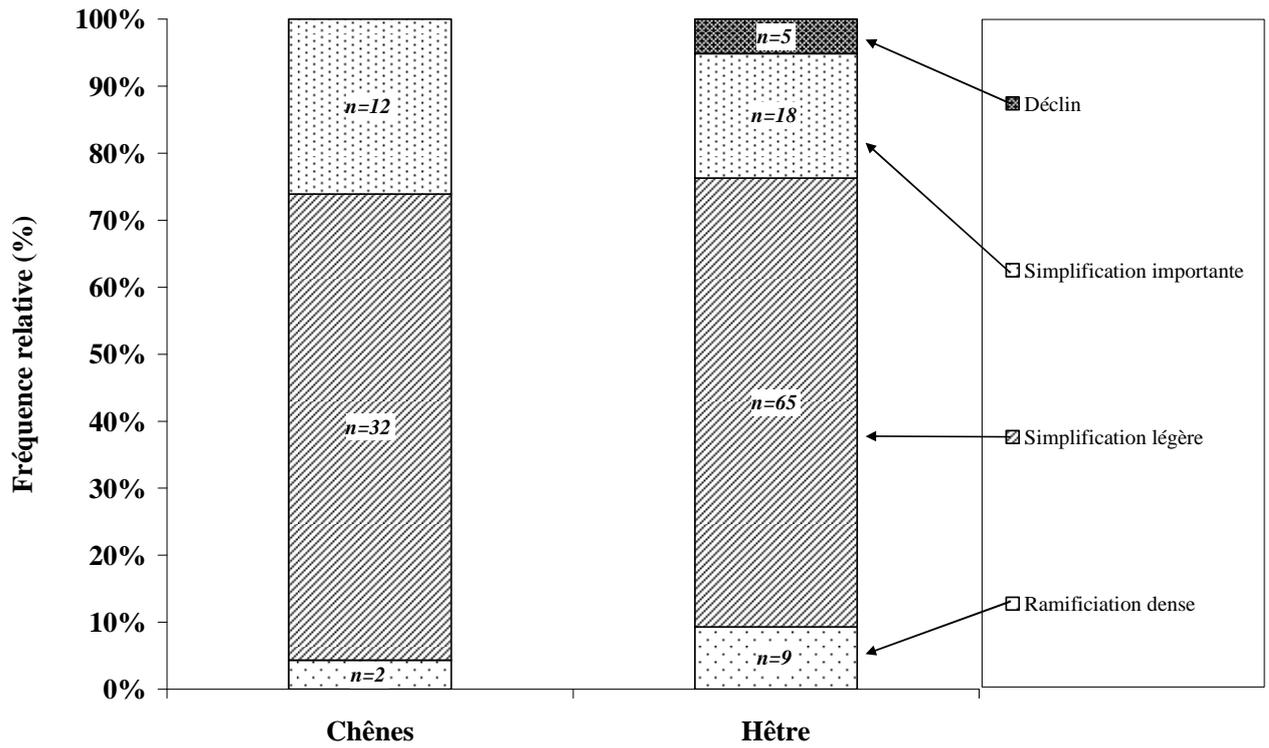


Figure 32. Distribution des arbres observés selon les structures de la couronne (2010)

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 donc révèle la capacité régénérative de l'arbre. Un peu plus d'un quart des hêtres et 60% des chênes portent des gourmands (Figure 33). Les chênes, de tempérament héliophile, produisent plus fréquemment des gourmands que les hêtres, plus sciaphiles.

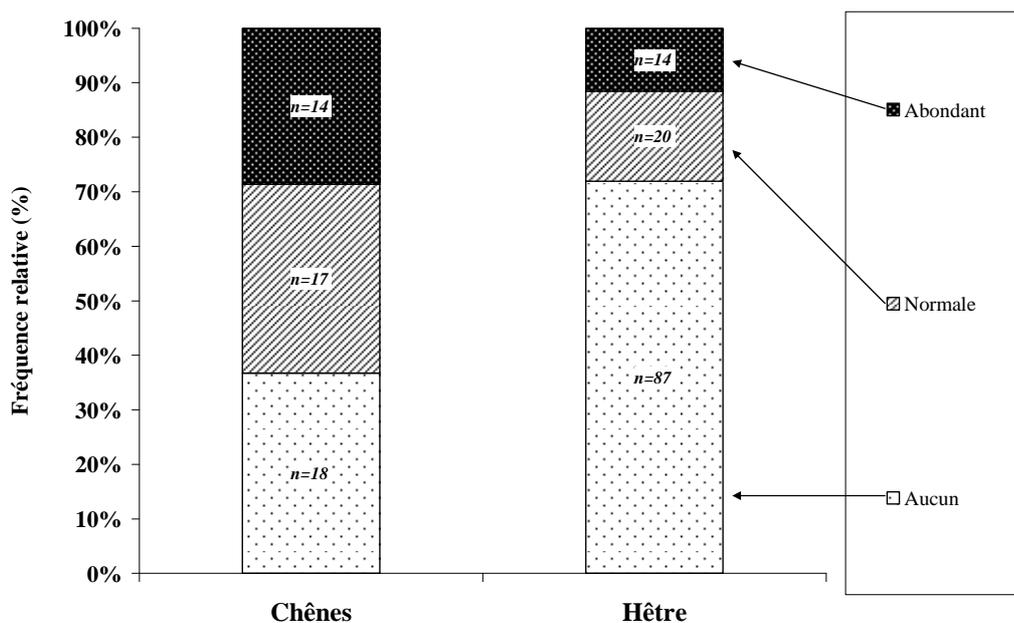


Figure 33. Distribution des arbres observés selon le volume de pousses épïcormiques (2010)

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

L'effet de certaines variables sur la défoliation a été évaluée 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 indiquées par 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, un effet significatif des classes de circonférence du tronc sur la défoliation a pu être mis en évidence ($p=0,0104$) (Figure 34). Pour les chênes au contraire, les données de 2009 comme de 2010 ne permettent pas de conclure ($p=0,7585$). En effet, les effectifs sont trop peu nombreux et trop inégaux entre les classes de circonférence (Figure 35).

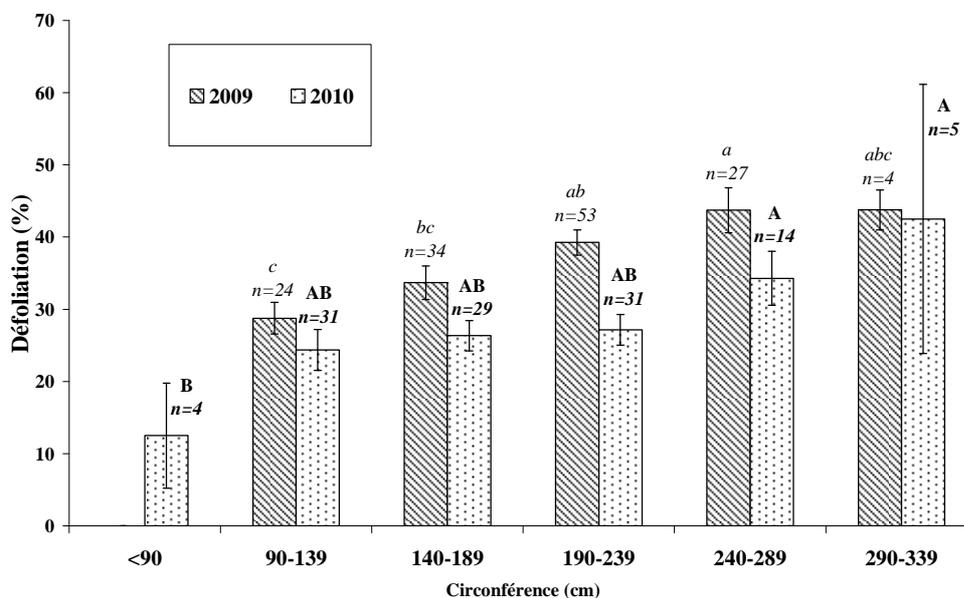


Figure 34. Défoliations moyennes par classes de circonférence (hêtre)

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

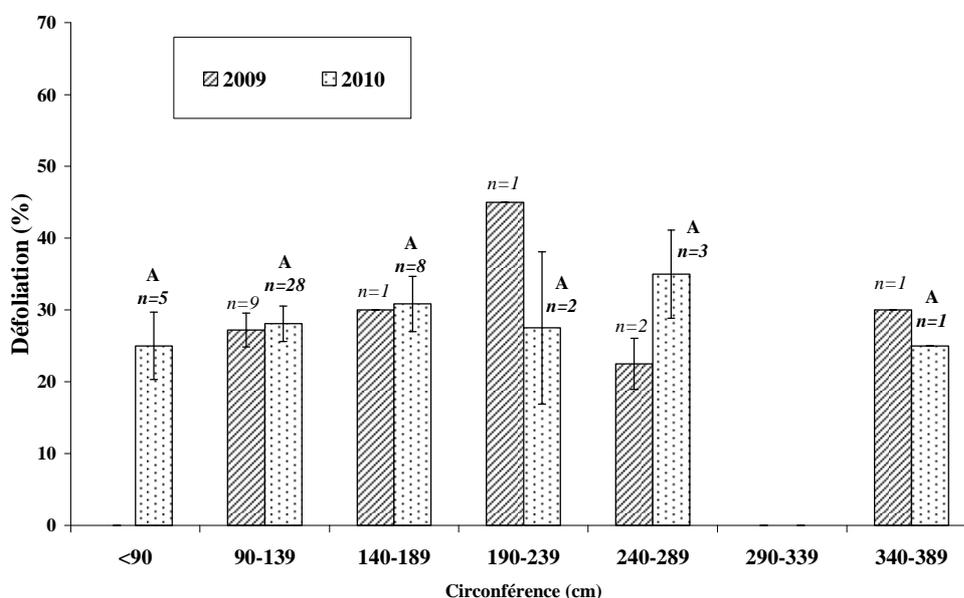


Figure 35. Défoliations moyennes par classes de circonférence (chênes)

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

La relation entre la défoliation et la circonférence du tronc peut également être mise en évidence par régression linéaire. Cette approche présente l'avantage de nécessiter l'estimation de seulement deux paramètres (pente et intercept) qui sont donc ajustés avec une meilleure précision que les nombreux paramètres de l'ANOVA (un pour chacune des sept classes de circonférence, ci-dessus). Pour le hêtre, une relation de type linéaire entre la défoliation et la circonférence peut être établie de manière significative ($p = 0,0007$, Tableau 4 et Figure 36). Le coefficient R^2 indique que l'effet de la circonférence du tronc explique 10% de la variabilité observée au niveau de la défoliation. Le reste de la variabilité dépend d'autres facteurs.

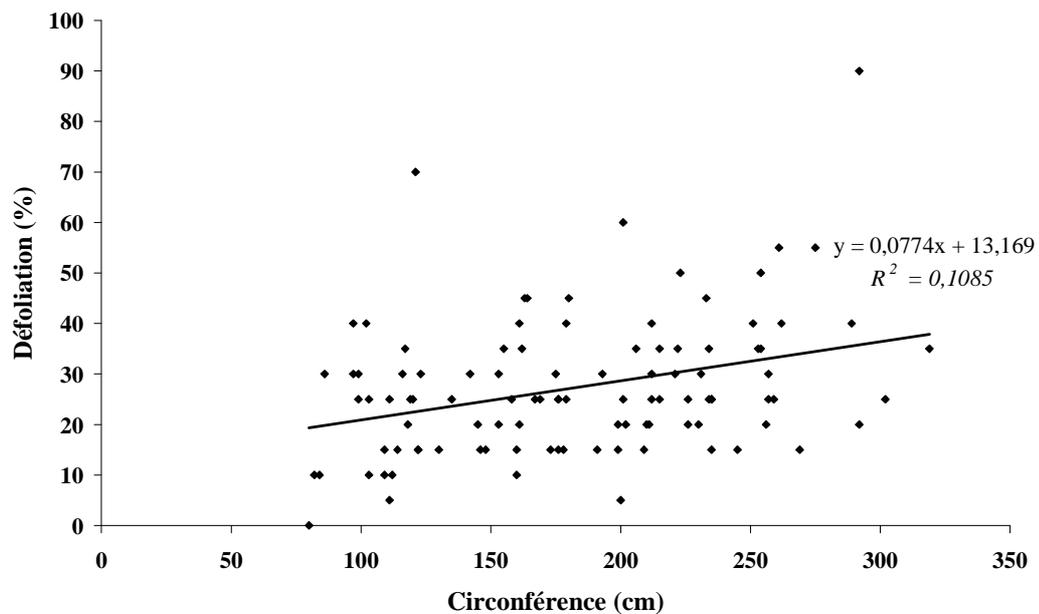


Figure 36. Droite de régression entre la circonférence et la défoliation (hêtre, 2010)

Tableau 4. Paramètres de la droite de régression (hêtre, 2010)

<i>Terme</i>	<i>Estimation</i>	<i>p-valeur</i>
Constante	13,168627	0,0026
Pente	0,0774329	0,0007

Pour les chênes, la régression linéaire ne met pas en évidence une relation entre la défoliation et la circonférence du tronc ($p=0,3353$). De plus, les points sont trop inégalement répartis pour ajuster correctement une droite de régression.

Fructification

La défoliation moyenne en fonction du niveau de fructification ne montre pas de relation ($p = 0,8150$) (Figure 37). Néanmoins, l'effectif des arbres en fructification abondante est trop faible pour tirer des conclusions définitives. En 2009, la défoliation moyenne était de 30% pour une fructification absente ou normale et de 40% pour une fructification abondante. Ces chiffres sont plus fiables que ceux de 2010 dans la mesure où les effectifs étaient plus importants et mieux répartis.

L'évolution de la fructification peut expliquer la baisse de la défoliation observée en 2010 (Figure 37, Figure 28). En effet, une relation entre abondance de fruits et forte défoliation a déjà été observée chez cette espèce (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. En 2009, les hêtres avec peu ou pas de faînes présentaient en moyenne 30% défoliation, tandis que ceux couverts de faînes avaient 40% de défoliation (Braem *et al.*, 2010). En reprenant ces mêmes valeurs de défoliation par niveau de fructification mais avec les proportions de hêtres pour les niveaux de fructification observés en 2010, on obtient une moyenne pondérée de 30,45%. En comparant ce chiffre aux 37% de défoliation moyenne observés en 2009, on peut supposer que sur les 10% de différence de défoliation notés entre 2009 et 2010, 6 à 7% sont dus à la variation du volume de fructification.

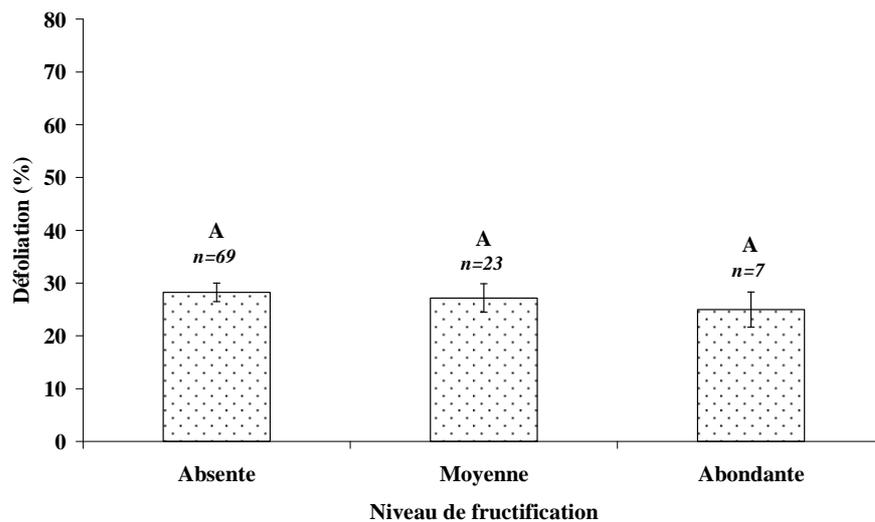


Figure 37. Défoliation moyenne par niveau de fructification (hêtre, 2010)

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.

Structure de la couronne

Chez le hêtre, la relation entre défoliation et structure de la couronne est très nette ($p < 0,0001$) (Figure 38). Il paraît assez évident que la simplification progressive de la ramification s'accompagne d'une augmentation de la défoliation. Cette relation entre défoliation et structure de la couronne a déjà été évoquée par Ling *et al.* (1993). Un quart des hêtres dont on a noté la structure de la couronne (23 hêtres sur 96), présentent une couronne très simplifiée voire déclinante, ce qui est loin d'être négligeable.

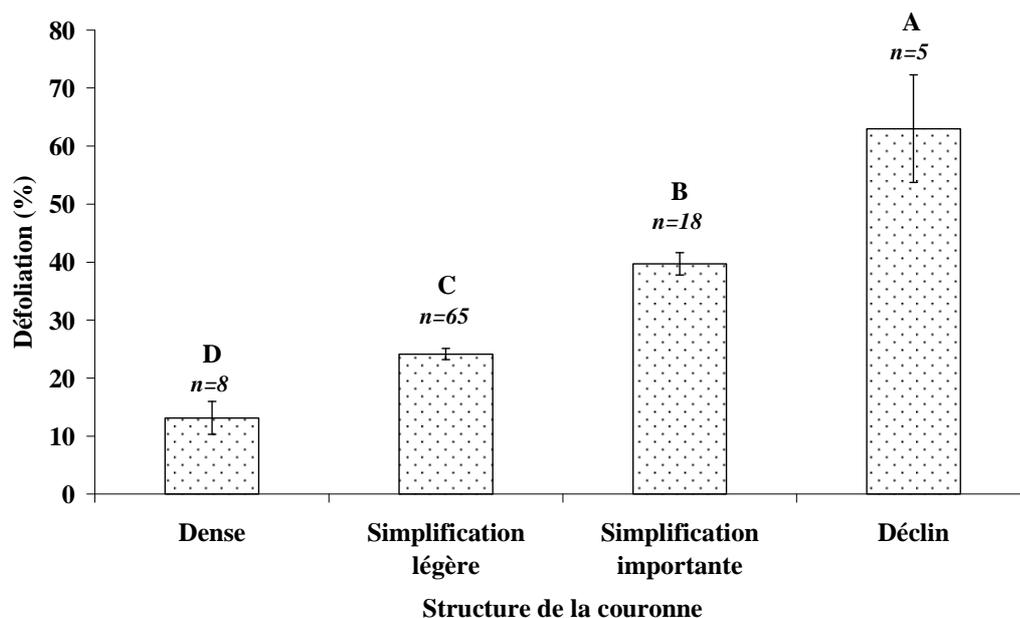


Figure 38. Défoliation moyenne par structure de la couronne (hêtre)

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 ($p < 0,0001$) (Figure 39). Il paraît assez évident que la simplification progressive de la ramification s'accompagne d'une augmentation de la défoliation.

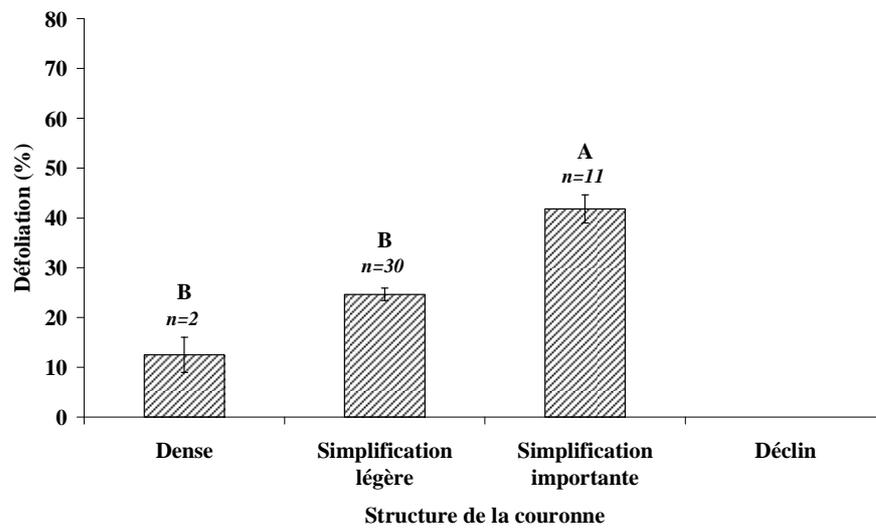


Figure 39. Défoliation moyenne par structure de la couronne (chênes)

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. La différence se marque surtout entre les extrêmes ($p = 0,0097$) (Figure 40). Une relation entre défoliation et espace disponible autour des couronnes a déjà été observée par Göttlein et Pruscha (1996) 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).

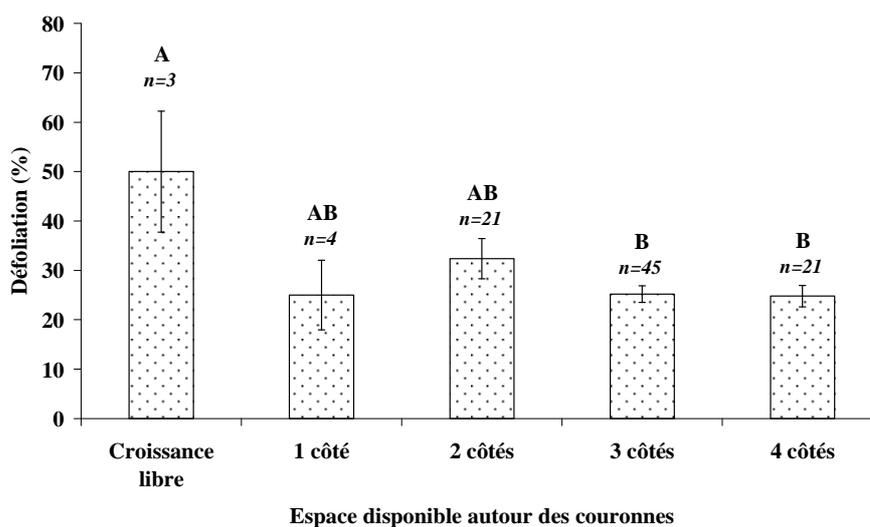


Figure 40. Défoliation moyenne selon la concurrence (hêtre)

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 ($p = 0,8905$) (Figure 41).

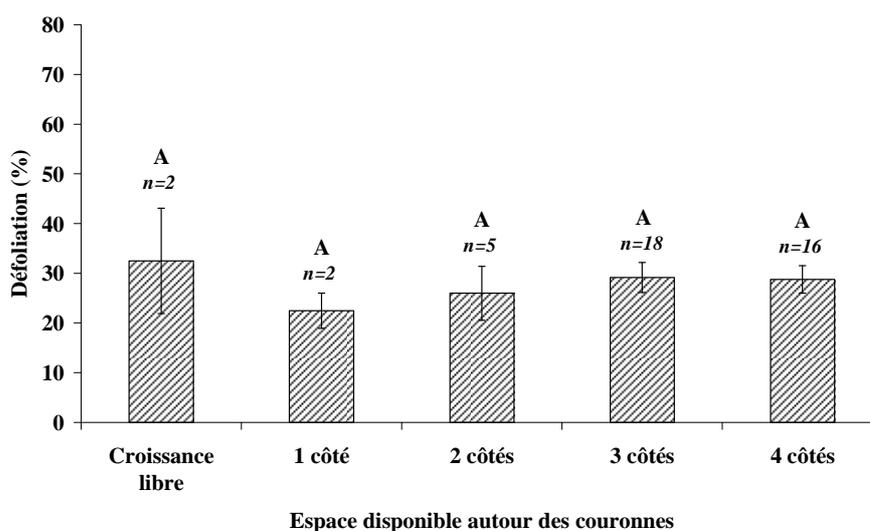


Figure 41. Défoliation moyenne selon la concurrence (chênes)

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.

La Figure 42 et la Figure 43 montrent la circonférence moyenne pour chaque degré de concurrence. La relation est particulièrement visible pour les chênes. La concurrence est associée à un effet taille dans le cas des chênes.

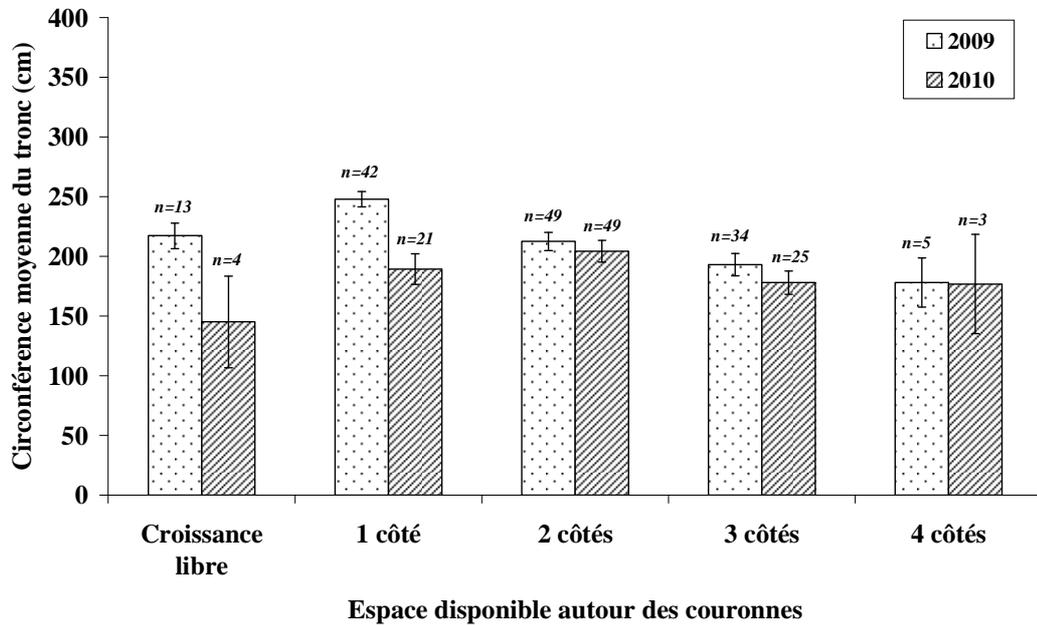


Figure 42. Circonférence moyenne pour chaque degré de concurrence (hêtre)

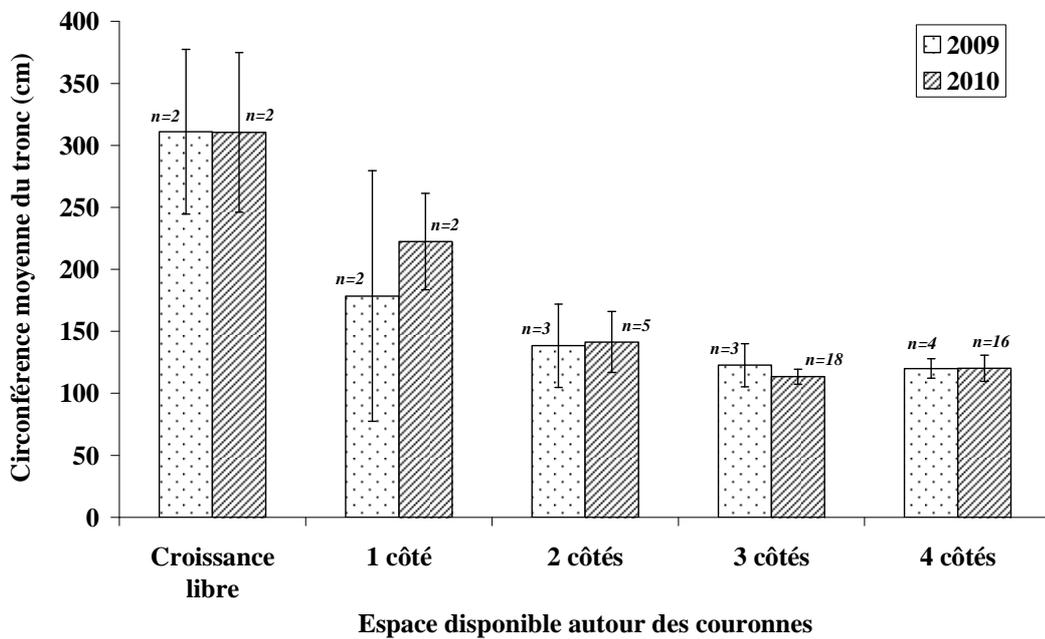


Figure 43. Circonférence moyenne pour chaque degré de concurrence (chênes)

1.3.4. Dommages et symptômes

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. Sur certains hêtres, 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). Cependant, les hêtres portant des branches mortes représentaient deux tiers de l'échantillon en 2009, contre un tiers seulement en 2010 (Figure 44). On peut supposer que, suite aux épisodes venteux de l'été 2010, les branches mortes sont tombées et que la couronne s'est resserrée sur sa partie basse, qui devient la nouvelle partie à observer. La défoliation se réduit alors après avoir atteint des niveaux assez élevés comme ceux observés en 2009. En 2010, le nombre d'arbres (hêtres et chênes confondus) présentant des branches mortes ou manquantes en proportions importantes s'élève à plus de 100. Ces arbres sont susceptibles d'être dans un processus de rabotage de cime. Près d'un tiers des chênes présentent des symptômes de défoliateurs. Or, il existe une relation entre défoliation et présence d'insectes (Eichhorn *et al.*, 2005). Quant au tronc, les blessures (meurtrissures d'origine accidentelle, plaies diverses, etc.) sont les dégâts les plus fréquents, devant les déformations. Neuf hêtres présentent des champignons, tous sur le tronc : cinq cas d'*Ustulina deusta* (Figure 45) (un sur la placette 3197, quatre sur la placette 4469) et un cas de *Nectria ditissima* (placette 4458) sont signalés. Le diagnostic doit cependant être confirmé par un phytopathologiste.

Tableau 5. Symptômes et dommages les plus fréquemment notés en 2010 (chênes et hêtre confondus).

<i>Partie affectée</i>		<i>Symptôme</i>	<i>Nombre de cas</i>
Feuilles		Dévorées	32
		Décolorées rouge/brun	46
Branches	Rameaux de l'année en cours	Morts ou mourants	5
	Branches < 2 cm	Manquantes	25
		Mortes ou mourantes	44
	Branches 2 à 10 cm	Mortes ou mourantes	25
	Branches > 10 cm	Mortes ou mourantes	6
Tronc	Sous le couronne	Blessures	23
	Collet	Blessures	11
		Champignons	5
	Hauteur d'homme	Déformations	15
		Blessures	15
	Entier	Déformations	4
		Blessures	5

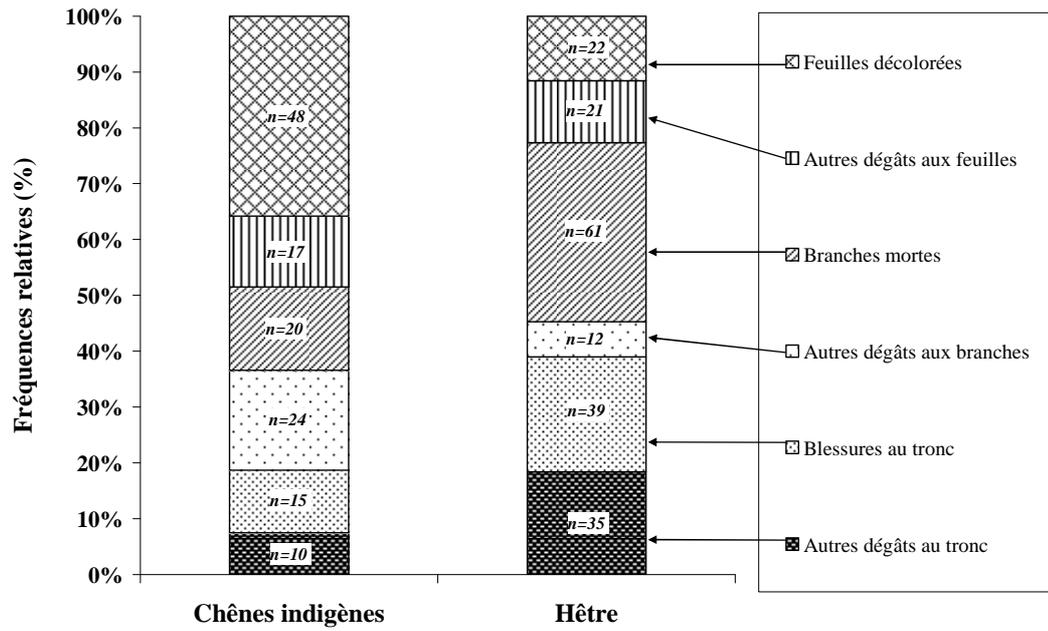


Figure 44. Distribution des symptômes et dommages signalés en 2010 selon les essences. Plusieurs symptômes ou dommages peuvent être signalés pour chaque arbre.



Figure 45. *Ustulina deusta* sur une souche de chêne, forêt de Soignes, juillet 2010.

1.4. Conclusion et perspectives

Entre le 1^{er} juillet et le 20 août 2010, 193 arbres (142 hêtres et 51 chênes indigènes) répartis sur 22 placettes ont été observés par les adjoints forestiers de BE - IBGE. La défoliation a été estimée sur 146 de ces arbres (102 hêtres et 44 chênes indigènes). La défoliation moyenne du hêtre (27,3%) est moins élevée que celle des chênes (28,5%). En moyenne, pour les 87 arbres évalués tant en 2009 qu'en 2010, la défoliation des hêtres a diminué de 7,3% et la défoliation des chênes a diminué de 5%. En 2010, un peu plus de 90% des hêtres et des chênes ont une défoliation supérieure ou égale à 25%. La fructification notée en 2010 est faible, en comparaison avec ce qui était observé en 2009 en forêt de Soignes (Braem *et al.*, 2010). Une décoloration modérée à sévère est observée sur près de 10% des hêtres et de 25% des chênes. Les principaux dégâts observés sont des rameaux et des branches mortes pour le hêtre et des feuilles décolorées pour les chênes.

La campagne 2010 d'observation sanitaire est le deuxième pas vers la constitution d'une série temporelle sur l'état de santé de la forêt de Soignes bruxelloise. Il ne sera possible de déceler des tendances claires que lorsque des données auront été rassemblées sur plusieurs années (Innes, 1993). Il est pour l'instant juste possible de comparer les données de 2010 à celles de l'année précédente. Cependant, la diminution de la défoliation moyenne entre 2009 et 2010 semble être notamment imputable à la moindre fructification observée en 2010. En effet, les arbres présentant une fructification abondante ont en moyenne une défoliation plus élevée de l'ordre de 10% ; en 2010, la proportion de ces arbres a fortement chuté par rapport à 2009. La défoliation des chênes semble être en partie de nature accidentelle (attaque de défoliateurs, vent, etc.), tandis que chez le hêtre, il s'agit d'un processus de perte de vitalité qui s'aggrave progressivement avec le temps. Ainsi, 10% de la variabilité de la défoliation s'explique par la dimension. D'autres facteurs, comme le rabotage des cimes ou des conditions de croissance plus favorables, peuvent encore expliquer l'évolution de la défoliation.

Dans la perspective du changement climatique, l'augmentation des températures durant la saison de végétation est sensée renforcer l'activité photosynthétique et donc stimuler la productivité. Cependant, le régime hydrique serait un facteur limitant possible. Les épisodes de sécheresse prolongées, les vagues de chaleur, les précipitations inégalement réparties sur l'année, telles que prévues par les climatologues, peuvent avoir des conséquences néfastes. En Europe atlantique, cela devrait entraîner le développement de ravageurs et de maladies, et notamment des xylophages et des espèces thermophiles. Enfin, les tempêtes devraient être plus violentes, avec des conséquences sur la gestion et la productivité des forêts (Lindner *et al.*, 2010). Lors des prochaines campagnes, l'attention devra donc être portée à déceler les prémices de ravageurs. Au niveau de la gestion, une réponse à ces prévisions consisterait à diversifier la hêtraie en y ajoutant des essences les mieux adaptées aux conditions actuelles et futures de la station (Daise *et al.*, 2009). Par ailleurs, l'augmentation de la défoliation moyenne avec la circonférence des arbres, observée tant en 2009 qu'en 2010, suggère de réduire l'âge d'exploitabilité des peuplements pour en maintenir la vitalité.

2. Autres travaux

2.1. Prélèvement de carottes sur les hêtres

L'âge des hêtres de la forêt de Soignes n'est pas connu avec précision. Celui déduit avec les sources actuelles (archives, déductions à partir des mesures dendrométriques...) est parfois imprécis et incertain. Seule l'analyse de cernes à partir de carottages fournit des chiffres fiables. Dans ce but, les 28 placettes du suivi sanitaire situées en hêtraie sont visitées. Trois hêtres dominants d'une circonférence (C150) proche de la circonférence moyenne de la placette (à l'écart-type près) sont carottés. Ils sont sélectionnés au N, N-E des placettes et à une certaine distance du centre (à évaluer sur le terrain) pour limiter les risques de perturbation des arbres suivis (mise en lumière brusque avec risques de coups de soleil, etc.). Cependant, les arbres carottés sont choisis suffisamment près de la placette, pour représenter des conditions de milieu similaires. Si l'arbre se trouve sur une pente marquée, le carottage sera parallèle à la courbe de niveau. 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.

Fin octobre 2010, 59 arbres répartis sur 20 placettes ont été carottés. Une fois la récolte des carottes achevée, elles seront analysées par interdatation. Le principe de l'interdatation est d'agencer les séries de croissance des carottes entre elles, pour ajuster les cernes élaborés la même année et ainsi reconstituer une série temporelle exacte. Concrètement, il faut retrouver, dans la largeur des cernes, les épisodes climatiques ou autres responsables d'une croissance limitée (cernes plus étroits que la moyenne) ou stimulée (cernes plus larges que la moyenne). Ces épisodes se retrouvent de manière semblable sur toutes les carottes récoltées dans un même secteur, et servent ainsi de repères. Ces pics ou ces creux sur le profil sont appelés « années caractéristiques ». Les carottes peuvent ainsi être alignées entre elles et sur les années dites caractéristiques (Lebourgeois, 1997 et 2005).

2.2. Base de données

Une base de données est en cours de finalisation. Elle est élaborée dans MS Access. Il s'agit d'une base relationnelle, composée de 5 tables :

- 1) « arbres » : caractéristiques permanentes des arbres (espèce, etc.) ;
- 2) « état_houppier » : descriptions de la couronne (défoliation, etc.) ;
- 3) « dommages » : liste des symptômes et dégâts observés ;
- 4) « placettes » : liste des 34 placettes du suivi sanitaire (position, etc.) ;
- 5) « observations » : conditions des observations (observateurs présents, date, etc.).

Les relations entre les tables sont basées sur les arbres (identifiant de l'arbre et de sa placette).

L'encodage se fait à l'aide de formulaires, construits de telle manière que les données aberrantes ou inappropriées ne puissent être enregistrées. Parmi les outputs, un fichier Excel est automatiquement préparé, présentant entre autres l'évolution de la défoliation en fonction de la grosseur des arbres. Une formation est prévue pour les personnes de l'IBGE chargées de l'encodage.

3. Analyse de l'état sanitaire par photo-interprétation

3.1. Contexte

Dans cette étude, nous évaluerons le potentiel de la télédétection pour l'évaluation de l'état sanitaire. L'approche télédétection est en effet complémentaire des campagnes d'observation au sol, présentées plus haut. À côté des inventaires de terrain, la télédétection permet la récolte instantanée d'informations sur de grandes étendues, ainsi que la spatialisation de ces informations. De plus, les données d'archives permettent parfois une analyse rétrospective, chose impossible sur le terrain. Enfin, les mesures, prises en un seul temps, sont d'une plus grande homogénéité (pas d'effet observateur). Dans le cas du suivi de l'état sanitaire, la télédétection sert à suivre la répartition spatiale de la vitalité et son évolution temporelle. La comparaison des clichés pris à des dates différentes peut aider à déceler des zones où les arbres subissent un stress et affiner ainsi le réseau de surveillance et d'alerte pour le gestionnaire. L'utilisation de bandes spectrales en dehors du spectre visible renforce par ailleurs ce potentiel. L'estimation de défoliations partielles par télédétection fait encore l'objet de recherches. Dans ce chapitre, deux méthodes de photo-interprétation sont testées pour estimer les défoliations partielles d'arbres observés sur le terrain.

3.2. Méthodologie

Estimer des niveaux de défoliations assez fins est un travail difficile. En effet, l'équivalence entre la défoliation observée sur le terrain et celle calculée par logiciels sur une image télédéteectée est délicate : les images renvoient un signal complexe, où le volume de la masse foliaire et sa vitalité sont mêlés, alors que les observations au sol distinguent les deux paramètres (Fabiánek, 2004). C'est pourquoi la photo-interprétation visuelle, qui applique sur l'image un travail d'observation similaire à celui effectué sur le terrain, est intéressante. La photo-interprétation a aussi l'avantage d'être simple à appliquer. C'est une des méthodes les plus robustes et les plus souples. Cependant, la qualité des données produites est très variable (expérience de l'opérateur, fatigue, etc.) et le travail reste laborieux. La présente étude a pour but de tester différentes méthodes de photo-interprétation d'images de la forêt de Soignes bruxelloise.

Dans un premier temps, il a fallu choisir les images disponibles les plus propices à la photo-interprétation. Dans un deuxième temps, un lot de données d'observations au sol a été constitué, pour vérifier la concordance des informations tirées de l'interprétation des images avec la réalité du terrain. Enfin, les différentes méthodes d'interprétation ont été testées puis comparées sur base de leur exactitude respective. Le cas échéant, une analyse rétrospective est effectuée sur des images d'archives. La photo-interprétation effectuée dans le cadre de ce travail se base sur deux approches : les images (en deux dimensions) et la stéréoscopie. Dans le premier cas, les couronnes visibles sur l'image sont analysées selon des critères comme leur structure et leur couleur. Dans le second cas, les mêmes critères sont repris, mais la vision en trois dimensions permet d'affiner l'interprétation et d'ajouter d'autres critères, comme la forme de la couronne et sa transparence relativement aux arbres voisins.

La fiabilité de chaque méthode de photo-interprétation est évaluée par différents indices (Paine et Kiser, 2003) :

1. La *matrice de confusion*, qui classe en colonnes les occurrences des classes estimées par la photo-interprétation, et en lignes les occurrences des classes de référence (ici, les données de terrain),
2. L'*exactitude du réalisateur*, qui est, pour une classe donnée, la proportion d'objets d'une classe de référence (vérifiée sur le terrain) attribués à la même classe estimée ;
3. L'*exactitude de l'utilisateur*, qui est, pour une classe donnée, la proportion d'objets d'une classe estimée attribués à la même classe de référence (vérifiée sur le terrain) ;
4. L'*exactitude totale*, qui est la proportion d'objets bien classés sur l'ensemble des objets interprétés.

S'y ajoute le coefficient d'exactitude \hat{K} , qui exprime la concordance non aléatoire entre l'interprétation et les données de référence pour l'ensemble des classes. Le coefficient d'exactitude \hat{K} se calcule à partir de la matrice de confusion, comme suit (Paine et Kiser, 2003) :

$$\hat{K} = \frac{n(\sum \text{total} \cdot \text{diagonale}) - (\sum \text{total} \cdot \text{lignes} \times \text{total} \cdot \text{colonnes})}{n^2 - (\sum \text{total} \cdot \text{lignes} \times \text{total} \cdot \text{colonnes})}$$

Cet indice va de 0 (ou 0%) (l'interprétation n'est pas plus efficace qu'un classement entièrement aléatoire) à 1 (ou 100%) (toutes les données interprétées concordent avec les données de référence). À côté de cet indice, le coefficient conditionnel d'exactitude \hat{K}_i exprime la concordance non aléatoire entre l'interprétation et les données de référence pour une classe individuelle i . Elle se calcule comme suit (Paine et Kiser, 2003) :

$$\hat{K}_i = \frac{n(\sum \text{total} \cdot \text{diagonale}) - (\text{total} \cdot \text{lignes} \times \text{total} \cdot \text{colonnes})}{n(\text{total} \cdot \text{lignes}) - (\text{total} \cdot \text{colonnes})}$$

Une photo-interprétation est considérée comme satisfaisante quand son coefficient d'exactitude dépasse 85% (Congalaton et Green, 1999 [cité par Paine et Kiser, 2003]). Landis et Koch (1977) [cité par Paine et Kiser, 2003] estiment qu'une forte concordance présente un coefficient de précision de plus de 80% ; une concordance passable, de 40 à 80% ; et une concordance nulle, en-dessous de 40%.

3.2.1. *Images analysées*

L'usage et la qualité des images aériennes ou satellitaires s'estiment sur quatre critères : (i) résolution spatiale (taille des pixels) ; (ii) résolution spectrale (nombre de bandes spectrales) ; (iii) résolution temporelle (fréquence des prises d'images) et (iv) résolution radiométrique (nombre de niveaux de gris par bande spectrale). C'est selon ces critères que les images disponibles ont été choisies, en cherchant le compromis entre une haute résolution spatiale (efficace pour l'analyse de détails telle que l'estimation de la défoliation et la localisation des couronnes) et une haute résolution spectrale (pour l'estimation de la décoloration). Deshayes *et al.* (2006) renseignent 5 bandes spectrales parmi les plus utiles pour l'estimation de l'état sanitaire : les trois bandes du visible (rouge, vert, bleu), le proche infrarouge (NIR) et le moyen infrarouge (SWIR). Ce sont les images aériennes produites par Eurosense (Wemmel) en 2006 et 2009 et fournies à BE – IBGE par le Ministère de la Région Bruxelles-Capitale (MRBC) qui ont été choisies pour la photo-interprétation (Tableau 6). En effet, elles présentent le meilleur compromis entre la résolution spatiale (degré de détail très élevé), la résolution spectrale (proche infrarouge mettant en évidence la vitalité des arbres) et la résolution temporelle (revisite tous les 3 ans sur le même site). Les vols à l'origine de ces images couvrent essentiellement la ville et ne traversent la forêt que le long de la drève de Lorraine, à Uccle, dans la moitié ouest de la Forêt de Soignes bruxelloise (Figure 46 et Figure 47). Seuls les orthophotoplans (images en deux dimensions) sont disponibles pour l'année 2006. Pour l'année 2009 nous disposons des orthophotoplans mais également des couples stéréoscopiques bruts, ce qui rend possible une interprétation par stéréoscopie.

Tableau 6. Caractéristiques principales des orthophotoplans utilisées pour la photo-interprétation

	Orthophotoplans CIR⁶ 2006	Orthophotoplans CIR 2009	Couples stéréoscopiques 2009	Orthophotoplans 2009
Description	Orthophotoplans affichés en « fausses couleurs (infrarouge)»		Couples stéréoscopiques dans l'infrarouge proche	Orthophotoplans affiché en « couleurs naturelles »
Secteur	Drève de Lorraine	Drève de Lorraine	Drève de Lorraine	Forêt de Soignes bruxelloise
Date de la prise de vue	Été 2006	Été 2009	Été 2009	Février 2009
Résolution	10 x 10 cm	10 x 10 cm	10 x 10 cm	10 x 10 cm
Nombre de bandes	4 bandes : proche infrarouge, rouge, bleu, vert			3 bandes dans le visible : rouge, bleu, vert
Propriétaire	MRBC	MRBC	MRBC	BE-IBGE ⁷
Créateur	Eurosense	Eurosense	Eurosense	Urbis (CIRB ⁸)
Utilisation	Photo- interprétation, spatialisation des arbres	Photo- interprétation, spatialisation des arbres	Photo- interprétation	Spatialisation des arbres

⁶ *Colored Infra-Red* : infrarouge fausses couleurs.

⁷ Bruxelles-Environnement - Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement.

⁸ Centre d'Informatique pour la Région Bruxelloise.

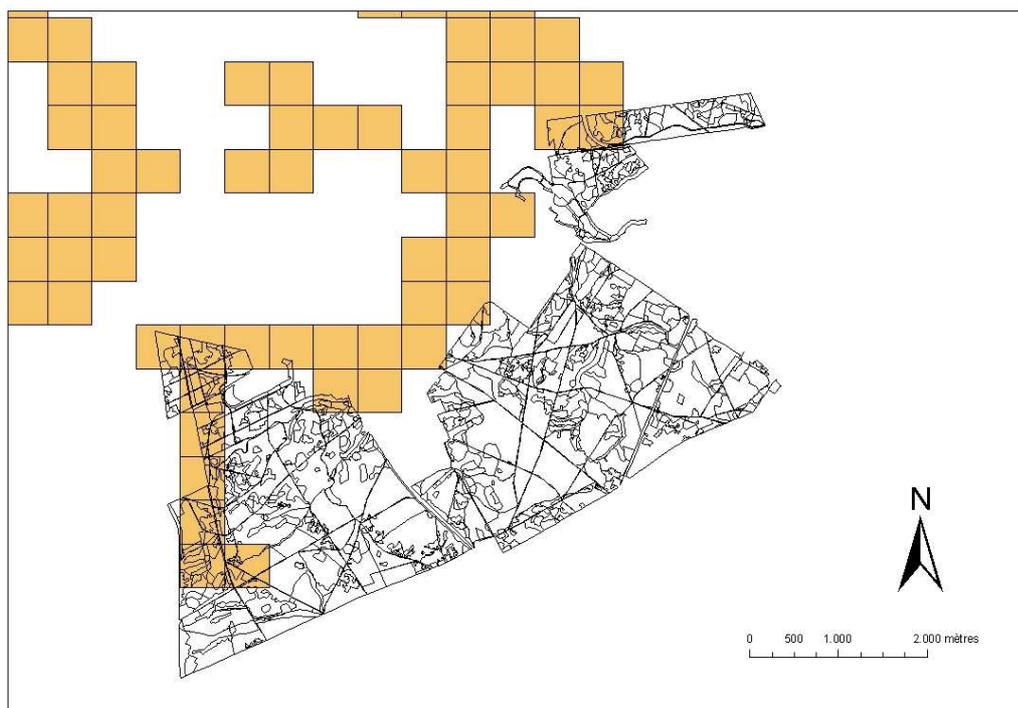


Figure 46. Orthophotoplans CIR 2006 couvrant la Forêt de Soignes bruxelloise.

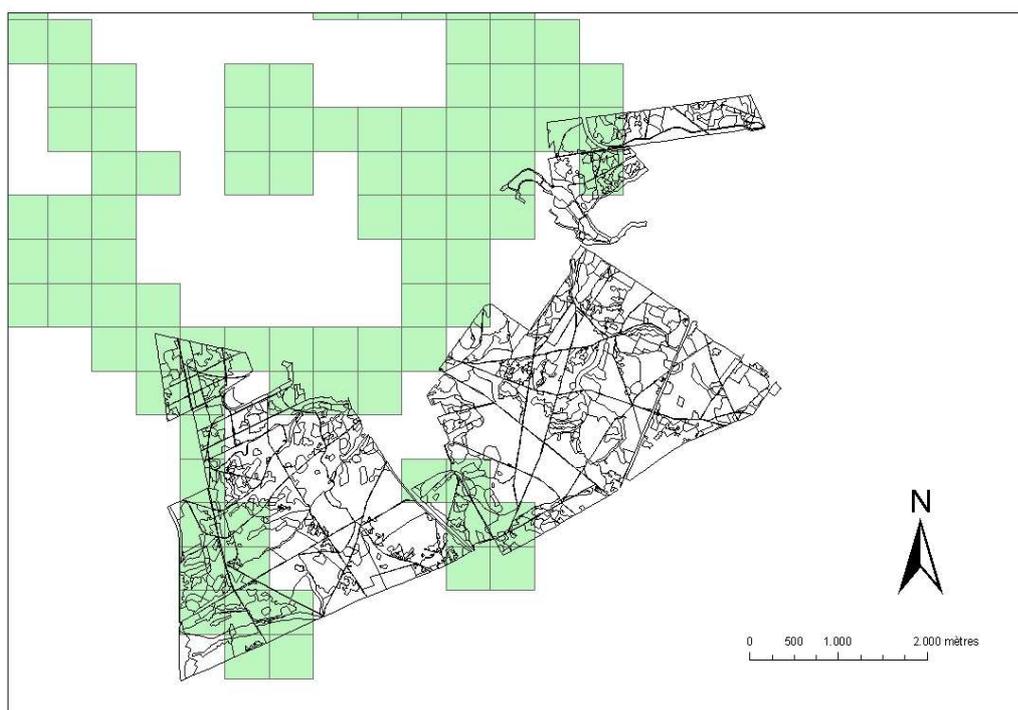


Figure 47. Orthophotoplans CIR 2009 couvrant la Forêt de Soignes bruxelloise.

3.2.2. *Données de terrain*

En août 2009, les principaux critères sanitaires (défoliation, décoloration, fructification, structure de la couronne) ont été observés suivant la méthode de l'ICP *Forests* sur 49 arbres répartis sur 16 placettes, choisies sur la zone couverte par les orthophotoplans 2009 (Figure 47). Ces arbres sont

des hêtres ou des chênes dominants de plus de 80 cm de circonférence à 1,5m de hauteur. Ces données sanitaires servent de référence pour estimer et comparer la fiabilité des méthodes de photo-interprétation. En mars 2010, un théodolite laser a été utilisé pour mesurer les distances et les azimuts des arbres de référence par rapport au centre des placettes ou par rapport à des points remarquables identifiables sans ambiguïté sur les images (arbres couchés, édicules, etc.). La position des arbres voisins a été calculée de la même manière. Au total, 184 arbres, de toutes dimensions et toutes essences confondues ont été positionnés en plus des 49 observés. Il est ainsi possible de retrouver les arbres d'intérêt relativement à leurs voisins. Les positions calculées ne sont en effet pas suffisantes pour identifier avec précision les couronnes sur l'orthophotoplan, car des écarts existent toujours. Ces écarts peuvent provenir des déformations lors de la transformation de l'orthophotoplan (corrections liées à l'orthorectification), des conditions de prises de vue (parallaxe, etc.), de l'imprécision du positionnement (appareils, opérateurs) et d'erreurs dans le calcul des coordonnées des arbres. Pour contrôler les positions calculées, deux à trois opérateurs ont noté sur les orthophotoplans (hiver et été 2009) imprimés des placettes les numéros des arbres repérés sur le terrain. À l'aide des positions calculées, des positions des arbres voisins et des images annotées, il a été possible de retrouver sur l'orthophotoplan les couronnes observées sur le terrain. 26 arbres (sur 233, soit 11%) étaient mal positionnés par les mesures mais ont pu être repérés à partir de ces images annotées.

3.2.3. *Photo-interprétation des orthophotoplans 2009*

Dans un premier temps, les 49 couronnes des arbres échantillonnés visibles sur l'orthophotoplan CIR de 2009 sont interprétées grâce à la clef d'Hildebrandt (1992). Cette étape a permis de vérifier l'efficacité de la clef et d'apporter des adaptations éventuelles. Ensuite, les 37 couronnes des arbres échantillonnés visibles sur l'orthophotoplan CIR de 2006 sont interprétées avec cette clef adaptée.

La clef d'Hildebrandt se base sur la forme de la couronne (contours), sa structure (réseau et densité des branches, proportions et répartitions d'ombres et de clartés) et sa couleur (teinte, répartition, saturation). À partir de ces critères, 5 classes sanitaires ont été définies. Elles sont présentées au Tableau 7, avec les défoliations correspondantes, estimées à partir des photographies de terrain illustrant la clef.

Tableau 7. Classes d'état de la couronne, définies par Hildebrandt (1992) et leurs équivalences en termes de défoliation (hêtre et chênes)

<i>Classe sanitaire Hildebrandt</i>	<i>Défoliation (%) des illustrations dans Hildebrandt (1992)</i>	<i>Classes de défoliation (%) de l'UNECE (Fabianek, 2004)</i>	<i>Milieux de classe</i>
0	0	0 à 10%	5%
1	20	10 à 25%	17,5%
2	35	25 à 60%	42,5%
3	> 60	60 à 100%	80%
4	Arbre mort sur pied	Arbre mort	100%

Les orthophotoplans CIR de 2009 ont été affichées sous le logiciel ESRI ArcGIS. Aucune modification du contraste n'a été effectuée (contraste par défaut). Des points représentant les positions des arbres, surmontés de leurs numéros, sont superposés aux orthophotoplans. Le cas échéant, ces positions sont réajustées à partir des orthophotoplans imprimées annotées sur le terrain. Les couronnes des arbres échantillonnés sont ainsi identifiables et prêtes à être analysées grâce à la clef d'interprétation.

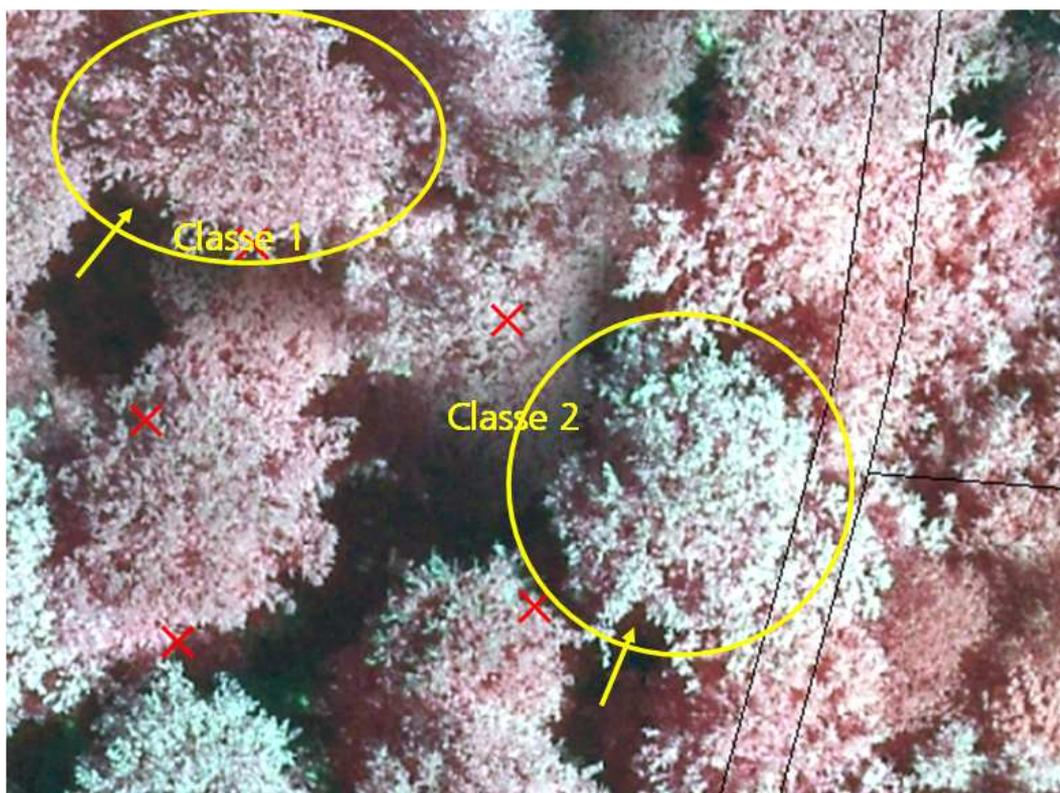


Figure 48. Interprétation sur l'orthophotoplan CIR 2009.

Les croix rouges représentent les positions des arbres calculées à partir des mesures de terrain. Les anneaux jaunes entourent deux couronnes analysées. L'arbre du haut, de teinte rougeâtre, est rangé dans la classe 1. L'arbre du bas, de teinte bleuâtre, est rangé dans la classe 2. Les flèches jaunes indiquent les rameaux périphériques en épieux, indice utilisé par la clef d'Hildebrandt.

Les défoliations estimées par photo-interprétation ont été confrontées aux défoliations observées sur le terrain en 2009 sur ces mêmes arbres. Le Tableau 8 présente les résultats sous forme de matrice de confusion. L'exactitude totale (proportion d'arbres correctement classés) est de 57% (soit 43% d'arbres mal classés). Le coefficient d'exactitude est de 27%. On note une tendance au surclassement.

Tableau 8. Matrice de confusion de la photo-interprétation sur les images CIR 2009, clef d'Hildebrandt (49 arbres) - 28 arbres ont été correctement classés.

		Photo-interprétation				
		0	1	2	3	4
Terrain	0	0	3	0	0	0
	1	1	10	10	0	0
	2	0	5	16	2	0
	3	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	2

Tableau 9. Exactitudes pour le réalisateur et l'utilisateur
 (photo-interprétation des images CIR 2009, clef d'Hildebrandt, 49 arbres)

Classe de défoliation	Exactitude pour le réalisateur	Exactitude pour l'utilisateur
0 (0 à 10%)	0%	0%
1 (10 à 25%)	56%	48%
2 (25 à 60%)	62%	70%
3 (60 à 100%)	-	-
4 (arbre mort)	100%	100%

Au vu du Tableau 8, des adaptations s'avèrent nécessaires. La clef d'Hildebrandt originale se réfère à des orthophotoplans obtenus sur films argentiques, où la répartition des contrastes et des couleurs est parfois inégale. Ici, étant donné que les orthophotoplans proviennent d'une caméra numérique, il a fallu redéfinir certains critères. À l'issue du premier test de photo-interprétation, il a été constaté que les arbres surclassés se distinguaient par leur couleur, qui était souvent moins pâle que les exemples proposés dans la clef d'Hildebrandt. Il a donc été décidé qu'entre deux arbres en limite de classe, de même aspect mais de couleur différente, l'arbre le plus bleu sera rangé dans une classe supérieure à celle de son voisin plus rouge (Figure 49). De manière générale, pour un même arbre, en cas d'hésitation entre deux classes, c'est la classe la plus élevée qui sera choisie. La résolution spectrale est de ce point de vue très importante puisque, pour un aspect de couronne similaire, c'est la couleur qui rangera l'arbre dans l'une ou l'autre classe. Il faut prendre garde à estimer ces couleurs de manière relative et non absolue, c'est-à-dire en comparant les arbres les uns aux autres, car elles ne dépendent pas seulement de la vitalité des arbres, mais aussi des conditions de prise de vue, etc.



Figure 49. Hêtre de teinte grisâtre, rangé en classe 2.

Les arbres ont été réinterprétés à partir de la clef adaptée. Pour s'assurer de l'efficacité de cette clef, 16 arbres supplémentaires ont été cotés sur l'orthophotoplan 2009 selon la nouvelle clef. Leurs cotations ont été ensuite comparées à celles données sur le terrain la même année (Tableau 10). L'exactitude totale est de 83% (soit 17% d'arbres mal classés). Le coefficient d'exactitude est de 70%.

Tableau 10. Matrice de confusion de la photo-interprétation (classes de défoliation) sur les images CIR 2009, clef adaptée (65 arbres) - 54 arbres ont été correctement classés.

	Photo-interprétation				
	0	1	2	3	4
0	1	1	0	0	0
1	3	17	3	0	0
Terrain 2	0	4	33	0	0
3	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	2

Tableau 11. Exactitudes pour le réalisateur et l'utilisateur (photo-interprétation des images CIR 2009, clef adaptée, 65 arbres)

Classe de défoliation	Exactitude pour le réalisateur	Exactitude pour l'utilisateur
0 (0 à 10%)	25%	50%
1 (10 à 25%)	77%	74%
2 (25 à 60%)	92%	89%
3 (60 à 100%)	100%	100%
4 (arbre mort)	100%	100%

En 2009, plus des trois quarts des arbres observés sur l'ensemble de la forêt de Soignes lors de la campagne de terrain présentaient une défoliation comprise entre 25 et 60% (Braem *et al.*, 2009), soit la classe 2 de Hildebrandt. Scinder cette classe en deux affinerait la description de la défoliation estimée par photo-interprétation et permettrait de s'approcher du niveau de détail de l'observation de terrain, où la défoliation est estimée à 5% près. Une nouvelle photo-interprétation a donc été effectuée, où la classe 2 a été partagée en deux nouvelles classes : (i) 25-40% et (ii) 40-60%. Ces deux nouvelles classes se distinguent par des nuances de couleur, les couronnes rosâtres étant rangées dans la première et les couronnes bleues ou grises étant rangées dans la deuxième. Le Tableau 12 et le Tableau 13 présentent les résultats. L'exactitude totale est de 63% (soit 37% d'arbres mal classés). Le coefficient d'exactitude \hat{K} retombe à 52%. Le coefficient conditionnel d'exactitude \hat{K}_{25-40} pour la classe de défoliation 25-40% est de 18%, ce qui est insatisfaisant. Le coefficient conditionnel d'exactitude \hat{K}_{40-60} pour la classe de défoliation 40-60% est de 49%, ce qui reste très médiocre. La scission de la classe 2 d'Hildebrandt en deux nouvelles classes n'est donc pas concluante.

Tableau 12. Matrice de confusion de la photo-interprétation (6 classes de défoliation) sur les images CIR 2009, clef adaptée (65 arbres) - 41 arbres ont été correctement classés.

		Photo-interprétation des images CIR 2009					Arbre mort
		0 à 10	10 à 25	25 à 40	40 à 60	60 à 100	
Terrain	0 à 10	1	1	0	0	0	0
	10 à 25	3	17	0	0	0	0
	25 à 40	0	4	9	12	0	0
	40 à 60	0	0	2	11	0	0
	60 à 100	0	0	1	1	1	0
	Arbre mort	0	0	0	0	0	2

Tableau 13. Exactitudes pour le réalisateur et l'utilisateur (photo-interprétation des images CIR 2009, clef adaptée, 6 classes de défoliation, 65 arbres)

Classe de défoliation	Exactitude pour le réalisateur	Exactitude pour l'utilisateur
0 à 10%	25%	50%
10 à 25%	77%	85%
25 à 40%	75%	36%
40 à 60%	46%	85%
60 à 100%	100%	33%
Arbre mort	100%	100%

3.2.4. Photo-interprétation des orthophotoplans 2006

Seuls 37 arbres étaient identifiables simultanément sur les orthophotoplans CIR de 2006 et de 2009. Trois placettes n'ont en effet pas été photographiées en 2006 (Figure 46 et Figure 47). D'autres arbres étaient introuvables, soit que le décalage dû au changement de parallaxe entre 2006 et 2009 rendait l'identification hasardeuse, soit que les couronnes étaient trop intimement intégrés dans la canopée pour distinguer l'arbre avec certitude. Sur l'orthophotoplan CIR de 2006, la plupart des arbres paraissent décalé de 3 à 5 m vers le nord, par rapport aux mêmes cimes photographiées en 2009. L'aspect général de l'orthophotoplan est plus flou, pour une résolution spatiale pourtant identique. Sur ces 37 arbres, entre 2006 et 2009, 1 est descendu d'une classe de défoliation (c'est-à-dire qu'ils ont récupéré du feuillage et de la vitalité) et 6 sont montés d'une classe (c'est-à-dire avec perte de feuillage et de vitalité) (Figure 50). Si, en 2009, la défoliation moyenne était de 32%, elle est de 30 % en 2006 (Tableau 14). Il est à rappeler que, l'échantillon étant réduit et composé sans d'autres règles que la présence des placettes sur les orthophotoplans, les chiffres donnés n'ont aucune validité statistique et ne peuvent être généralisés à l'ensemble de la Forêt de Soignes bruxelloise. On ne peut donc conclure avec certitude à une perte de vitalité de la forêt entre 2006 et 2009, et ce d'autant que les classements sont eux-mêmes entachés d'erreurs.

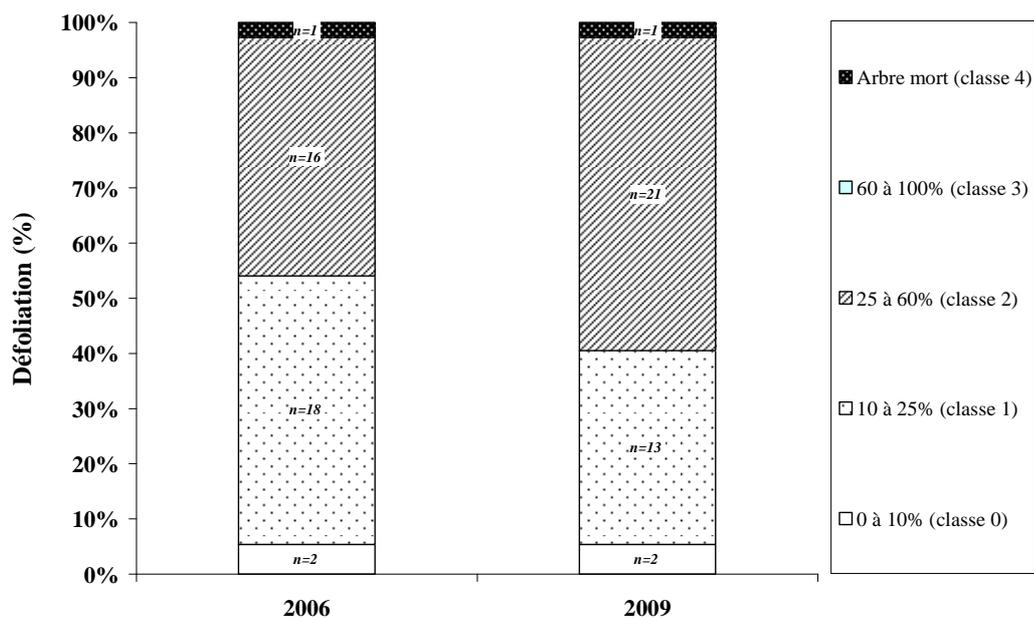


Figure 50. Distribution des arbres photo-interprétés selon les classes de défoliation (Tableau 7)

Tableau 14. Comparaison entre les observations de terrain (été 2009) et la photo-interprétation des orthophotoplans de 2006 et de 2009.

	<i>Terrain, été 2009</i>	<i>Orthophotoplans CIR 2006</i>	<i>Orthophotoplans CIR 2009</i>
Nombre d'arbres analysés	50	37	49
Moyenne de la défoliation	32 %	29,9 % (calculé à partir des milieux de classe)	33,1 % (calculé à partir des milieux de classe)

3.2.5. Photo-interprétation par stéréoscopie

Par rapport aux images en deux dimensions (orthophotoplans), le travail sur les couples stéréoscopiques apporte une plus-value potentielle. En effet, sur les orthophotoplans, l'information sur la hauteur (le relief) disparaît lors du prétraitement. La hauteur ne peut être extraite d'une image unique mais peut être calculée à partir d'un couple d'images se superposant (couple stéréoscopique avec restitution 3D). De plus, si l'orthophotoplan comporte des erreurs ou des imprécisions, il n'est plus possible de corriger la position des arbres avec exactitude. Travailler en stéréoscopie permet donc de cibler les couronnes à analyser avec plus de précision et d'en mieux voir les contours et la transparence.

La stéréoscopie nécessite de travailler avec les images originales, c'est-à-dire les couples stéréoscopiques qui ont servi à produire les orthophotoplans. La première étape du travail consiste à réaligner les orthophotoplans entre elles à partir des indices de la prise de vue (altitude et angles de l'avion) et de la projection (datum, etc.). Ce travail a été effectué sous le logiciel ERDAS LPS 2010. Une fois ces images alignées, il est possible de les afficher en trois dimensions à l'aide du module *Stereo Analyzer* et de lunettes spéciales. Malheureusement, il est impossible sous ce support de zoomer à une taille suffisante pour interpréter à l'arbre près. Il a donc été nécessaire d'imprimer les couples stéréoscopiques et de travailler sous lunette stéréoscopique. Dix-neuf arbres (hêtre et chênes) de l'échantillon 2009 ont été repérés sur 6 placettes.

Les images 3D donne une impression de réalisme (« forêt miniature »). C'est pourquoi l'interprétation de ces images 3D mêle la méthode d'évaluation *ICP Forests* utilisée sur le terrain (forme de la couronne, branchaison, impression de « transparence » de la couronne) aux critères décrits dans la clef d'Hildebrandt (1992). Les couronnes ont d'abord été rangées selon leurs classes de défoliation selon la clef d'Hildebrandt adaptée uniquement. Cette première interprétation est largement insatisfaisante (tendance au surclassement, Tableau 15). L'exactitude totale est en effet de 26% (soit 74% d'arbres mal classés), avec un coefficient d'exactitude proche de 0.

Tableau 15. Matrice de confusion de la photo-interprétation (classes de défoliation) par stéréoscopie (19 arbres) - 5 arbres ont été correctement classés.

		Photo-interprétation couples stéréoscopiques 2009				
		0	1	2	3	4
Terrain	0	0	0	1	0	0
	1	1	2	5	1	0
	2	0	2	3	4	0
	3	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0

**Tableau 16. Exactitudes pour le réalisateur et l'utilisateur
(photo-interprétation par stéréoscopie images CIR 2009, 19 arbres)**

Classe de défoliation	Exactitude pour le réalisateur	Exactitude pour l'utilisateur
0 à 10%	0%	0%
10 à 25%	50%	22%
25 à 60%	33%	33%
60 à 100%	0%	-
Arbre mort	-	-

La défoliation des arbres a ensuite été estimée à 5% près, en profitant cette fois-ci de la restitution 3D. Plus des deux-tiers (68%) des évaluations de la défoliation effectuées par stéréoscopie concordent à 10% près avec les défoliations notées sur le terrain (Figure 51). La stéréoscopie permet d'estimer des défoliations comprises entre 20 et 50%, alors que sur le terrain, des défoliations observées s'étalaient entre 10 et 50%.

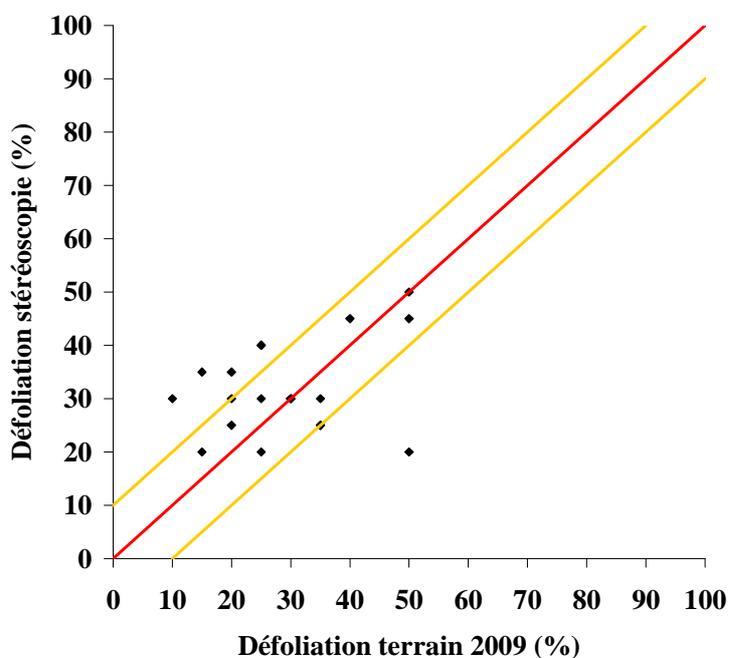


Figure 51. Concordance entre les défoliations estimées par stéréoscopie et les défoliations estimées sur le terrain (référence).

Enfin, on a tenté de classer les couronnes de l'image selon leur structure. La vision en trois dimensions ne facilite pas l'interprétation de la structure des couronnes (Tableau 17). L'exactitude totale est de 42% (soit 58% d'arbres mal classés) et le coefficient d'exactitude est de 12%.

Tableau 17. Matrice de confusion de la photo-interprétation (structure de la couronne) par stéréoscopie (19 hêtres) - 8 arbres ont été correctement classés.

		Photo-interprétation des couples stéréoscopiques 2009			
		Ramification dense	Simplification légère	Simplification importante	Déclin
Terrain	Ramification dense	0	4	0	0
	Simplification légère	1	3	1	0
	Simplification importante	2	3	5	0
	Déclin	0	0	0	0

Tableau 18. Exactitudes pour le réalisateur et l'utilisateur (photo-interprétation par stéréoscopie images CIR 2009, 19 arbres)

Classe de défoliation	Exactitude pour le réalisateur	Exactitude pour l'utilisateur
Ramification dense	0%	0%
Simplification légère	30%	60%
Simplification importante	83%	50%
Déclin	-	-

Tableau 19. Classement relatif des 19 arbres interprétés par stéréoscopie

Placette	Numéro de l'arbre	Essence	Classe de défoliation –référence	Classe de défoliation – estimée	Remarques
2870	2	Hêtre	1	1	/
2870	3	Hêtre	1	2	Couronne imbriquée
2871	1	Chêne	1	2	Couronne imbriquée
2871	2	Hêtre	2	2	/
2871	3	Hêtre	2	2	/
2871	4	Hêtre	2	3	Identification de la couronne incertaine
2953	1	Hêtre	2	2	/
2953	2	Hêtre	1	2	Bordure d'image
2953	3	Hêtre	2	1	Bordure d'image
2953	4	Hêtre	1	3	Bordure d'image
2955	1	Hêtre	1	0	Pas d'explication
2955	3	Hêtre	2	1	Pas d'explication
3035	1	Hêtre	1	2	Surcimé, dans l'ombre, branchaison accentuée
3035	2	Hêtre	2	3	Exagération de la hauteur
3035	4	Hêtre	1	2	Branchaison accentuée
3035	5	Hêtre	2	3	Exagération de la hauteur
3035	7	Hêtre	2	3	Exagération de la hauteur
3036	1	Chêne	1	1	/
3036	2	Chêne	0	2	Relief accentué

Le peu d'efficacité de la photo-interprétation par stéréoscopie peut s'expliquer par le fait que la vision en 3D accentue les hauteurs et exagère donc l'impression de transparence et d'allongement vertical des couronnes. Les cimes paraissent déformées, le réseau des branches est accentué à tel point que les catégories proposées pour les décrire deviennent inutilisables.

3.3. Comparaison des méthodes

La photo-interprétation sur orthophotoplans en infrarouge fausses couleurs (2009) a été comparée à celle réalisée sur les couples stéréoscopiques à l'origine de ces images. Les couronnes identifiables sur les orthophotoplans ont d'abord été classifiées selon 5 classes de défoliation à l'aide de la clef d'Hildebrandt (1992), sans modification d'abord, puis avec une version révisée (« clef adaptée »). Enfin, la même méthode a été utilisée sous stéréoscopie. Le Tableau 20 montre que c'est l'interprétation des orthophotoplans par la clef adaptée qui est la plus fiable, même si selon Paine et Kiser (2003), le coefficient d'exactitude indique une méthode à peine satisfaisante.

Tableau 20. Vue synoptique des exactitudes totales et des coefficients d'exactitude pour les trois interprétations des classes de défoliation

<i>Clef d'Hildebrandt</i>		<i>Clef adaptée</i>		<i>Stéréoscopie</i>	
Exactitude totale	Coefficient d'exactitude	Exactitude totale	Coefficient d'exactitude	Exactitude totale	Coefficient d'exactitude
57%	27%	83%	70%	26%	26%

Ensuite, sous stéréoscope, l'estimation de la défoliation à 5% près, rendue possible grâce à la restitution 3D, a été testée. Les résultats sont satisfaisants, mais l'effectif est trop réduit pour conclure définitivement. Enfin, l'interprétation de la structure des couronnes par stéréoscopie est décevante. Les résultats moins bons de la stéréoscopie peuvent aussi s'expliquer par le fait que nous ne disposons pas d'une clef d'interprétation propre à ce type d'images. Il a fallu imaginer une méthode originale pour analyser ces images, contrairement au travail sur orthophotoplans où nous utilisons la clef d'Hildebrandt.

Le Tableau 21 montre le temps qui a été nécessaire à la photo-interprétation sur orthophotoplans et par stéréoscopie. À noter que les travaux ont été réalisés dans une phase de test ; les durées proposées ne sont pas celles d'un travail de routine, nécessairement plus courtes.

Tableau 21. Temps nécessaire pour les deux méthodes de photo-interprétation

<i>Opérateurs</i>	<i>Temps nécessaire</i>	<i>Nombre d'opérateurs</i>	<i>Remarques</i>
<i>Constitution d'un échantillon d'arbres</i>			
Évaluation de l'état sanitaire de 49 arbres	7 jours	1	
Spatialisation de 233 points (49 arbres, arbres voisins et repères)	3 jours	3 à 4	Théodolite + annotation des images imprimées.
Encodage et mise en SIG	½ jour par placette, soit 8 jours en tout	1	Inclus l'encodage des distances et des azimuts, le calcul des positions et leur rectification sous ArcGIS
<i>Photo-interprétation sur orthophotoplans</i>			
Photo-interprétation de 65 arbres	2 jours	1	Manipulation des images, vérifications et prise de notes incluses.
<i>Photo-interprétation par stéréoscopie</i>			
Alignement des orthophotoplans et impression	3 jours	2	Nécessite le logiciel ERDAS LPS
Photo-interprétation de 19 arbres	1 jour	1	Manipulation des images, vérifications et prise de notes incluses.

3.4. Conclusion et perspectives

La photo-interprétation basée sur les orthophotoplans semble globalement plus avantageuse que celle basée sur la stéréoscopie. Elle est d'abord plus fiable que la stéréoscopie papier pour ranger les couronnes selon des classes de défoliation assez larges. La déformation des objets sous restitution 3D rend difficile la classification des structures des couronnes. De plus, les orthophotoplans nécessaires sont plus facilement disponibles et sont prêts à l'usage sur un support informatique. Cependant, seule la stéréoscopie papier a été investiguée. Nous ignorons encore les opportunités de la stéréoscopie numérique.

L'un des avantages de la télédétection en général est qu'il est toujours possible de revenir sur les placettes de terrain, notamment pour contrôler la qualité de l'analyse des images. Cela offre la possibilité de revoir la méthode de photo-interprétation durant les prochaines années : davantage d'arbres de référence pourraient être choisis (notamment pour limiter l'erreur d'échantillonnage) et d'autres zones de la forêt pourraient être analysées.

4. Références

- 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 p.
- Braem, S., Jonard, M., Ponette, Q., Defourny, P., 2009. Suivi de l'état sanitaire en forêt de Soignes bruxelloise. Rapport de convention UCL-IBGE, 55 p. + annexes.
- Braem, S., Jonard, M., Vanwijnsberghe, S., Defourny, P., Ponette, Q., 2010. Bilan de santé de la forêt de Soignes bruxelloise. Forêt Wallonne, 105, 15-25.
- Congalaton, R., et Green, K., 1999. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. New York: Lewis Publishers.
- Daise, J., Claessens, H., Rondeux, J., 2009. Étude de l'adéquation des essences aux stations forestières de la forêt de Soignes (zone bruxelloise) dans le contexte du changement climatique. Rapport de la convention Gembloux-Agro-Bio-Tech – IBGE, 392 p.
- Deshayes, M., Guyon, D., Jeanjean, H., Stach, N., Jolly, A., Hagolle, O., 2006. The Contribution of Remote Sensing to the Assessment of Drought Effects in Forest Ecosystems. Ann. For. Sci., 63, 579-595.
- Eichhorn, J., Icke R., Isenberg, A., Paar, U., Schönfelder, E., 2005. Temporal development of crown condition of beech and oak as a response variable for integrated evaluations. European Journal of Forest Research, 124, 335-347.
- Eichhorn, J., Roskams, P., Ferretti, M., Mues, V., Szepesi, A., Durrant, D., 2010. Manual on the methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests, part IV: visual assessment of crown condition and damaging agents. UNECE, ICP Forests, Hamburg, 59 p.
- Eichhorn, J., Szepesi, A., Ferretti, M., Durrant, D., Roskams, P., 2006. Manual on the methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests, part IV: visual assessment of crown condition and damaging agents. UNECE, ICP Forests, Hamburg, 61 p.
- Fabiánek, J., 2004. Forest Condition Monitoring in the Czech Republic, 1984-2003. Ministère de l'Agriculture de la République Tchèque, Institut de la Foresterie et de la Chasse, Prague, 431 p.
- Fischer, R., Lorenz, M., Grancke, O., Mues, V., Iost, S., Van Dobben, H., Reinds, G.J., De Vries, W., 2010. Forest Condition in Europe, 2010 – Technical Report of ICP Forests. Work Report of the Institute for World Forestry 2010/1. ICP Forests Hamburg, 175 p.
- 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.
- Göttlein, A., Pruscha, H., 1996. Der Einfluss von Bestandeskenngrößen, Topographie, Standort und Witterung auf die Entwicklung des Kronenzustandes im Bereich des Forstamtes Rothenbuch. Forstw. Cbl. 115, 146-162.

- Hildebrandt, G., 1992. Applications de la télédétection à l'observation de l'état sanitaire des forêts. Commission des Communautés Européennes, Direction Générale de l'Agriculture, 109 p.
- 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
- 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.
- Landis, J., et Koch, G., 1977. The Measure of Observer Agreement and Categorical Data. *Biometrics*, 33, 159-174.
- Langohr, R., 2010. Quelques facteurs édaphiques dans l'écosystème forêt de Soignes. *Forêt Wallonne*, 105, 3-14.
- Lebourgeois, F., 1997. Etude dendrochronologique des 102 peuplements du réseau RENECOFOR. Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques, 307 p.
- Lebourgeois, F., 2005. Analyse des cernes : principes et méthodes de la dendrochronologie. INRA-ENGREF, équipe Écologie Forestière, 40 p.
- 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.
- Ling, K. A., Power, S. A., Ashmore, M. R., 1993. A Survey of the Health of *Fagus sylvatica* in Southern Britain. *Journal of Applied Ecology*, 30, 295-306.
- Paine, D., et Kiser, J., 2003. *Aerial Photography and Image Interpretation* (deuxième édition). Hoboken: éditions Wiley & Sons, 632 p.
- Schmidt, M., 1991. The interrelation of leaf loss and fruiting in beech. *Allgemeine Forstzeitschrift*, 46, 501-503.
- Seidling, W., 1999. Multivariate Statistics within Integrated Studies on Tree Crown Condition in Europe – an Overview (draft). Programme Co-ordinating Centre (PCC), Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH), Institute for World Forestry, Hamburg, 37 p.

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 p.

Timal, G., 2006. Mise à jour de la carte des peuplements. Document annexe de la convention CDAF-IBGE 2003-2005, 5 p.

5. Annexes

Table des tableaux

Tableau 1. Placettes des sous-échantillons. Les numéros correspondent aux identifiants des placettes.....	9
Tableau 2. Moyennes de la défoliation et de la circonférence des arbres visibles et masqués (2010). Les écarts-types sont entre parenthèses.....	20
Tableau 3. Comparaison des défoliations moyennes observées en Europe (2009) et en Belgique (2009, 2010) (réseau ICP Forests).....	25
Tableau 4. Paramètre de la droite de régression (hêtre, 2010).....	37
Tableau 5. Symptômes et dommages les plus fréquemment notés en 2010 (chênes et hêtre confondus).....	43
Tableau 6. Caractéristiques principales des orthophotoplans utilisées pour la photo-interprétation	50
Tableau 7. Classes d'état de la couronne, définies par Hildebrandt (1992) et leurs équivalences en termes de défoliation (hêtre et chênes).....	52
Tableau 8. Matrice de confusion de la photo-interprétation sur les images CIR 2009, clef d'Hildebrandt (49 arbres) - 28 arbres ont été correctement classés.....	53
Tableau 9. Exactitudes pour le réalisateur et l'utilisateur.....	54
Tableau 10. Matrice de confusion de la photo-interprétation (classes de défoliation) sur les images CIR 2009, clef adaptée (65 arbres) - 54 arbres ont été correctement classés.....	55
Tableau 11. Exactitudes pour le réalisateur et l'utilisateur.....	55
Tableau 12. Matrice de confusion de la photo-interprétation (6 classes de défoliation) sur les images CIR 2009, clef adaptée (65 arbres) - 41 arbres ont été correctement classés.	56
Tableau 13. Exactitudes pour le réalisateur et l'utilisateur.....	56
Tableau 14. Comparaison entre les observations de terrain (été 2009) et la photo-interprétation des orthophotoplans de 2006 et de 2009.	57
Tableau 15. Matrice de confusion de la photo-interprétation (classes de défoliation) par stéréoscopie (19 arbres) - 5 arbres ont été correctement classés.....	58
Tableau 16. Exactitudes pour le réalisateur et l'utilisateur.....	59
Tableau 17. Matrice de confusion de la photo-interprétation (structure de la couronne) par stéréoscopie (19 hêtres) - 8 arbres ont été correctement classés.....	60

Tableau 18. Exactitudes pour le réalisateur et l'utilisateur.....	60
Tableau 19. Classement relatif des 19 arbres interprétés par stéréoscopie	61
Tableau 20. Vue synoptique des exactitudes totales et des coefficients d'exactitude pour les trois interprétations des classes de défoliation	62
Tableau 21. Temps nécessaire pour les deux méthodes de photo-interprétation.....	63
Tableau 22. Nombre d'arbres et circonférence moyenne par placette. Les écarts-types sont entre parenthèses.	72
Tableau 23. Résultats détaillés des photo-interprétations effectuées.....	78

Table des figures

Figure 1. Proportions des types de peuplements en forêt de Soignes bruxelloise (Timal, 2006)	8
Figure 2. Positions des placettes des sous-échantillons – années paires	10
Figure 3. Positions des placettes des sous-échantillons – années impaires.....	11
Figure 4. Distribution des arbres selon les classes de circonférences (142 hêtres, 2010).....	13
Figure 5. Distribution des arbres selon les classes de circonférences (51 chênes, 2010)	13
Figure 6. Distribution des arbres observés selon le degré de concurrence (2010).....	14
Figure 7. Distribution des arbres observés selon le statut social (2010)	15
Figure 8. Distribution des arbres observés selon le degré de visibilité (2010)	16
Figure 9. Comparaison des estimations de la défoliation sur les placettes contrôlées (47 arbres).	18
Figure 10. Défoliation moyenne par essence, 2010 (arbres masqués inclus)	19
Figure 11. Défoliation moyenne par essence, 2010 (arbres masqués exclus).....	20
Figure 12. Distribution des arbres notés selon les classes de défoliation, 2010 (arbres masqués inclus)	21
Figure 13. 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)	22
Figure 14. Évolution de la défoliation (hêtre, chênes indigènes, épicéa) sur l'ancien réseau de niveau I de Wallonie, entre 1993 et 2009 (C. Laurent, SPW, communication personnelle) ...	22
Figure 15. Évolution de la défoliation (hêtre) sur le réseau II de Wallonie, entre 1996 et 2010 (n=52 pour chaque placette)	23
Figure 16. Évolution de la défoliation (hêtre) sur le réseau I en Flandre, entre 1987 et 2010 (G. Sioen, communication personnelle)	23
Figure 17. Évolution de la défoliation (hêtre) sur la placette de Tervuren (forêt de Soignes flamande), entre 1987 et 2010 (G. Sioen, communication personnelle).....	24
Figure 18. Évolution de la défoliation (hêtre) sur la placette de Hoeilaart (forêt de Soignes flamande), entre 1995 et 2010 (G. Sioen, communication personnelle).....	24
Figure 19. Défoliation moyenne en 2009 et en 2010 pour le hêtre (totalité des arbres notés chaque année)	25
Figure 20. Défoliation moyenne en 2009 et en 2010 pour le chêne (totalité des arbres notés chaque année)	26
Figure 21. Défoliation moyenne en 2009 et 2010 pour le hêtre (arbres notés en 2009 et 2010)	26

Figure 22. Défoliation moyenne en 2009 et 2010 pour le chêne (arbres notés en 2009 et 2010)	27
Figure 23. Comparaison des défoliations entre 2009 et 2010.	27
Figure 24. Défoliation en fonction de la circonférence du tronc (hêtre)	28
Figure 25. Défoliation en fonction de la circonférence du tronc (chênes)	28
Figure 26. Distribution des arbres observés selon les niveaux de fructification et l'essence	29
Figure 27. Distribution des hêtres selon la circonférence du tronc et le niveau de fructification (2009)	30
Figure 28. Distribution des hêtres selon la circonférence du tronc et le niveau de fructification (2010)	30
Figure 29. Distribution des arbres observés selon les classes de décoloration (2010)	31
Figure 30. Les quatre stades du hêtre, avec leurs codes (Eichhorn et al., 2006)	32
Figure 31. Les quatre stades des chênes, avec leurs codes (Eichhorn et al., 2006)	32
Figure 32. Distribution des arbres observés selon les structures de la couronne (2010)	33
Figure 33. Distribution des arbres observés selon le volume de pousses épïcormiques (2010)	34
Figure 34. Défoliations moyennes par classes de circonférence (hêtre)	36
Figure 35. Défoliations moyennes par classes de circonférence (chênes)	36
Figure 36. Droite de régression entre la circonférence et la défoliation (hêtre, 2010)	37
Figure 37. Défoliation moyenne par niveau de fructification (hêtre, 2010)	38
Figure 38. Défoliation moyenne par structure de la couronne (hêtre)	39
Figure 39. Défoliation moyenne par structure de la couronne (chênes)	40
Figure 40. Défoliation moyenne selon la concurrence (hêtre)	41
Figure 41. Défoliation moyenne selon la concurrence (chênes)	41
Figure 42. Circonférence moyenne pour chaque degré de concurrence (hêtre)	42
Figure 43. Circonférence moyenne pour chaque degré de concurrence (chênes)	42
Figure 44. Distribution des symptômes et dommages signalés en 2010 selon les essences. Plusieurs symptômes ou dommages peuvent être signalés pour chaque arbre.	44
Figure 45. <i>Ustilina deusta</i> sur une souche de chêne, forêt de Soignes, juillet 2010.	44
Figure 46. Orthophotoplans CIR 2006 couvrant la Forêt de Soignes bruxelloise.	51

Figure 47. Orthophotoplans CIR 2009 couvrant la Forêt de Soignes bruxelloise.	51
Figure 48. Interprétation sur l'orthophotoplan CIR 2009.....	53
Figure 49. Hêtre de teinte grisâtre, rangé en classe 2.....	54
Figure 50. Distribution des arbres photo-interprétés selon les classes de défoliation (Tableau 7)	57
Figure 51. Concordance entre les défoliations estimées par stéréoscopie et les défoliations estimées sur le terrain (référence).	59

Tableau 22. Nombre d'arbres et circonférence moyenne par placette. Les écarts-types sont entre parenthèses.

<i>Placettes</i>	<i>Ss-éch. (année paire ou impaire)</i>	<i>Essence</i>	<i>Nombres d'arbres</i>		<i>Circonférence moyenne (cm)</i>				<i>Défoliation moyenne (%)</i>			
			2009	2010	2009		2010		2009		2010	
2791	Paire	Hêtre	10	10	142	(23)	147	(21)	34	(13,9)	22,5	(6,3)
		Chênes		7			111	(27)	36,7	(10,9)	28,75	(8,3)
2877	Paire	Hêtre	9	9	215	(37)	219	(37)	45		30,6	(17,8)
		Chênes	1	1	193		195		65		20	
2879	Paire	Hêtre	1	1	224		121		48,75		70	
3031	Impaire	Hêtre	8		186	(24)			25	(12,7)		
3033	Impaire	Hêtre	5	6	181	(53)	169	(59)	25	(12,7)	26	(11,9)
		Chênes	1	1	107		169		37,5		35	
3197	Paire	Hêtre	11	11	188	(54)	186	(56)	42,5	(17,1)	32,2	(8,7)
		Chênes		2			209	(57)	35		35	(7,1)
3345	Impaire	Hêtre	8		207	(40)			39,3	(17)		
3349	Impaire	Hêtre	4		253	(29)			39,2	(10,8)		
3509	Paire	Hêtre	7	8	193	(41)	180	(55)	40	(13,7)	31,4	(15,7)
3511	Paire	Hêtre	7	7	229	(50)	228	(48)	22,5	(17,7)	32,9	(12,5)
3595	Paire	Hêtre	1		287				39			(7,6)
		Chênes	3	4	227	(52)	224	(44)	60	(3,5)	33,3	
3669	Impaire	Hêtre	8		227	(28)			35,8	(13,9)	22,1	
3671	Impaire	Hêtre	1		256				35			
3831	Paire	Hêtre	7	7	227	(38)	238	(46)	37,9	(12,8)	22,1	(7)
3989	Impaire	Hêtre	5		266	(37)			25	(6,1)		

<i>Placettes</i>	<i>Ss-éch. (année paire ou impaire)</i>	<i>Essence</i>	<i>Nombres d'arbres</i>		<i>Circonférence moyenne (cm)</i>				<i>Défoliation moyenne (%)</i>		
			2009	2010	2009		2010		2009		2010
4145	Paire	Hêtre	8	8	198	(41)	198	(41)	(15,5)	25	(12,2)
4147	Paire	Hêtre	6	10	115	(15)	101,6	(19)	(5)	25	(7,1)
		Chênes	3		288	(80)			26,3		
4151	Paire	Hêtre	4	5	139	(24)	128	(34)	35		
		Chênes	5	7	121	(15)	110	(22)	48	(2,5)	31,25 (11,1)
4307	Impaire	Hêtre	2		221	(81)			31	(35,4)	
4309	Impaire	Hêtre	5		217	(12)			(9,7)		
4449	Paire	Quercus	5	15	168	(108)	118	(68)	(7,4)	18,3	(4,4)
4458	Paire	Hêtre	4	10	160	(97)	125	(67)	62,5	12,5	(3,5)
4467	Paire	Hêtre	7	10	111	(10)	104	(15)	29	12,5	(2,9)
4469	Paire	Hêtre	4	4	250	(34)	253	(36)	32,9	(19,4)	50 (26,8)
4529	Paire	Hêtre	5	5	146	(63)	146	(63)	27,5	(5,5)	24 (9,6)
		Chênes		10			105	(14)	55		36 (12,4)
4618	Impaire	Hêtre	12		133	(31)			29,2	(10,4)	
4625	Impaire	Hêtre	4		152	(80)			20	(8,2)	
		Chênes	1		205				33,9		
4778	Paire	Hêtre	9	10	148	(23)	129	(33)	28,6	(9,7)	30 (9,2)
4781	Paire	Hêtre		1			117				
		Chênes	1	4	116		134	(16)	35,8	(7)	31,7 (12,6)
4783	Paire	Hêtre	8	9	213	(56)	218	(54)	38,3	(8)	22,9 (9,1)
4785	Paire	Hêtre	13	10	194	(47)	179	(43)	34		20 (10)
4928	Impaire	Hêtre	4		126	(20)			36,7		
4947	Impaire	Hêtre	6		204	(30)			45	(5,8)	
5101	Impaire	Hêtre	6	1	197	(41)	102		65	(10,8)	40

Tables de la base de données

La base de données est élaborée dans le logiciel MS Access 2003. Elle comporte 5 principales tables (ci-dessous), liées entre elles par les « champs-clefs », ici indiqués en caractères gras. Des tables supplémentaires, appelées « tables dictionnaires », sont constituées des listes qui apparaissent dans les menus déroulants de l'interface (non présentés ici).

Table « arbres »

<i>Nom du champ</i>	<i>Description</i>
ID_UE	Numéro de placette (UE)
N°_ARBRE	Numéro de l'arbre
DISTANCE	Distance de l'arbre au centre de la placette (piquet)
AZIMUT	Azimut (p/r Nord) de l'arbre au centre de la placette (piquet)
Arbre_X	X (Lambert 72) de l'arbre
Arbre_Y	Y (Lambert 72) de l'arbre
ARBRE_LONG	Longitude, en degrés décimaux, de l'arbre
ARBRE_LAT	Latitude, en degrés décimaux, de l'arbre
ESSENCE	Espèce de l'arbre (hêtre, HE, chêne pédonculé, CP, ou chêne sessile, CS).
GENRE	Genre (taxonomique) de l'arbre
NERVURES_INTER_1	Nombre de nervures intercalaires de la première feuille de chêne
LONG_PETIOLE_1	Longueur du pétiole de la première feuille de chêne
NERVURES_INTER_2	Nombre de nervures intercalaires de la deuxième feuille de chêne
LONG_PETIOLE_2	Longueur du pétiole de la deuxième feuille de chêne
NERVURES_INTER_3	Nombre de nervures intercalaires de la troisième feuille de chêne
LONG_PETIOLE_3	Longueur du pétiole de la troisième feuille de chêne
NERVURES_INTER_MOY	Longueur du pétiole des trois feuilles mesurées de chêne
LONG_PETIOLE_MOY	Longueur moyenne du pétiole des trois feuilles mesurées de chêne
IDENT_CHEN	Indice d'identification des chênes
ESS_CHENE	Espèce du chêne (pédonculé ou sessile)
REMARQ	Commentaires libres

Les champs « NERVURES_INTER », « LONG_PETIOLE », « IDENT_CHEN » et « ESS_CHENE » se rapportent aux mesures de feuilles de chênes pour la détermination de l'essence par la méthode de Kremer.

Table « état_houppier »

<i>Nom du champ</i>	<i>Description</i>
ID_UE	Numéro identifiant la placette
N°_ARBRE	Numéro de l'arbre
DATE_OBSERVATION	Date de l'observation
C150	Circonférence, mesurée en cm à 1,5 m de hauteur
HISTORIQUE	Etat de l'arbre (martelé, exploité, etc.)
CLAS_SOCIA	Hierarchie de l'arbre (dominant, surcimé...)
OMBRE	Degré de concurrence de l'arbre (touché sur 1 ou plusieurs côtés)
VISIBILITE	Degré de visibilité de l'arbre (complète ou partielle, contre-jour, masqué)
DEFOLIATIO	Pourcentage de défoliation
DECOLORATI	Niveau de décoloration
FRUITS_HOB	Volume de fruits dans la couronne évaluable
FRUITS_HEN	Volume de fruits dans la couronne entier
GOURMANDS	Volume de pousses épicorniques sur le tronc
FORME_H	Forme de la couronne (degré de simplification)
REMARQ	Commentaires libres

Les différents champs correspondent aux critères de l'ICP Forests décrivant l'état de la couronne.

Table « Dommages »

<i>Nom du champ</i>	<i>Description</i>
ID_UE	Numéro identifiant la placette
N°_ARBRE	Numéro de l'arbre
DATE_OBSERVATION	Date de l'observation
PARTIE_AFF	Partie affectée par le dommage/symptôme
LOCALISATI	Localisation du dommage/symptôme dans la couronne
SYMPTOME	Description sommaire du dommage/symptôme
SPECIFICAT	Description détaillée du dommage/symptôme
ANCIENNETE	Ancienneté du dommage
CAUSE_CATEGORIE	Catégorie d'agent causal
CAUSE_CLASSE	Classe d'agent causal
CAUSE_TYPE	Type d'agent causal
CAUSE_FACTEUR	Facteur d'agent causal
NOM_SCIENT	Initiales du nom scientifique de l'agent causal (insecte, maladie...)
EXTENSION	Niveau d'extension du dommage/symptôme dans le houppier
REMARQ	Commentaires libres sur les dommages/symptômes observés

Selon que l'agent causal à l'origine du dommage / symptômes observé est connu avec plus ou moins de précision, le code sera rangé dans « CAUSE_CATEGORIE », « CAUSE_CLASSE », « CAUSE_TYPE » ou « CAUSE_FACTEUR », selon la nomenclature prévue par le protocole *ICP Forests*.

Table « observations »

<i>Nom du champ</i>	<i>Description</i>
ID_UE	Numéro identifiant la placette
DATE_OBSERVATION	Date de visite de la placette
ANNEE	Année de la campagne d'observation
TYPE_OBS	Type de l'observation: agents (par les adjoints de BE-IBGE seuls), dirigée (agents et expert) ou de contrôle (experts seuls).
OBS_1	Initiales du premier observateur
OBS_2	Initiales du deuxième observateur
OBS_3	Initiales du troisième observateur
OBS_4	Initiales du quatrième observateur
REMARQ	Commentaires libres

Table « placettes »

<i>Nom du champ</i>	<i>Description</i>
ID_UE	Numéro identifiant la placette
Triage	Triage sur lequel se trouve la placette (en français)
Gebieden	Triage sur lequel se trouve la placette (en néerlandais)
Ss_echant	Désigne le sous-échantillon (année paire ou impaire)
LAMBERT_X	X (Lambert 1972) de la placette (en m)
LAMBERT_Y	Y (Lambert 1972) de la placette (en m)
LATITUDE	Latitude décimale de la placette
LONGITUDE	Longitude décimale de la placette
Date_Installation	Date de l'installation de la placette (le cas échéant)
N°_PEUPEMENT	N° peuplement (le cas échéant)
TYPO	Typologie du peuplement
ANNEE_PLANTATION	Année de plantation du peuplement (le cas échéant)
SOL	Type de sol
REMARQ	Commentaires

Les types de sols (champ « SOL ») sont simplifiés en Aba, Abc, autres sols limoneux et autres sols (nomenclature de la carte des sols de Belgique). La plupart des informations sont tirées de la carte des peuplements de Grégory Timal (2006).

Tableau 23. Résultats détaillés des photo-interprétations effectuées

<i>N° placette</i>	<i>N° arbre</i>	<i>Essence</i>	<i>X (Lambert 72)</i>	<i>Y (Lambert 72)</i>	<i>Défoliation terrain 2009 (%)</i>	<i>Classe de défoliation terrain 2009</i>	<i>Classe de défoliation clef adaptée</i>	<i>Classe de défoliation photo-int. 2006</i>	<i>Classe de défoliation stéréoscopie</i>	<i>Défoliation stéréoscopie (%)</i>
2701	1	CH	150903,49	165311,18	20	1	1	2		
2701	2	CH	150898,41	165305,79	100	4	4	2		
2701	3	CH	151095,94	165148,76	20	1	2	2		
2701	4	CH	151131,35	164882,72	100	4	4			
2701	5	CH	151103,27	164898,51	30	2	2	1		
2701	6	HE	151113,41	164916,12	60	2	2	1		
2701	7	CH	151110,58	164875,41	15	1	0	2		
2782	1	HE	151293,24	163896,14	45	2	2	0		
2782	2	HE	151294,51	163887,17	40	2	2	1		
2782	3	HE	151310,30	163903,95	25	1	1	1		
2783	1	HE	151320,00	163903,31	25	1	1	1		
2783	2	HE	151493,26	163093,11	35	2	2	1		
2783	3	HE	151497,46	162880,66	25	1	2	4		
2783	4	HE	151497,63	162922,62	25	1	2	0		
2784	2	HE	151467,65	162503,02	35	2	2	1		
2867	1	HE	151467,74	162485,01	15	1	1	1		
2867	2	HE	151719,38	162516,47	40	2	2			
2867	3	HE	151699,97	162516,94	15	1	1	1		
2868	1	CH	150905,16	165301,82	25	1	1	1		
2868	2	CH	150910,82	165308,35	40	2	2	1		
2868	3	HE	150913,78	165303,20	20	1	1	2		
2868	4	CH	150892,81	165304,42	40	2	2	2		
2870	1	CH	150893,43	165300,24	45	2	2	1	2	30
2870	2	HE	151298,72	163506,01	25	1	1	1	1	20
2870	3	HE	151303,76	163481,49	35	2	2	1	2	30
2870	4	HE	151298,60	163480,46	25	1	2	1		
2870	5	HE	151090,42	164702,80	20	1	1	1		
2871	1	HE	151095,51	164693,93	25	1	1		2	25

<i>N° placette</i>	<i>N° arbre</i>	<i>Essence</i>	<i>X (Lambert 72)</i>	<i>Y (Lambert 72)</i>	<i>Défoliation terrain 2009 (%)</i>	<i>Classe de défoliation terrain 2009</i>	<i>Classe de défoliation clef adaptée</i>	<i>Classe de défoliation photo-int. 2006</i>	<i>Classe de défoliation stéréoscopie</i>	<i>Défoliation stéréoscopie (%)</i>
2871	2	HE	151300,89	164129,75	25	1	1	2	2	25
2871	3	HE	151300,14	164109,25	40	2	1		2	20
2871	4	HE	151310,92	163301,94	50	2	2	2	3	30
2877	10	CH	151298,82	163307,14	20	1	1			
2952	3	HE	151308,73	163319,72	35	2	2			
2952	4	HE	151324,32	163299,58	30	2	2			
2952	5	HE	151484,39	163102,39	30	2	2	2		
2952	6	HE	151503,10	163083,76	30	2	1	2		
2953	1	HE	151478,36	163087,35	40	2	2	2	2	30
2953	2	HE	151525,21	162890,31	30	2	2	2	2	40
2953	3	HE	151717,72	162502,72	50	2	2	2	1	25
2953	4	HE	151706,71	162500,06	50	2	2	2	3	40
2955	1	HE	151698,23	162491,52	40	2	2		0	20
2955	3	CH	151732,04	162275,60	20	1	1	1	1	30
3031	2	CH	151705,31	162263,01	10	0	1			
3031	5	CH	151124,51	165102,15	10	0	0			
3031	6	CH	151097,56	165072,34	5	0	1			
3033	3	HE	154118,93	163689,62	45	2	2			
3033	6	HE	154103,13	163704,04	30	2	2			
3033	7	HE	154107,65	163683,10	35	2	2			
3035	1	HE	154094,86	163701,66	35	2	2	1	2	35
3035	2	HE	151694,29	163289,75	70	2	3		3	50
3035	4	HE	151701,76	163284,26	40	2	2		2	30
3035	5	HE	151718,80	162891,74	10	0	1	2	3	45
3035	6	HE	151693,49	162912,31	40	2	2			
3035	7	HE	151688,42	162904,08	25	1	2		3	45
3036	1	CH	151287,78	162112,40	45	2	2		1	35
3036	2	HE	155502,32	167698,39	20	1	1		2	30
3989	2	HE	155507,06	167707,37	30	2	2			
3989	3	HE	155493,19	167692,25	30	2	1			

<i>N° placette</i>	<i>N° arbre</i>	<i>Essence</i>	<i>X (Lambert 72)</i>	<i>Y (Lambert 72)</i>	<i>Défoliation terrain 2009 (%)</i>	<i>Classe de défoliation terrain 2009</i>	<i>Classe de défoliation clef adaptée</i>	<i>Classe de défoliation photo-int. 2006</i>	<i>Classe de défoliation stéréoscopie</i>	<i>Défoliation stéréoscopie (%)</i>
3989	4	HE	155510,89	167685,36	30	2	2			
3989	5	HE	154092,24	163689,33	30	2	2			
3989	7	HE	151713,49	163296,14	40	2	2			
4529	3	HE	151498,49	162889,37	25	1	2			
4529	6	HE	151682,37	162482,50	20	1	1			
4529	9	HE	151315,08	163508,51	25	1	1			
4529	16	HE	151305,35	164065,27	25	1	1			

Université catholique de
Louvain

Service Public de Wallonie –
Département de la Nature et des
Forêts

Earth and Life Institute
Environmental Sciences



Suivi de l'état sanitaire par télédétection en forêt wallonne

-

2010

Promoteurs
Prof. Q. Ponette
Prof. P. Defourny

Réalisation
Dr. Julien Radoux (Région wallonne)

Novembre 2010

Table des matières

1. Données utilisées.....	83
2. Localisation des houppiers.....	83
2.1. Localisation sur le terrain.....	83
2.2. Ajustement sur l'image.....	83
3. Extraction des houppiers.....	84
3.1. Approche générale.....	84
3.2. Délimitation des houppiers.....	84
3.3. Séparation des houppiers.....	85
3.4. Combinaison des résultats.....	86
4. Caractérisation spectrale.....	86
4.1. Extraction de l'information.....	86
4.2. Bandes spectrales.....	87
4.3. Indices de végétation.....	87
4.4. Teinte.....	88
4.5. Caractérisation morphologique.....	88
5. Analyse des résultats.....	89
5.1. Extraction des houppiers.....	89
5.2. Radiométrie.....	89
5.3. Morphométrie.....	91
6. Conclusions.....	91
7. Perspectives.....	92
8. Analyses complémentaires.....	92
9. Bibliographie.....	93

1. Données utilisées

En début de projet, la possibilité d'utiliser des images hyperspectrales provenant d'un autre projet avait été soulevée. A cause des mauvaises conditions météorologiques, l'acquisition de ces données hyperspectrales a été retardée. Les images, qui étaient de mauvaise qualité, ne nous ont pas été fournies. Dès lors, le potentiel de ces images n'a pas pu être évalué.

Seules les photographies aériennes de la Région wallonne ont donc été testées. Ces orthophotos couvrent la Wallonie, en moyenne tous les 3 ans. La résolution spatiale des images 2009-2010 est de 25 cm. Le site de Léglise a été sélectionné car il avait été couvert en 2009 (les images acquises en 2010 n'étant pas encore disponibles au moment du projet). L'autre avantage de ce site est la proximité de parcelles du réseau ardennais et du réseau intensif.

2. Localisation des houppiers

2.1. *Localisation sur le terrain*

La localisation des arbres sur le terrain a consisté à mesurer la position de chaque arbre en relatif sur base d'un théodolite laser (mesure d'azimut et de distance). Concrètement, il a fallu deux journées de travail avec une équipe de 3 personnes pour réaliser ce travail. Au total, 680 résineux (épicéa) et 120 feuillus (hêtres) ont été localisés; L'encodage a ensuite pris une journée. Il faut noter que plusieurs arbres n'ont pas pu être numérotés car leur numéro était illisible (mousse, craquelure d'écorce). Nous suggérons donc de prévoir un plan de localisation des arbres lors de l'installation de futurs dispositifs prévus pour le suivi d'arbre long terme, afin d'en garantir un meilleur suivi. Par ailleurs, contrairement à l'exercice de localisation effectué en forêt de Soignes dans des placettes relativement hétérogènes, seule la localisation d'arbres de bordure était possible sur les images faute de points de repères fiables.

2.2. *Ajustement sur l'image*

Le nuage de points obtenu à partir des couples « distance-azimut » est ensuite recalé sur l'image par ajustement des moindres carrés afin de positionner les différents houppiers. L'erreur quadratique moyenne pour ces ajustements était de l'ordre de 1 m, ce qui est suffisant pour localiser un arbre par photo-interprétation mais, comme nous le verrons plus tard, relativement imprécis dans le cadre de méthode automatiques. Ces décalages sont principalement liés 1) à la difficulté d'identifier un arbre sur le terrain à partir d'une image et 2) aux différences de hauteurs entre les arbres qui conduisent à des variations du déplacement apparent. Un exemple de calage est illustré sur figure 1. Dans cet exemple, on peut voir que l'arbre 31 est mal positionné et que l'arbre 62 est ombragé.

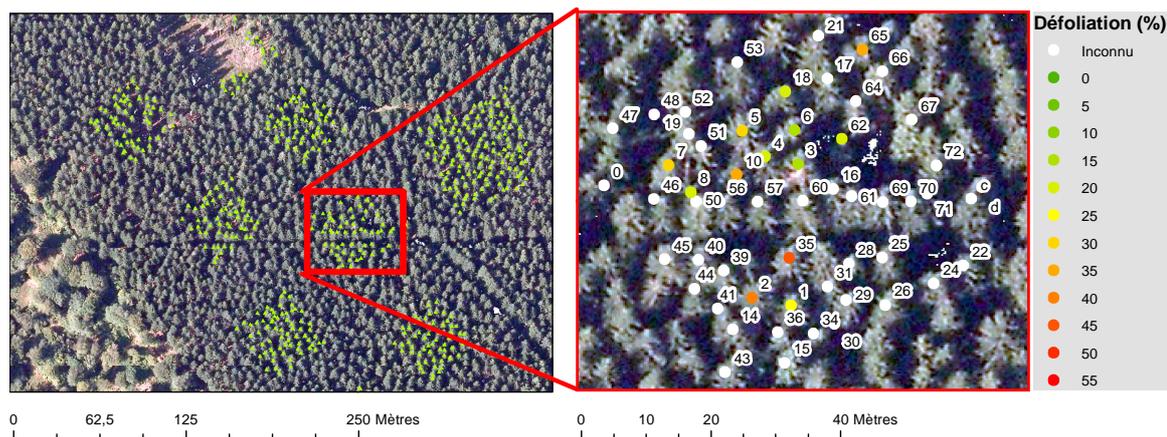


Figure 1 : aperçu du site de Léglise avec la spatialisation des arbres dans les différentes placettes d'inventaire.

3. Extraction des houppiers

3.1. Approche générale

Vu la variabilité spectrale au sein d'un même houppier (observable à la résolution spatiale de 25 cm des images utilisées) la caractérisation d'un arbre nécessite une extraction préalable de chaque houppier. L'utilisation de valeurs moyennes pour chaque houppier permet ensuite une meilleure classification que pour un pixel seul (Leckie et al, 2002).

Wang et al (2004) proposent une approche en deux étapes pour l'extraction de houppiers. La première étape consiste à délimiter les couronnes, en d'autre terme à séparer les parties éclairées des houppiers de l'arrière-plan de l'image. Cependant, vu que de nombreux houppiers apparaissent jointifs sur les photographies aériennes, il est ensuite nécessaire de les séparer pour pouvoir les traiter individuellement. Une seconde étape vise alors à identifier chaque sommet de houppier afin de séparer les arbres adjacents. Nous avons donc comparé différentes méthodes pour chacune de ces étapes : distinguer les houppiers de l'arrière plan (délimitation) et séparer les houppiers jointifs (séparation).

3.2. Délimitation des houppiers

Contrairement à la majorité des recherches dans le domaine, nous n'avons pas utilisé la détection de gradient pour délimiter les houppiers. En effet, cette méthode nécessite un lissage de l'image qui réduit la précision des limites. Vu le bon contraste entre les houppiers illuminés et les zones ombragées, un seuil sur l'intensité a permis de séparer nettement ces deux classes. Dans l'hypothèse que la zone ne comprend que ces deux classes, le seuil a été fixé au minimum de l'histogramme de fréquence des intensités, ce qui minimise les erreurs (optimum bayésien). Comme le montre la figure 1, les deux distributions étaient bien séparables. Cette méthode a été appliquée par pixels et pour des objets issus de la segmentation automatique des images par le logiciel eCognition (figure 2). On constate que l'approche par pixel présente un aspect « poivre et sel » qui est évité avec l'utilisation des objets. D'un autre côté, vu le petit nombre de pixels (19 en moyenne) par houppier, il est intéressant d'éviter les pixels de valeur extrême car leur influence sur la moyenne du houppier est non négligeable.

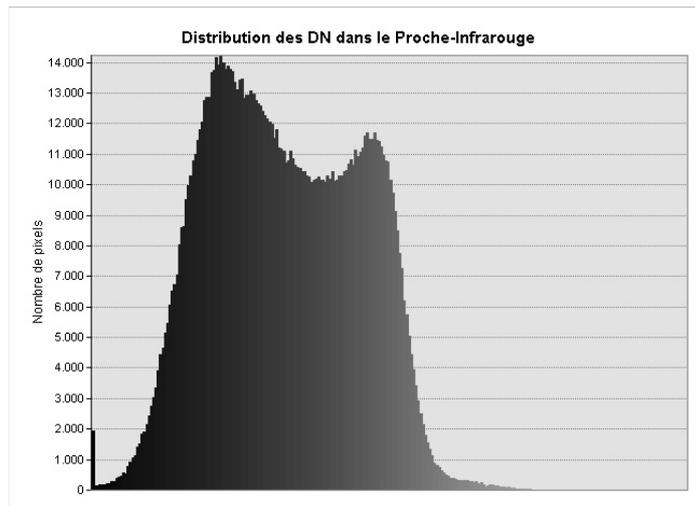


Figure 2 : Histogramme de fréquence des DN pour la bande spectrale du proche-infrarouge. Le pic de gauche correspond aux zones d'ombre et celui de droite aux houppiers

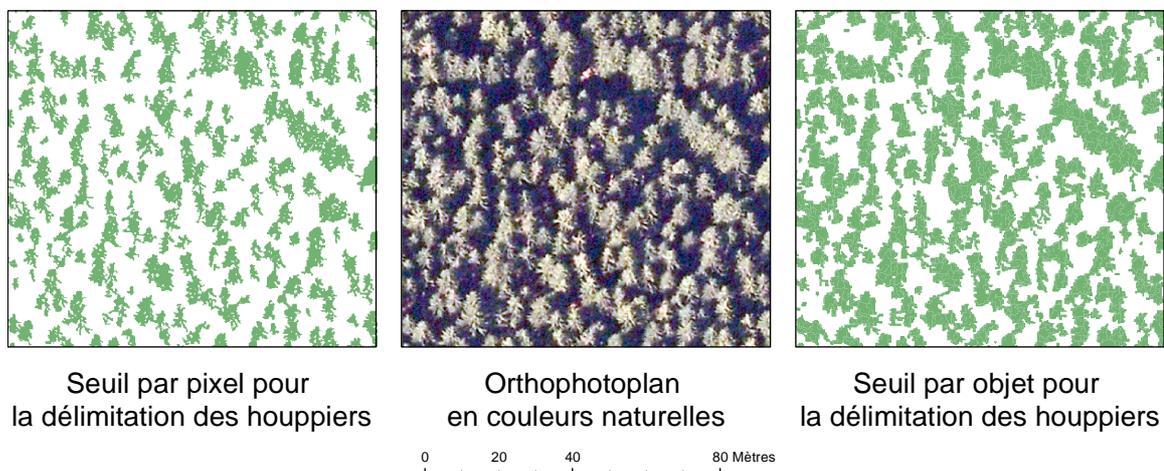


Figure 3 : Discrimination entre les parties éclairées des houppiers et l'arrière-plan ombragé par seuil automatique appliqué par pixel (gauche) et par objets (droite).

3.3. Séparation des houppiers

Comme le montre la figure 3, de nombreux houppiers sont jointifs. Afin de les séparer, nous avons comparé un algorithme venant de la littérature et un nouvel algorithme. Par ailleurs, un filtre de maxima locaux adapté aux objets a été appliqué afin d'extraire directement les houppiers pour l'approche par segmentation d'image.

Le premier algorithme consiste à délimiter les houppiers comme s'ils étaient des bassins versants (Vincent and Soille, 1991). En pratique, on inverse l'intensité afin que les ombres occupent des valeurs élevées (crêtes) et les sommets des houppiers soient dans des creux. Un modèle hydrologique permet ensuite de déterminer toute la zone « drainée » par chaque houppier. Afin de limiter le nombre de minima locaux (et donc d'éviter de surestimer le nombre de houppiers), les valeurs d'intensité étaient préalablement lissées par un filtre « passe bas ». A noter que nous avons également testé la première composante principale à la place de l'intensité, mais ces deux bandes étaient peu différentes et l'intensité est à la fois plus robuste et plus proche de l'interprétation visuelle.

Le nouvel algorithme que nous avons testé nécessite un ensemencement par des points représentant les houppiers potentiels. Chaque houppier potentiel se voit ensuite allouer un polygone basé sur les points les plus proches en tenant compte d'une matrice de friction. Cette matrice de friction, qui fait état de la difficulté à traverser un pixel, est ici l'inverse de l'intensité des pixels afin que les pixels sombres agissent comme des obstacles. Les houppiers potentiels ont été définis sur base des maxima locaux (après lissage, méthode de Dralle et Rudemo, 1996) ainsi qu'à partir des houppiers localisés sur le terrain.

3.4. *Combinaison des résultats*

Le résultat final est obtenu par croisement entre les limites de houppiers jointifs et les aires d'influences de chaque houppier. Les artefacts obtenus par le croisement de ces deux couches sont ensuite éliminés par des procédures automatiques. La figure 4 illustre les principales étapes.

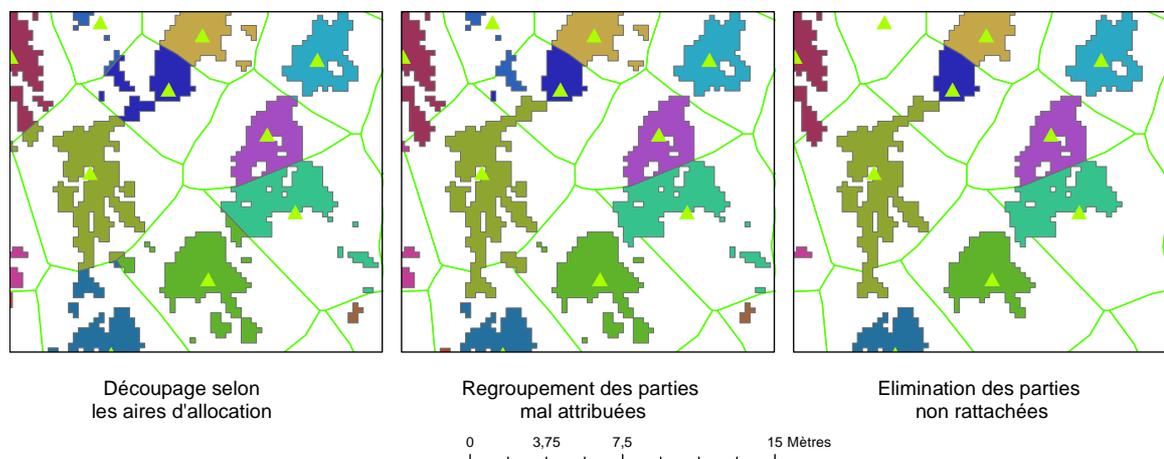


Figure 4 : Étapes du nettoyage des houppiers.

4. Caractérisation spectrale

4.1. *Extraction de l'information*

Le fait de travailler avec des orthophotos produits dans le but est d'être visualisés compliquent l'analyse du signal vu que les niveaux de gris ne peuvent pas être traduits en valeurs de réflectance. Les valeurs décrites ci-dessous sont donc proposées en DN (Digit Number) qui, dans ce cas, sont codés en 8 bits (de 0 à 255) et n'ont pas de dimension. Par ailleurs, on constate une troncation de l'histogramme dans les zones d'ombre, surtout pour le vert et le bleu, mais également pour le rouge (figure 5) et, très légèrement, dans le proche-infrarouge. Les analyses sont donc envisagées en relatif et image par image. Vu le grand nombre d'arbres présents sur chaque image (plusieurs milliers), cette approche est à la fois la plus robuste et la plus pragmatique. En effet, les méthodes de segmentation utilisées nécessitent souvent de grosses ressources de calcul.

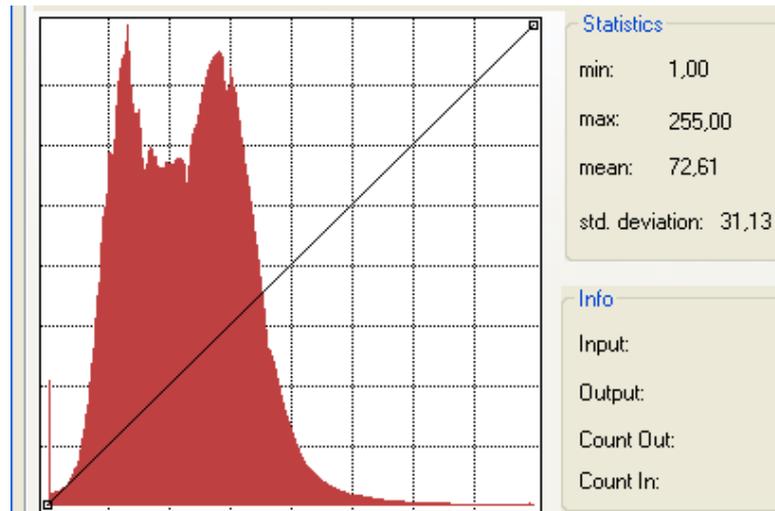


Figure 5 : histogramme des niveaux de gris dans la bande spectrale du rouge. On constate que la distribution est tronquée à gauche : toutes les valeurs < 0 sont ramenées à 0.

Les statistiques extraites pour chaque arbre sont la moyenne, le minimum, le maximum et l'écart type pour chaque caractéristique spectrale. Etant donné que les valeurs minimales et maximales se sont avérées peu fiables et fort sensibles à la méthode de segmentation, ces valeurs ont toutefois été abandonnées. L'écart type a quant à lui permis de comparer la variabilité à l'intérieur d'une couronne et la variabilité entre couronnes mais n'a pas été utilisé comme variable explicative. En effet, de nombreux houppiers comptaient moins de 10 pixels, ce qui rend la mesure d'écart type peu robuste.

4.2. *Bandes spectrales*

Les bandes disponibles sont le bleu, le vert, le rouge et le proche infra-rouge. Il est utile de signaler que les orthophotoplans de la région wallonne sont prévus pour être affichés facilement en couleurs naturelles. L'ordre des bandes spectrales est donc 1) Rouge, 2) Vert, 3) Bleu et 4) Proche-infrarouge. Cet ordre est inhabituel pour des données de télédétection.

La réflectance dans le bleu et le rouge peut être liée à l'activité photosynthétique, qui absorbe une grande partie du rayonnement dans ces longueurs d'onde. Le proche-infra-rouge est quant à lui fortement réfléchi. Ce phénomène est lié à la turgescence des parois des cellules mésenchyme des feuilles (Knipling, 1970).

4.3. *Indices de végétation*

Les indices de végétation utilisés sont le NDVI (Normalized difference vegetation index) et le GI (greenness index).

Le premier est couramment utilisé en traitement d'image car il est peu sensible aux différences de luminosité. Il mesure en effet la différence normalisée entre le PIR et le R (équation 1).

$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R}) \quad (1)$$

Le second a été développé pour mettre en évidence la végétation verte sur des photographies numériques. Il consiste simplement à faire la différence entre le vert (réfléchi par la végétation) et les deux autres bandes visibles (bleu et rouge).(équation 2)

$$GI = 2 * G - (R + B) \quad (2)$$

4.4. *Teinte*

La teinte est obtenue par transformation de l'espace de couleur « RGB » en un autre espace de couleur comprenant la teinte, la saturation et l'intensité de la couleur. Cette transformation ne se base pas sur des propriétés physique de la lumière mais s'approche plus de la perception des couleurs par l'homme. L'utilisation de la teinte permet par ailleurs de s'affranchir d'une partie des effets d'illumination.

4.5. *Caractérisation morphologique*

La caractérisation de la forme des houppiers a été réalisée sur base de l'indice de forme ($16 * \text{surface} / \text{périmètre}^2$). Cet indice permet d'évaluer la compacité d'un objet en mesurant son éloignement par rapport au carré (dont l'indice de forme vaut 1).

5. Analyse des résultats

5.1. *Extraction des houppiers*

Le tableau 1 reprend la concordance entre les houppiers délimités et les houppiers attendus. En général, les différentes méthodes sont performantes bien que le nombre de fausses détections reste élevé, surtout pour la méthode « bassins versants ».

	Pourcentage d'arbres correctement isolés	Pourcentage de fausses détections
Bassins versants	89	35
Allocation sur base des maxima locaux	86	11
Segmentation eCognition	80	20

Par ailleurs, il faut noter que la méthode de délimitation des houppiers basée sur les données de terrain est efficace à 100% d'après les critères classiques de contrôle de qualité. En effet, chaque arbre se voit attribuer une et une seule zone, par construction. Un pourcent des arbres localisés à partir des levés de terrain n'a toutefois pas été corroboré par photo-interprétation, soit que le couple « azimut-distance » était incorrect, soit que l'arbre était invisible sur l'image. En d'autres termes, les erreurs illustrées par la figure 1 sont propagées par la méthode proposée. Les trois méthodes pour localiser les aires d'influence de chaque arbre sont illustrées ci-dessous (figure 6).

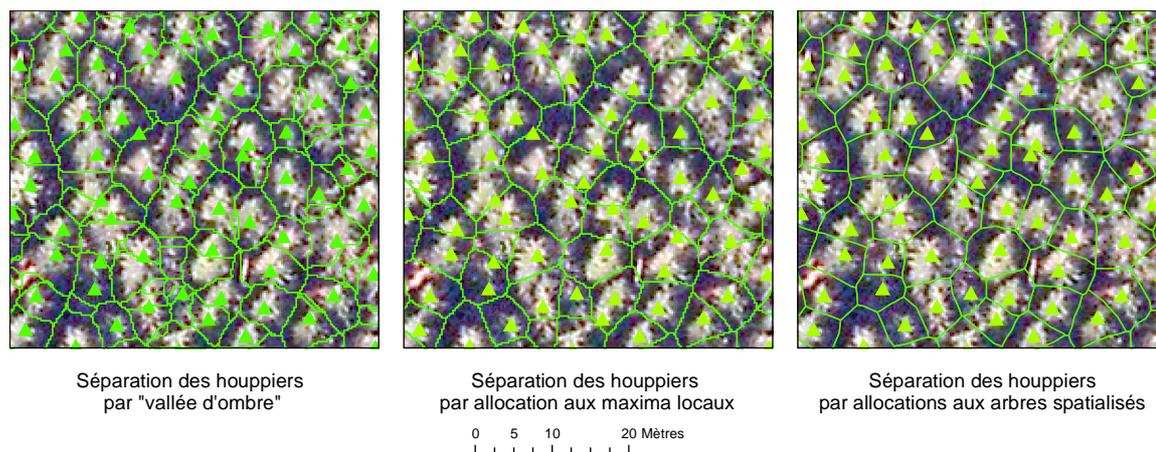


Figure 6 : illustration des différentes méthodes de séparation des houppiers. Les triangles représentent les arbres localisés à partir des données de terrain.

5.2. *Radiométrie*

Globalement, force est de constater que les valeurs spectrales sont peu représentatives de la défoliation observée sur le terrain pour les épicéas. Quelle que soit la méthode de délimitation des houppiers, seuls les arbres présentant une défoliation importante peuvent être distingués.

En ce qui concerne le potentiel des différents indices pour la délimitation des houppiers, il ressort nettement un problème au niveau du NDVI. Le NDVI présente en effet des valeurs très élevées dans la plupart des zones d'ombre car le dénominateur est alors très petit. Ce résultat n'est pas aberrant car il y a effectivement de la végétation sous couvert (les zones d'ombre sans végétation réagissent correctement), mais les valeurs sont surévaluées à cause de la troncation des histogrammes signalée plus haut. Le GI joue quant à lui bien son rôle en faisant nettement ressortir

les houppiers mais pas la végétation ombragée. La teinte ne permet pas de faire la différence en ce qui concerne la défoliation. L'échantillon était par ailleurs insuffisamment réparti dans les classes de décoloration pour tirer une conclusion à ce sujet.

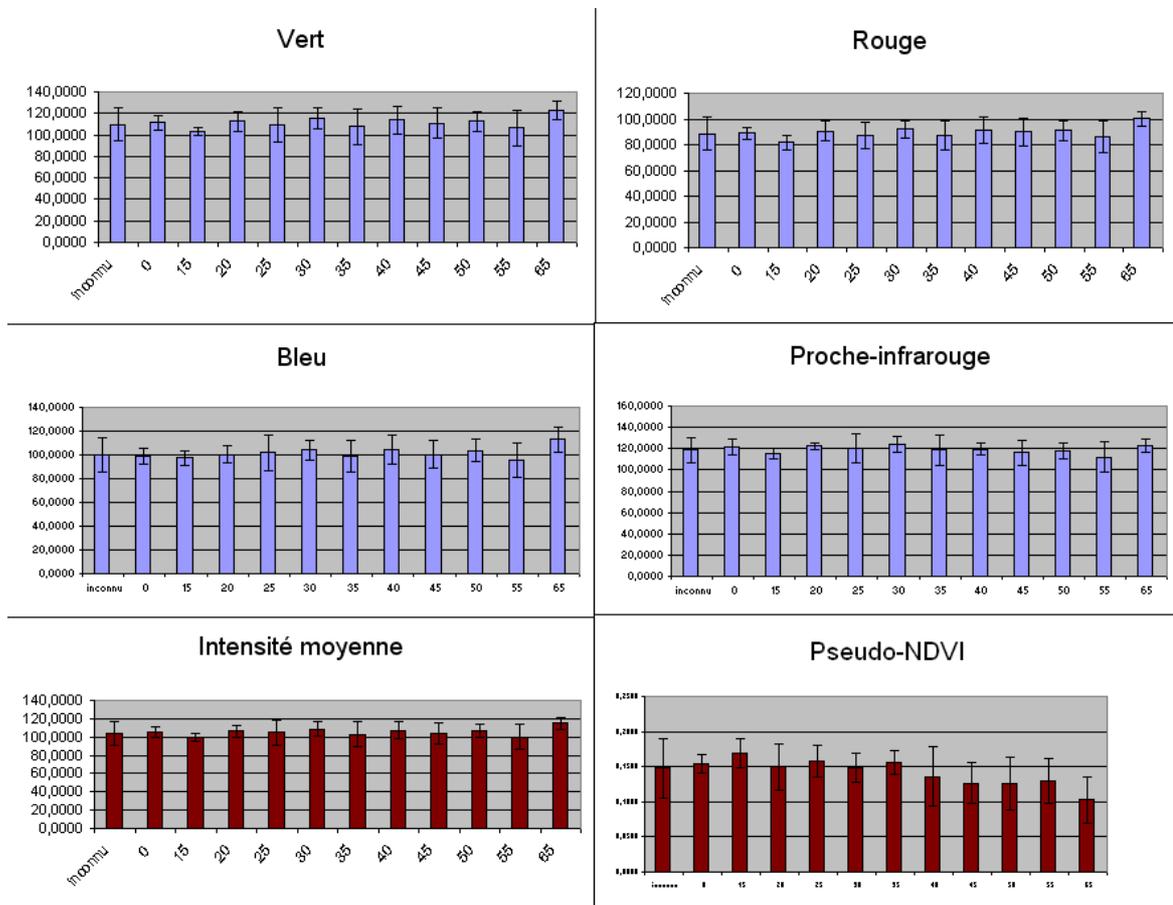


Figure 7 : valeurs moyennes des caractéristiques observées pour les différentes classes de défoliation. La barre d'erreur représente une fois l'écart type.

La figure 8 illustre la dispersion des valeurs des indices de végétation pour les classes de défoliation observées sur le terrain. Il ressort que le NDVI est meilleur que le GI, mais que les résultats ne sont pas probants.

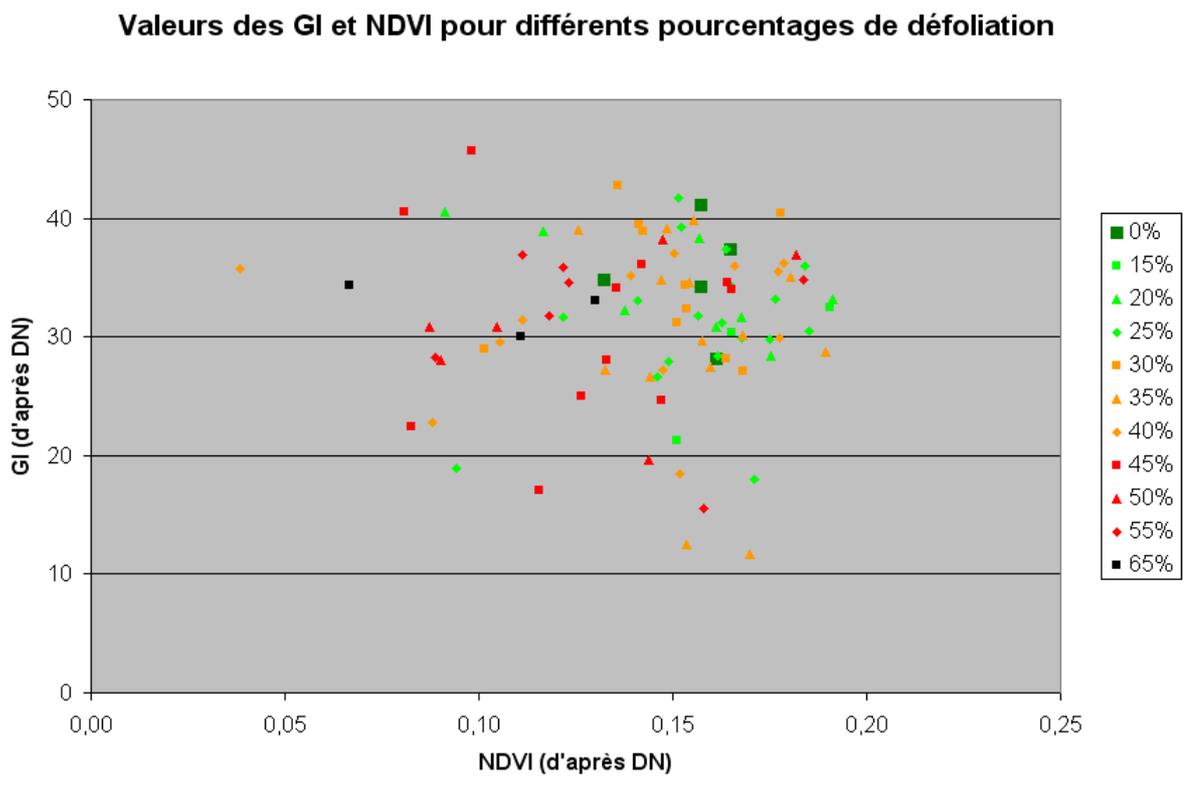


Figure 8 : Indices de végétation pour les arbres échantillonnés en 2009.

Les différentes méthodes d'extraction de houppier n'ont pas eu d'effet significatif sur les résultats. Dans tous les cas, on constate une très faible tendance à la baisse pour le NDVI qui se marque principalement au-delà des 40 % de défoliation.

5.3. *Morphométrie*

L'analyse morphométrique n'a pas donné de meilleurs résultats que l'analyse spectrale. En fait, il ressort de cette étude que la forme des houppiers est beaucoup plus liée au port des arbres qu'à la défoliation (table 2). Un échantillon de plus grande taille devrait permettre de pousser l'analyse plus avant (ANOVA) en étudiant les deux effets simultanément.

Type	pendant	étalé	mixte	brosse
Indice de forme	524	534	583	355

6. Conclusions

Cette étude de faisabilité a démontré qu'il était possible de correctement extraire la majorité des houppiers dans un peuplement monospécifique d'épicéas à partir des orthophotoplans à 25 cm de résolution. Par ailleurs, l'indice de végétation NDVI permet de distinguer les arbres fortement défoliés (>40 %) des arbres sains ou faiblement défoliés.

Aucune relation forte n'a pu être dégagée entre les caractéristiques extraites de la télédétection et la défoliation observée sur le terrain. La principale raison est la progression de la défoliation de bas en haut et du centre vers l'extérieur, donc longtemps masquée par la partie saine de l'arbre pour une observation venant d'en haut.

7. Perspectives

Dans le cas où la dégradation de l'état sanitaire interviendrait par le haut, de nombreuses études ont toutefois prouvé que la télédétection était un outil efficace (Wang et al, 2007 ; Spencer 1984 ; Solberg et al 2006). Par ailleurs, une meilleure résolution spectrale, notamment l'infra-rouge moyen (*short wave infra-red*) pourrait également renforcer les estimations (Hermann et al, 1988).

Etant donné les bons résultats obtenus en ce qui concerne la délimitation automatique de houppiers avec les orthophotoplans de la Région wallonne, cette méthode pourrait être utilisée pour d'autres applications en dehors du cadre de l'étude de faisabilité. Les deux applications les plus en phases avec la gestion des forêts sont la détection de problèmes sanitaires plus graves (ex. *Ips typographus*) ou l'inventaire des arbres morts sur pied.

Cette hypothèse nécessite une validation sur une plus grande zone afin de tester la robustesse de la méthode pour des peuplements d'âges différents, dans des conditions de prises de vue variées et selon les diverses calibrations radiométriques des images.

8. Analyses complémentaires

La méthodologie appliquée aux épicéas a par ailleurs été testée en forêt de Soignes. Les résultats de délimitation automatique de houppiers n'ont cependant pas été concluants. Afin d'extraire les valeurs spectrales, ceux-ci ont donc été délimité manuellement.

En ce qui concerne les valeurs spectrales, on observe des résultats similaires au résineux : le NDVI permet de faire la différence entre les arbres fortement défolié (NDVI entre 0.15 et 0.2) et les autres (NDVI entre 0.23 et 0.28), mais il n'a pas été possible d'aller plus loin dans la discrimination.

9. Bibliographie

- Dralle, K., and M. Rudemo, 1996. Stem number estimation by kernel smoothing of aerial photos, *Canadian Journal of Forest Research- Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, 26(7):1228–1236.
- Hermann, K., Rock, BN, Ammer, U. And Paley, HN 1988 Preliminary assessment of airborne imaging spectrometer and airborne thematic mapper data acquired for forest decline areas in the Federal Republic of Germany. *Remote sensing of environment* 24(1) pp 129-149
- Knipling (1970) Physical and Physiological Basis for the Reflectance of Visible and Near-Infrared Radiation from Vegetation *Remote Sensing of Environment* 1 (1970), 155-159
- Spencer, RD 1984 Detecting dieback in native eucalypt forests using aerial photographs *Australian forestry* 47(4) pp 243-249
- Solberg S, Naesset E, Hanssen KH and Christiansen E 2006 Mapping defoliation during a severe insect attack on Scots pine using airborne laser scanning *Remote sensing of environment* 32(45) pp346-376
- Vincent, L., and P. Soille, 1991. Watersheds in digital spaces—An efficient algorithm based on immersion simulations, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(6):583–598.
- Wang, CZ, Lu, ZQ and Haithcoat, TL 2007 Using Landsat images to detect oak decline in the Mark Twain National Forest, Ozark Highlands. *Forest ecology and management* 8(32) pp 70-78
- Wang, Gong, Biging (2004) Individual Tree-Crown Delineation and Treetop Detection in High-Spatial-Resolution Aerial Imagery *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 70, No. 3, March 2004, pp. 351–357