

Université Catholique
de Louvain



Bruxelles-Environnement
IBGE



Département MILA
Unité des eaux et forêts



Suivi de l'état sanitaire en Forêt de Soignes bruxelloise

Rapport complet

Promoteurs

Prof. Q. Ponette
Prof. P. Defourny

Appui scientifique

Dr. Mathieu Jonard

Réalisation

Ir. Steve Braem

Décembre 2009

Convention UCL – Bruxelles Environnement 2009
Fiche descriptive

Institutions

Université catholique de Louvain

Faculté d'ingénierie biologique, agronomique et environnementale
Département des sciences du milieu et de l'aménagement du territoire
Unité des eaux et forêts

Bruxelles-Environnement (IBGE)

Division Espace Verts
Département des Bois et Forêt
Cantonement de Bruxelles

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

Il est nécessaire de suivre l'évolution de la vitalité de la forêt de Soignes dans le temps et dans l'espace. La mise en place d'un système de suivi sanitaire permet, d'une part, de connaître l'état de vitalité actuel des peuplements, et d'autre part, par la répétition des campagnes d'observation, de dégager des tendances d'évolution. De plus, en cas de dépérissement, il permet de donner rapidement l'alerte, de localiser les dégâts et de mettre en place une gestion pro-active.

Le suivi permanent de l'état sanitaire en forêt de Soignes est effectué en mettant en œuvre une double approche : (i) observation visuelle à partir du sol et (ii) observation par télédétection. Le présent travail fait le point sur l'approche de terrain. Trente-quatre placettes choisies dans la grille de l'Inventaire Permanent de la forêt de Soignes ont été choisies, et constituent le réseau de suivi sanitaire. L'évaluation visuelle des houppiers se fait suivant le protocole *ICP forests* élaboré par le *LRTAP/UNECE*. Après une formation des adjoints forestiers en juin 2009, 223 arbres (21 chênes indigènes, 202 hêtres) ont été analysés par leurs soins. La défoliation moyenne observée est de 30% pour les chênes et 37% pour le hêtre. La défoliation augmente avec la circonférence : un hêtre d'une circonférence de l'ordre de 250 cm présente en moyenne une défoliation de 40%. La défoliation semble par contre être moindre dans les peuplements denses. Quant aux autres symptômes, les premières manifestations liées à la descente de cime sont notées, principalement sur le hêtre.

Le bilan de santé de la forêt de Soignes bruxelloise montre donc qu'une proportion élevée de hêtres, supérieure à deux tiers, présente des symptômes traduisant un dépérissement net. Ce constat invite à analyser de façon plus approfondie la contribution des différents facteurs de dépérissement potentiels (sols, pollution, sylviculture...) et à prendre les mesures de gestion qui s'imposent.

Date de début : janvier 2009

Date de fin : décembre 2009

Durée du projet : 11 mois

Suivi de l'état sanitaire en Forêt de Soignes bruxelloise

1. CONTEXTE.....	1
2. OBJECTIFS	2
3. MATÉRIEL ET MÉTHODES	3
3.1. DOCUMENTS ET ARCHIVES	3
3.2. LA FORET DE SOIGNES	3
3.2.1. CLIMAT	3
3.2.2. SOLS	6
3.2.3. PEUPELEMENTS	8
3.2.3.1. COMPOSITION SPECIFIQUE	8
3.2.3.2. STADES DE DEVELOPPEMENT.....	11
3.3. PRECEDENTES EVALUATIONS DE L'ETAT SANITAIRE EN FORET DE SOIGNES.....	15
3.4. PLAN D'ECHANTILLONNAGE	17
3.4.1. INTRODUCTION	17
3.4.2. ÉCHANTILLONNAGE STRATIFIE ALEATOIRE	17
3.4.3. ÉCHANTILLONNAGE STRATIFIE SYSTEMATIQUE.....	18
3.4.4. TAILLE ET SURFACE DE LA PLACETTE	21
3.4.5. OBSERVATIONS DANS LES UNITES D'ECHANTILLONNAGE	22
3.4.6. FORMATION DES ADJOINTS FORESTIERS.....	27
3.4.7. MISE EN ŒUVRE	28
3.4.8. ASSURANCE QUALITE	29
3.4.9. TRAITEMENT DES DONNEES.....	31
4. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS DE L'ÉVALUATION VISUELLE DES HOUPPIERS	32
4.1. DEFOLIATION	32
4.2. FACTEURS AFFECTANT LA DEFOLIATION	36
4.2.1. ÂGE ET CIRCONFERENCE	36
4.2.2. SOL.....	38
4.2.3. VISIBILITE	39
4.2.4. INDICE D'OMBRAJE (CONCURRENCE)	39
4.2.5. STATUT SOCIAL	40
4.2.6. POUSSES EPICORMIQUES	41
4.3. AUTRES INDICATEURS DE L'ETAT SANITAIRE	42
4.3.1. DECOLORATION	42
4.3.2. STRUCTURE DU HOUPPIER.....	43
4.3.3. FRUCTIFICATION	45
4.4. DOMMAGES ET SYMPTOMES.....	46
5. FUTURES CAMPAGNES D'OBSERVATION	47
5.1. DISTINGUER LES CHENES INDIGENES	47
5.2. OBSERVER TOUS LES ARBRES	47
5.3. DESCRIPTION DES PLACETTES	47

5.4. REDUIRE LE NOMBRE DE PLACETTES	48
6. TÉLÉDÉTECTION.....	51
6.1. INTRODUCTION.....	51
6.2. IMAGES OBTENUES.....	51
6.3. ÉLABORATION D'UNE METHODOLOGIE DE TRAVAIL	51
7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	53
8. RÉFÉRENCES	54
ANNEXES	

1. Contexte

Contrairement à la Wallonie et à la Flandre qui participent aux réseaux européens de suivi à long-terme des écosystèmes forestiers (*ICP forests*), la région bruxelloise ne disposait pas jusqu'à présent de système d'observation permanent de la vitalité des peuplements. Or, la forêt de Soignes présente une certaine vulnérabilité du fait de la proximité de Bruxelles (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, structure des âges déséquilibrée).

Bien que des mesures importantes ont été prises pour réduire la pollution atmosphérique et notamment les émissions d'oxydes d'azote, d'hydrocarbures non-saturés et de soufre par l'industrie et le trafic routier, les retombées acidifiantes et eutrophisantes restent à un niveau élevé et continuent d'affecter le fonctionnement des écosystèmes forestiers, notamment en causant des déséquilibres nutritionnels. De plus, la concentration en ozone (photo-oxydant) a tendance à augmenter dans la basse atmosphère et à atteindre de plus en plus régulièrement les seuils de toxicité pour les végétaux.

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 de la température et de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère et une modification du régime des pluies. Ces modifications du climat ont des répercussions potentielles non seulement sur la croissance des peuplements et la répartition des espèces, mais également sur le développement des populations de ravageurs, ce qui risque d'induire de nouveaux types de dégâts.

Concernant les aspects sylvicoles, un inventaire typologique a été réalisée en vue de mettre en évidence les critères dendrométriques nécessaires pour le suivi et le maintien de la hêtraie cathédrale en forêt de Soignes (convention IBGE-CDAF¹, BALLEUX et TIMAL 2005). Il ressort notamment de cette étude que l'état sanitaire des hêtres se dégrade avec l'âge. Or, les peuplements âgés sont très représentés en forêt de Soignes ; plus de la moitié des peuplements de hêtre ont 120 ans et plus.

Face à ces différentes menaces, il est apparu nécessaire de suivre l'évolution de la vitalité de la forêt de Soignes dans le temps et dans l'espace, plus spécifiquement au travers de ses principaux faciès forestiers, à savoir la hêtraie et la chênaie, pures et mélangées.. La mise en place d'un tel système de suivi sanitaire permet, d'une part, de connaître l'état de vitalité actuel des peuplements, et d'autre part, par la répétition des campagnes d'évaluation, de dégager des tendances d'évolution. De plus, en cas de dépérissement, il permet de donner rapidement l'alerte, de localiser les dégâts et de mettre en place une gestion pro-active.

¹ IBGE : *Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement*, aujourd'hui appelé *Bruxelles-Environnement*. CDAF : *Centre pour le Développement Agro-Forestier* (Chimay).

2. Objectifs

Le suivi permanent de l'état sanitaire en forêt de Soignes sera effectué en mettant en œuvre une double approche : (i) observation visuelle à partir du sol et (ii) observation par télédétection.

Par l'observation au sol, il s'agit de donner une indication de l'état de santé des hêtres (*Fagus sylvatica* L.) et des chênes indigènes (*Quercus robur* L. et *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) de la Forêt de Soignes bruxelloise pour l'été 2009, selon une méthode objectivée qui pourra être répétée annuellement à l'avenir. L'approche de terrain permet d'observer, à l'échelle de l'arbre individuel, un grand nombre de paramètres reflétant l'état sanitaire. Ces variables peuvent ensuite être mises en relation avec d'autres indicateurs de la vitalité comme le statut nutritionnel foliaire et l'accroissement en circonférence. L'observation visuelle met en outre en évidence des niveaux assez faibles de défoliation ou de décoloration, d'observer les types de symptômes et d'identifier les agents responsables.

L'approche 'télédétection' consiste avant tout à rassembler les images satellitaires et aériennes de la Forêt de Soignes pour ensuite élaborer une méthodologie d'évaluation de l'état sanitaire à l'échelle de l'arbre. L'approche 'télédétection' présente l'avantage potentiel de fournir des informations sur la répartition spatiale et l'évolution temporelle des dommages sanitaires, d'assurer une grande homogénéité des mesures (pas d'effet observateur), d'étudier rétrospectivement l'évolution temporelle de l'état sanitaire et d'apporter des éléments d'information intéressants pour la compréhension des processus à l'origine du dépérissement. Ces dernières années, les méthodes d'observation et d'analyse par télédétection aérospatiale ont évolué significativement. D'une part, alors que la réflectance dans le proche infrarouge était bien connue pour permettre une identification très précoce de stress foliaire, les capteurs hyperspectraux et les très hautes résolutions spatiales descendant sous le mètre ont ouvert de nouvelles voies. D'autre part, le traitement d'image orienté-objet remplace très avantageusement le traitement d'image par pixel pour ce type de suivi sanitaire.

La combinaison de l'approche 'télédétection' avec l'observation de terrain devrait donc optimiser les consignes de gestion en adaptant celles-ci en fonction de l'évolution de l'état sanitaire.

3. Matériel et méthodes

Les observations de terrain ont été réalisées en 2009 dans un sous-ensemble de placettes de l'Inventaire Permanent des Ressources Forestières de la Forêt de Soignes bruxelloise (ALDERWEIRELD, 2007 : § 3.4). Les placettes ont été sélectionnées de manière à garantir une bonne représentativité des principaux types de peuplements. Des strates ont d'abord été définies à partir d'une description préalable de la forêt de Soignes bruxelloise (§ 3.2) ; au sein de chacune des strates, un nombre donné de placettes a ensuite été choisi (§ 3.4.3). Dans chacune des placettes, les houppiers ont été évalués visuellement selon les prescriptions de protocole *ICP forests*, adapté pour le cas bruxellois (§ 3.4.5)

3.1. Documents et archives

La description de la Forêt de Soignes bruxelloise s'appuie sur deux principales sources d'information : (i) l'inventaire typologique en 2003-2005 et (ii) la révision de la carte des peuplements en 2006 (annexes, Tableau 26 et suivants). Lors de l'inventaire typologique, 1578 placettes ont été réparties sur toute la surface de la forêt de Soignes bruxelloise, selon une grille de maille de 100 m x 100 m, soit 1 placette par hectare. Néanmoins, seules les placettes situées dans des peuplements où le hêtre domine ont été retenues. De plus, les placettes sont d'aires variables selon l'âge du peuplement. Au sein de chaque placette, les essences ont été déterminées et les diamètres à 1,30 m de haut ont été mesurés. D'autres paramètres (défauts, etc.) étaient irrégulièrement notés au cours de cette campagne, mais ils ont été ignorés dans la présente étude (BALLEUX et TIMAL, 2005). La révision de la carte des peuplements consistait quant à elle à arpenter la forêt de Soignes en corrigeant, commentant ou précisant les attributs des placettes traversées (TIMAL, 2006).

BE-IBGE² possède une série de couches cartographiques (*shapefiles*) qui ont été utilisées dans cette étude (constitution d'un SIG). Ces *shapefiles* reprennent les thèmes les plus courants (carte des peuplements révisée par TIMAL (2006), grille de l'Inventaire Permanent (§ 3.4), voirie, pédologie, etc.). Voir annexes, Tableau 28 et suivants.

3.2. La Forêt de Soignes

3.2.1. Climat

Le climat brabançon est du type tempéré atlantique (Figure 1). Il fait en moyenne 17°C durant le mois le plus chaud (juillet) et 2,5°C durant le mois le plus froid (janvier), avec une température moyenne annuelle de 9,4°C. Les précipitations sont plus ou moins équitablement réparties toute l'année, le volume mensuel oscillant entre 52 et 78 mm, avec un volume annuel de l'ordre de 820 mm.

² Bruxelles Environnement – Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement
UCL – unité des Eaux et Forêts Suivi de l'état sanitaire en Forêt de Soignes bruxelloise
Version définitive, 18/12/2009

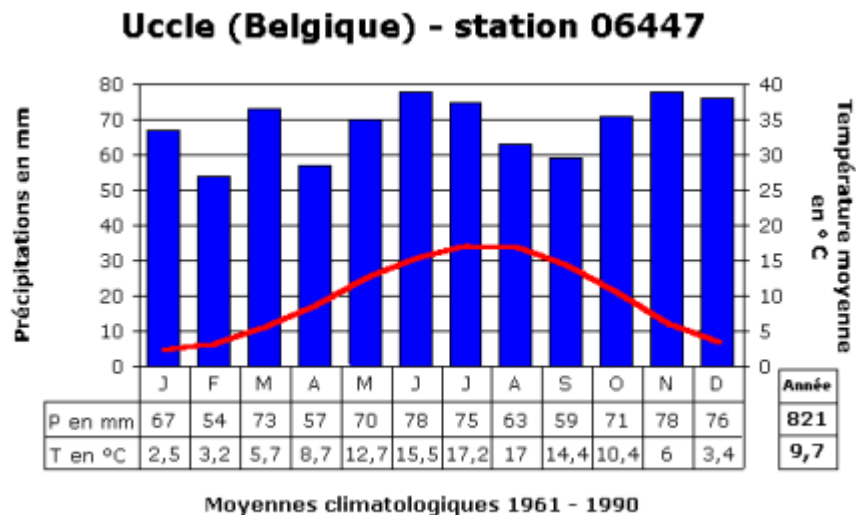


Figure 1. Climatogramme pour la station météorologique d'Uccle, 1961-1990 (IRM, 2008).

Les vingt dernières années ont été marquées par des fortes variations des principaux indices climatiques. Ce sont les années les plus chaudes de l'histoire météorologique belge. À Uccle, les températures moyennes des mois d'hiver (janvier 1992, janvier 1993, novembre 1994, février 1997, décembre 2000) et de printemps (mars 1991, printemps 1993) dépassent régulièrement les normales saisonnières. De même, les précipitations moyennes des mois d'hiver (hiver 1995, automne-hiver 1999) dépassent elles aussi les normales saisonnières. *A contrario*, les printemps (avril 1996) et les étés (juillet-août 1996) sont peu arrosés. On note aussi des records, comme le mois de juillet 1994 qui fut un des plus chauds du XX^{ème} siècle (données IRM, 2009). Des épisodes de sécheresse sont plus fréquents. La sécheresse de 2003 était particulièrement très importante. Le début de l'année était caractérisé par températures mensuelles supérieures à la normale, suivi d'un été très chaud (Christian LAURENT, communication écrite, décembre 2009).

Connaître le bilan climatologique de l'année précédant les observations peut être intéressant. La température moyenne (à Uccle) de 2008 était proche de la moyenne des températures observées depuis les années 1980. La température moyenne assez élevée en 2008 est due à un hiver et à un automne particulièrement chauds. L'hiver 2008 a été anormalement doux et très ensoleillé. Le printemps, chaud lui aussi, a subi des précipitations très importantes. En été, la température moyenne et les précipitations ont été très légèrement supérieures aux normales saisonnières. Quant à l'automne, seul le nombre de jours de précipitations a été anormalement élevé. De manière générale, aucun jour d'hiver (c'est-à-dire un jour où la température maximale observée reste sous 0°C) ou de gel permanent n'a été noté en 2008. L'humidité relative était inférieure à la moyenne attendue. Les principales valeurs sont résumées au Tableau 1.

Tableau 1. Valeurs climatologiques relevées à Uccle pour l'année 2008 et comparaison aux valeurs normales (IRM, octobre 2009)

Indice climatique	Valeur observée	Valeur normale
<i>Température moyenne (°C)</i>	10,9	9,7 (XX ^{ème} siècle) 10,8 (1988-2008)
<i>Précipitations (mm)</i>	861,5	804,8
<i>Humidité relative moyenne de l'air (%)</i>	77	81
<i>Nombre de jours >= 25°C</i>	25	25
<i>Nombre de jours de canicule (>=30°C)</i>	1	3

Les principaux indices météorologiques des mois de juillet et d'août 2009 (saison feuillée propice à l'observation des critères sanitaires) sont résumés au Tableau 2. Si le climat du mois de juillet correspondait aux normales saisonnières, le mois d'août 2009 a comporté des températures excessives et un déficit des précipitations.

Tableau 2. Valeurs climatologiques relevées à Uccle pour juillet et août 2009 et comparaison aux valeurs normales (IRM, octobre 2009)

Mois	Indice climatique	Valeur observée	Valeur normale
Juillet 2009	<i>Température moyenne (°C)</i>	18,7	17,1
	<i>Précipitations (mm)</i>	73,1	74,3
	<i>Humidité relative moyenne de l'air (%)</i>	70	78,5
	<i>Nombre de jours >= 25°C</i>	10	6
	<i>Nombre de jours de canicule (>=30°C)</i>	1	1,6
Août 2009	<i>Température moyenne (°C)</i>	19,4	16,8
	<i>Précipitations (mm)</i>	34,7	74,4
	<i>Humidité relative moyenne de l'air (%)</i>	66	79,4
	<i>Nombre de jours >= 25°C</i>	14	5,9
	<i>Nombre de jours de canicule (>=30°C)</i>	3	0,8

3.2.2. Sols

La forêt de Soignes est située en Moyenne Belgique, sur le plateau brabançon limoneux. Le relief est vallonné, avec une altitude comprise entre 60 et 120 m. Les sols de la forêt de Soignes se sont développés sur une roche-mère composée essentiellement de lœss carbonaté du Quaternaire ainsi que de sables du Tertiaire apparents sur les pentes les plus abruptes. Neuf dixièmes de la Forêt de Soignes bruxelloise se trouvent sur un sol limoneux (VANWIJNSBERGHE, 2003).

Les sols de la forêt de Soignes sont très majoritairement « des limons lœssiques profondément acidifiés et désaturés » (HERBAUTS *et al.*, 1998). La fertilité chimique du sol est très faible en surface³ (pH eau de l'ordre de 3,5 à 4,5). De 2 à 4 m de profondeur, jusqu'au limon, le pH eau y atteint des valeurs proches de la neutralité, de l'ordre de 5 à 7. Sur toute la surface de la forêt, à des profondeurs variables selon les endroits (de l'ordre de 40 cm), on retrouve un horizon induré appelé fragipan. C'est un horizon compacté d'origine périglaciaire, constitué de veines claires plus meubles et formant un réseau de « polygones emboîtés » grands d'une dizaine de centimètres (HERBAUTS *et al.*, 1998 ; LANGHOR, 2001). Cet horizon descend jusqu'à 120 cm de profondeur. Les polygones résultent d'un dessèchement intensif du sol avec formation de fissures de rétrécissement, qui s'est produit il y a plus de 10 000 ans. Au-dessus du fragipan, on trouve 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, là où la terre est de meilleure structure. Les racines qui passent par ces veines claires sont souvent étranglées. Celles qui ont réussi à dépasser la couche indurée (au-delà de 120 cm) se ramifient à nouveau jusque dans la roche-mère (lœss carbonaté), de 2 à 4 m de profondeur. C'est dans cette couche profonde que les hêtres viennent puiser l'eau et les éléments nutritifs nécessaires, ce qui explique la grande productivité (classe de productivité 1 supérieure) de la forêt de Soignes (VANWIJNSBERGHE, 2003 ; LANGHOR, 2001 et 2009). L'opinion généralement admise selon laquelle les hêtres de la forêt de Soignes n'ont qu'un enracinement de surface, est donc réfutable : les hêtres trouvent leurs nutriments dans les couches les plus basses du sol, grâce aux racines profondes (LANGHOR, 2001).

La texture limoneuse, l'acidité et la faible activité biologique rendent les sols de la forêt de Soignes particulièrement sensibles à la dégradation physique. Les engins d'exploitation, les activités de loisir tassent les premiers horizons de sols. Les racines superficielles se retrouvent donc entre des couches de surface compactées et le fragipan. Les conséquences d'un tassement des horizons de surface sont graves. La structure et la porosité des horizons supérieurs du sol s'en trouvent fortement altérées, avec perte de la macroporosité et de la réserve en eau utile (HERBAUTS *et al.*, 1998). L'alimentation en eau est perturbée (hydromorphie temporaire). Il n'y a plus de possibilités pour les racines de se développer et de respirer (anaérobiose), et ce jusqu'à une profondeur importante. Des pseudogleys sont parfois observés (HERBAUTS *et al.*, 1998). Le point extrême de ce processus est la formation de sols imperméables, créant des zones où l'eau stagne à la moindre pluie (LANGHOR, 2001). Ces nappes temporaires subsistent par endroit de décembre à mars (HERBAUTS *et al.*, 1998). Le tassement de sol entraîne donc une perte de vitalité des racines qui, simultanément aux perturbations du régime hydrique, peut augmenter l'ampleur des stress en période sèche (HERBAUTS *et al.*, 1998). Les sols ainsi compactés deviennent très défavorables à la sylviculture du hêtre.

Le relief particulier du site n'a subi pratiquement aucune érosion depuis les périodes glaciaires d'il y a 10 000 ans, et n'a jamais été modifié par l'agriculture (labour ou pâturage), ni par une pédofaune⁴, quasiment inexistante sur le site. La fertilité est donc faible en surface et croît avec la profondeur, jusqu'au limon calcaire, à 2 à 4 m sous la surface. C'est dans cette couche profonde que

³ Une végétation typée s'est développée, où règne une forte concurrence pour l'eau et les éléments nutritifs. Ces conditions expliquent la difficulté de régénération naturelle du hêtre et du chêne (LANGHOR, 2009).

⁴ Cela se remarque notamment par la faible épaisseur de la couche enrichie en humus (LANGHOR, 2009).

les hêtres viennent puiser les nutriments nécessaires, ce qui explique la grande productivité de la Forêt de Soignes malgré des horizons de surface pauvres.

Le relief, mais aussi le microrelief, n'ont pas changé depuis les dernières périodes glaciaires (10 000 – 15 000 ans). Un cas particulier est constitué par les vallées, décrites comme des « vallées sèches » : en effet, ce sont les principaux endroits où affleurent les sables bruxelliens et où le drainage est consécutivement très important. Le profil découpé des vallons n'est pas dû à l'écoulement des eaux, inexistant, mais au passé glaciaire (LANGHOR, 2001).

Pour décrire les sols par peuplements, quatre grandes classes pédologiques ont été définies à partir de la carte des sols : (i) les sols *Abc*, (ii) les sols *Aba*, (iii) les autres sols limoneux et (iv) les types de sols restants. La Figure 2 montre les proportions de ces types de sol, rapportées à la surface cumulée des chênaies et des hêtraies. Les hêtraies mélangées et pures se trouvent principalement sur un sol de type *Abc*, c'est-à-dire un sol limoneux à bon drainage, à horizon B textural (enrichi en argile) fortement tacheté. Quant aux chênaies, tant mélangées que pures, elles sont assez équitablement réparties sur tous les types de sols de Soignes. Voir aussi annexes, Figure 41 et suivantes.

Tableau 3. Description des principaux sols de la forêt de Soignes bruxelloise

	Aba	Abc	Autres sols limoneux	Autre
Matériau parental / texture	Lœss (A)	Lœss (A)	Lœss (A)	Limons et sables en proportions variées
Drainage	Drainage naturel favorable, pas de gley (b)	Drainage naturel favorable, pas de gley (b)	Gleyfiés à des degrés divers	Drainages souvent favorables, parfois humidité modérée
Développement de profil	Horizon B enrichi en argile (a)	Horizon B enrichi en argile et fortement tacheté (c)	Colluvions, alluvions, etc.	Horizon B enrichi en argile et fortement tacheté (c), colluvions, alluvions (p), etc.

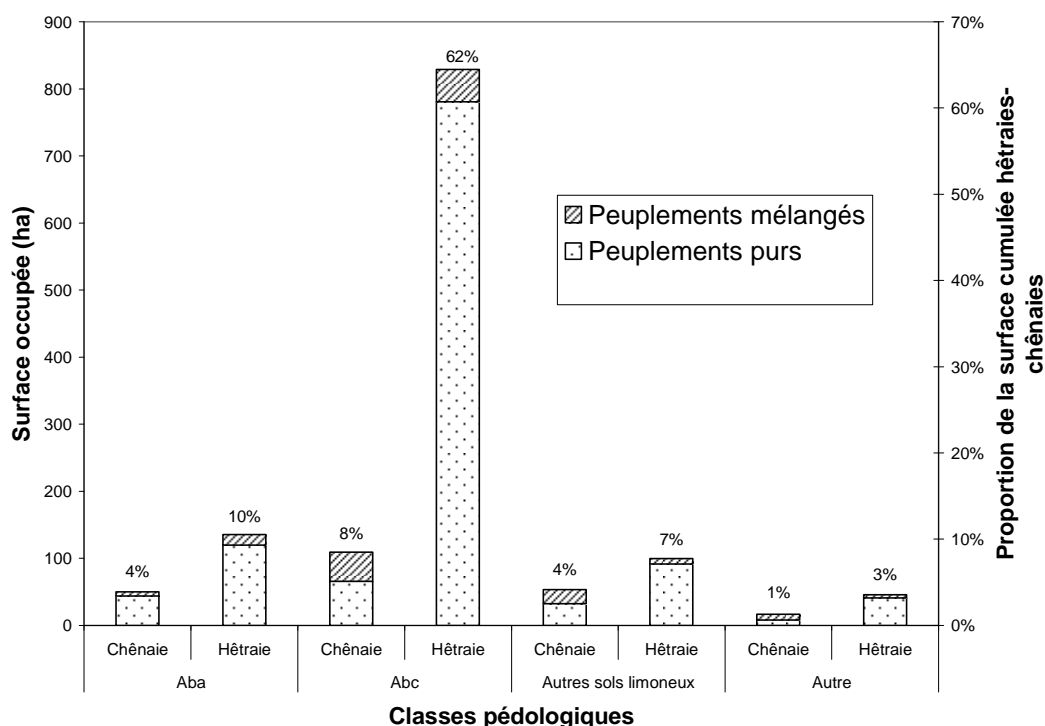


Figure 2. Répartition des hêtraies et des chênaies pures et mélangées sur différents types de sols

3.2.3. Peuplements

3.2.3.1. Composition spécifique

La hêtraie pure⁵ domine largement (deux tiers des 1657 ha de surface totale), suivie de loin par la chênaie pure (un dixième). Les chênaies mélangées et les hêtraies mélangées représentent chacune un vingtième de la surface totale. Les autres types couvrent un peu plus de 10% du secteur bruxellois de la Forêt de Soignes. Ensemble, les hêtraies et chênaies au sens large (mélanges compris) forment donc 84 % de la forêt de Soignes bruxelloise. Ces chiffres sont détaillés à la Figure 3. Les pourcentages indiqués correspondent à la proportion de la surface totale de la forêt de Soignes bruxelloise.

⁵ Selon TIMAL (2006), un peuplement de feuillus est considéré comme pur si l'essence considérée a un recouvrement de plus de 66%.

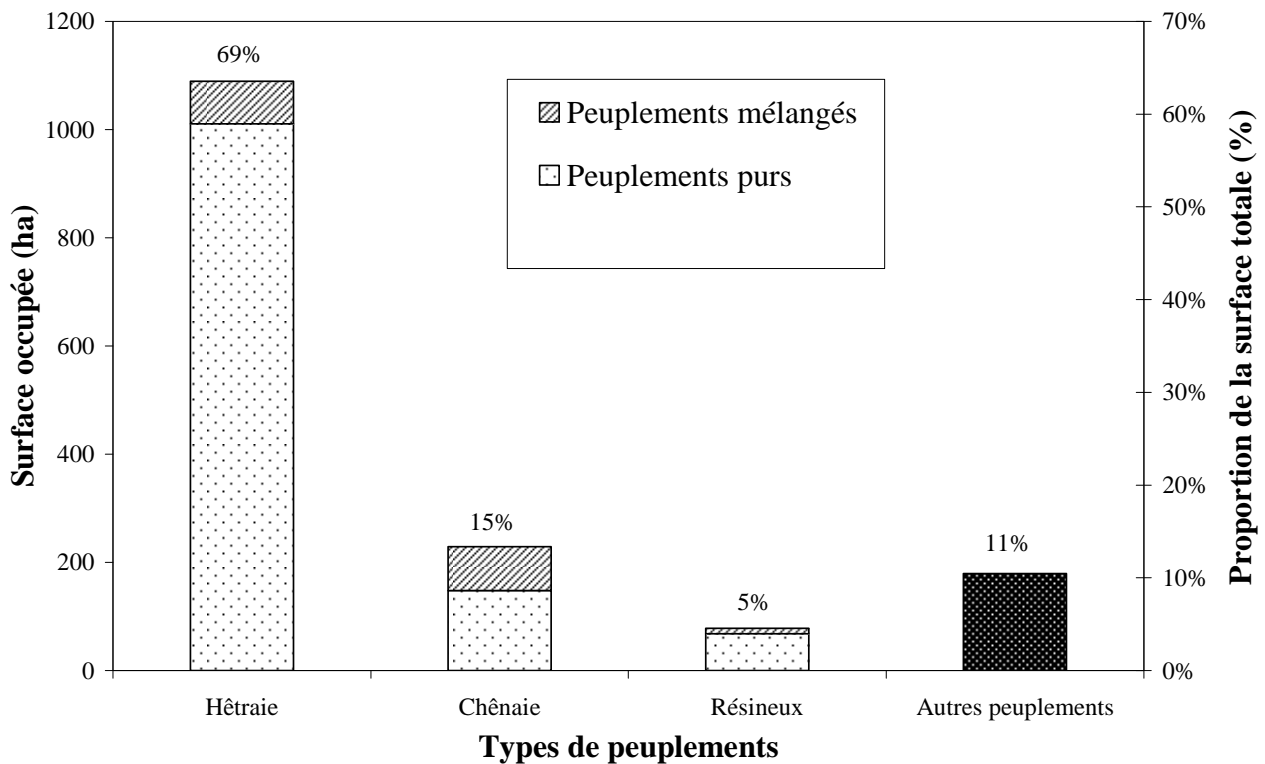


Figure 3. Proportions des types de peuplements (TIMAL, 2006)

En chênaie mélangée, le chêne est associé majoritairement avec du hêtre (52 ha, soit 65% des cas), des pins (9% des cas), du mélèze (6%), de l'érable (2%) ou du frêne (1%). Les 17% de chênaies mélangées qui restent sont composés de plus de deux essences. En hêtraie mélangée, le hêtre se trouve principalement avec de l'érable (31%), des pins (6%), du mélèze (5%) ou du frêne (2%). Les 55% de hêtraies mélangées qui restent sont composés de plus de deux essences.

La somme cumulée des surfaces de hêtraies pures (1011 ha), de hêtraies mélangées (79 ha) et de chênaies-hêtraies (52 ha) représente près de 1142 ha. Il y a donc 72% de la surface du secteur bruxellois de la forêt de Soignes qui sont couverts par du hêtre, pur ou en mélange.

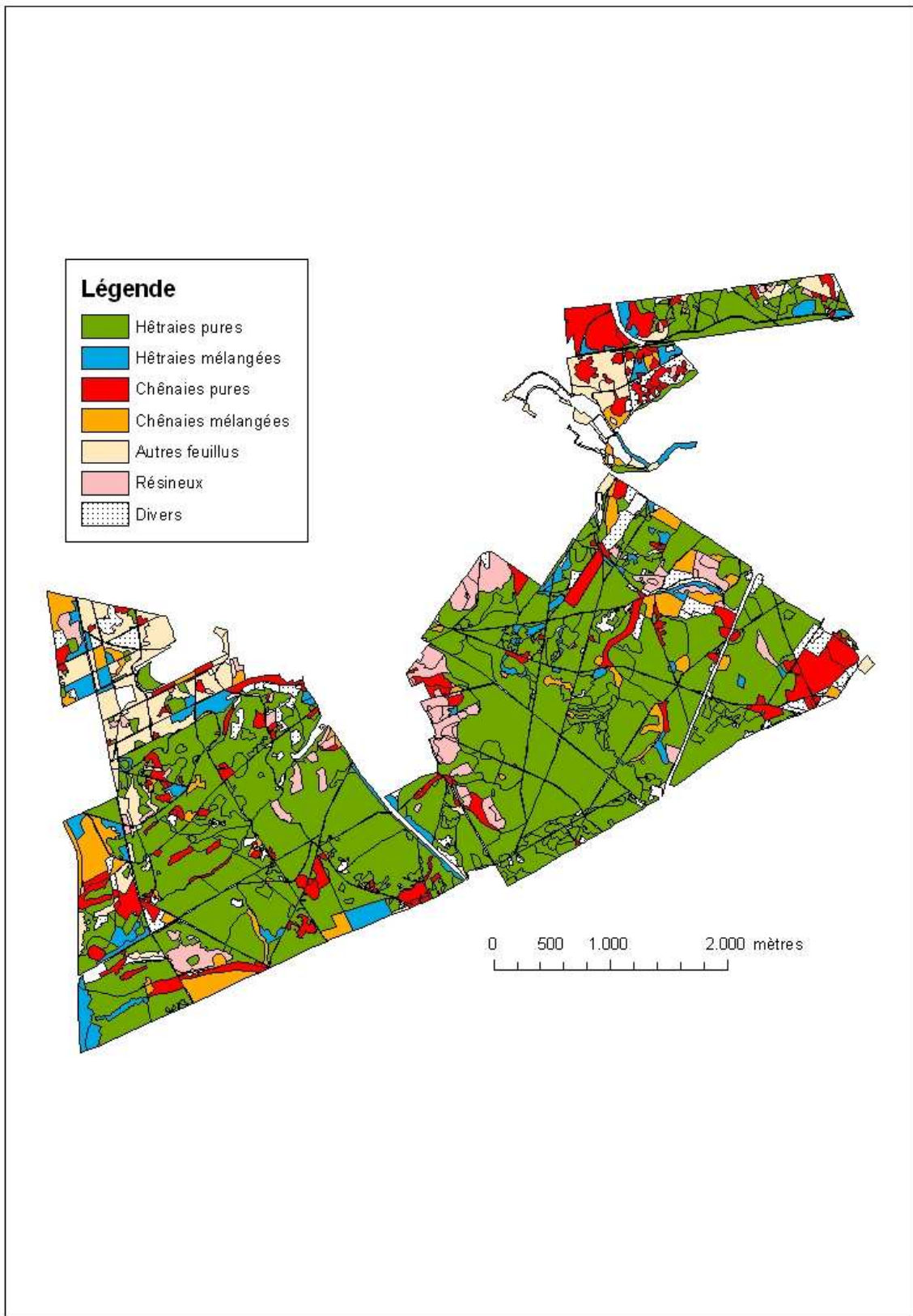


Figure 4. Carte des types de peuplements (TIMAL, 2006)

3.2.3.2. Stades de développement

Âges

La distribution des classes d'âges en chênaies et hêtraies pures et mélangées a été tirée de la révision de la carte des peuplements de la Forêt de Soignes bruxelloise par Grégory TIMAL (2006). Pour chaque peuplement, l'âge indiqué sur cette carte est l'âge moyen de la strate dominante. Cet âge a été tiré d'archives ou calculé à partir des dimensions de quelques tiges tirées du peuplement étudié. Dans le cas des peuplements constitués de sous-peuplements homogènes, l'âge renseigné est la moyenne des dates connues (TIMAL, 2006).

La distribution des classes d'âges en hêtraies (Figure 5) est à peu près uniforme, avec néanmoins une représentation plus forte de la classe 120 – 180 ans. La distribution des classes d'âge en chênaies (Figure 5) suit une décroissance quasi-linéaire, passant de 8% (0-60 ans) à 1% (180 et plus) de la surface totale de la forêt de Soignes bruxelloise. La majorité des chênes ont moins de 120 ans, ce qui est une situation inverse à celle des chênaies de Wallonie dans lesquelles s'observe un déficit de régénération.

Les considérations sur l'âge sont utilement balancées par la distribution des classes de diamètre (Figure 6, ci-dessous). Voir aussi annexes, Figure 43 Figure 41 et suivantes.

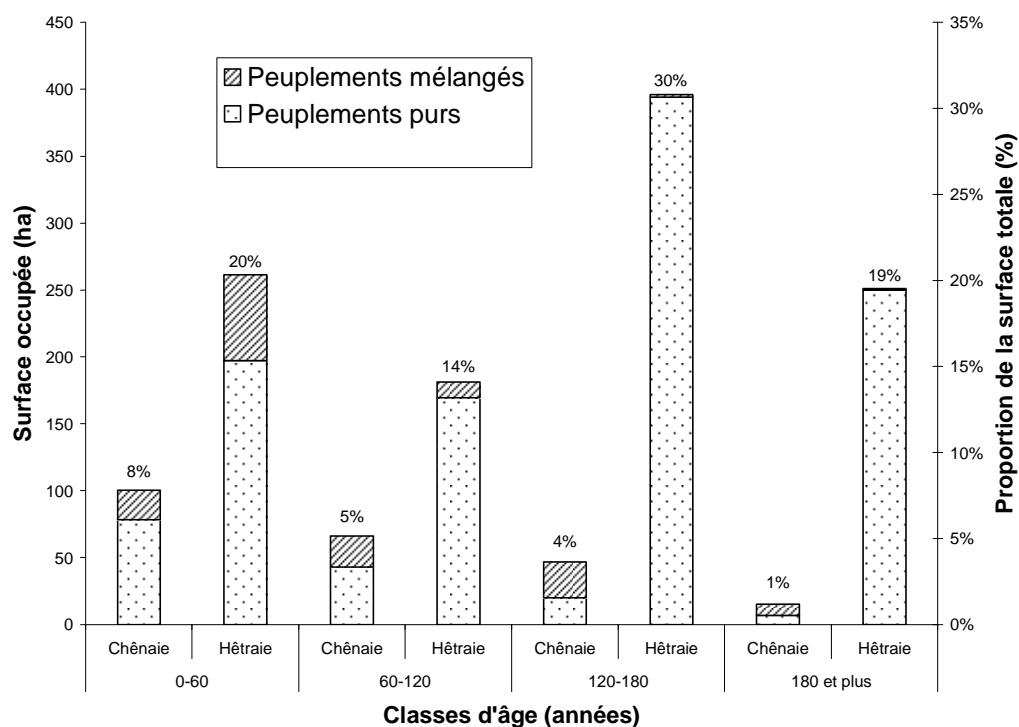


Figure 5. Distribution des classes d'âges en chênaies et hêtraies pures et mélangées (TIMAL, 2006)

Diamètre moyen du tronc

En 2003-2005, Grégory TIMAL a mesuré le diamètre du tronc à 1,5 m de hauteur (DBH) de tous les arbres de chacune des placettes. La moyenne des DBH a été calculée pour chaque placette située en hêtraie et en chênaie. La Figure 6 montre la distribution des placettes entre quatre classes de diamètre. Les pourcentages exprimés sont rapportés au nombre total de placettes inventoriées en hêtraie (788 placettes) ou en chênaie (49 placettes) selon les cas. Le Tableau 4 présente les principaux indices descriptifs des distributions de diamètre en chênaies et hêtraies pures et mélangées. Le diamètre moyen est similaire entre les quatre types de peuplements (de l'ordre de 40 cm). Seules les hêtraies pures ont un diamètre moyen légèrement plus élevé (48 cm) que les autres classes. Quant à la variabilité, elle est à peu près équivalente au sein des quatre classes (coefficient de variation de 39%). Voir aussi annexes, Figure 47 et suivantes.

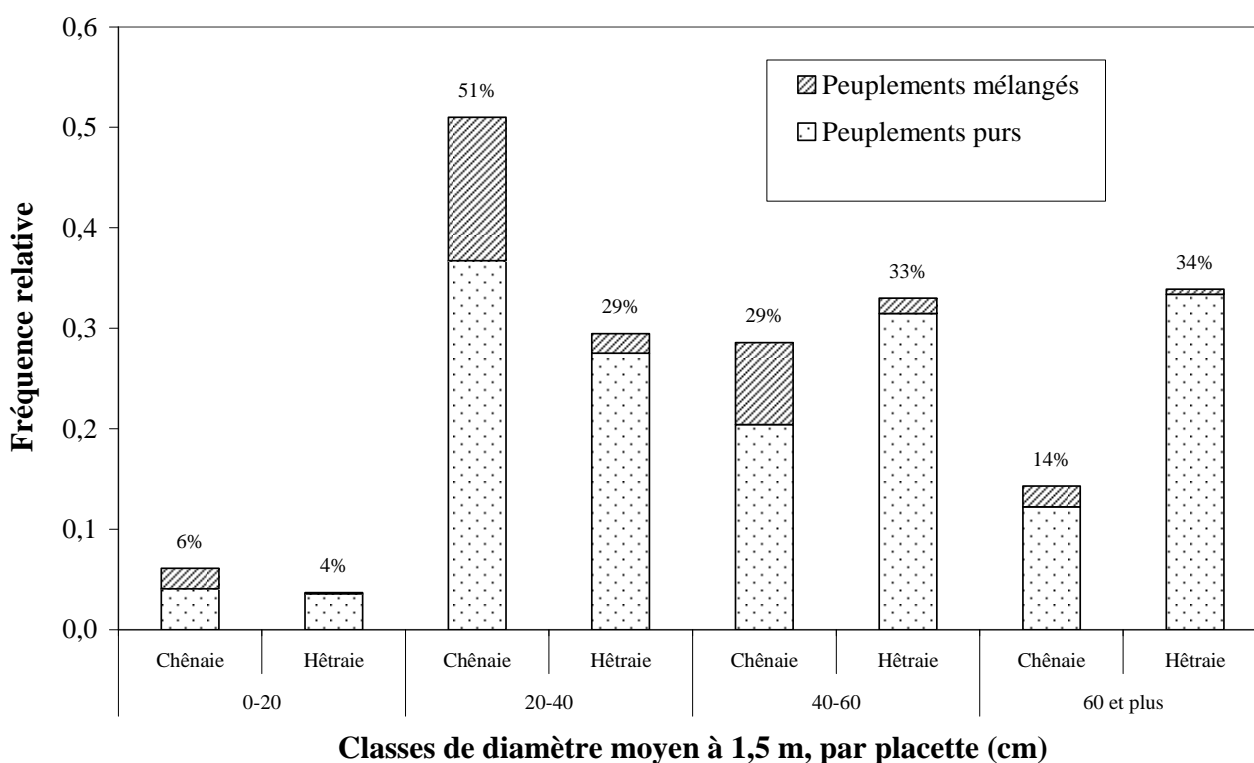


Figure 6. Distribution des classes de diamètre du tronc mesuré à 1,5 m en chênaies et en hêtraies pures et mélangées (BALLEUX et TIMAL, 2005)

Hauteurs dominantes

Les chiffres utilisés sont ceux de l'inventaire typologique (BALLEUX et TIMAL, 2005). Au sein de chaque placette d'échantillonnage, les hauteurs des trois plus grosses tiges de chêne ou de hêtre ont été mesurées au vertex. Les hauteurs ainsi obtenues ont été réunies dans une moyenne, puis rangées au sein de quatre classes d'un intervalle constant de 15 m. La Figure 7 présente la distribution des placettes entre ces quatre classes de hauteur. Les pourcentages exprimés sont rapportés au nombre total de placettes inventoriées par type de peuplements (961 placettes en hêtraies et 58 en chênaies). Voir aussi annexes, Figure 45 et suivantes.

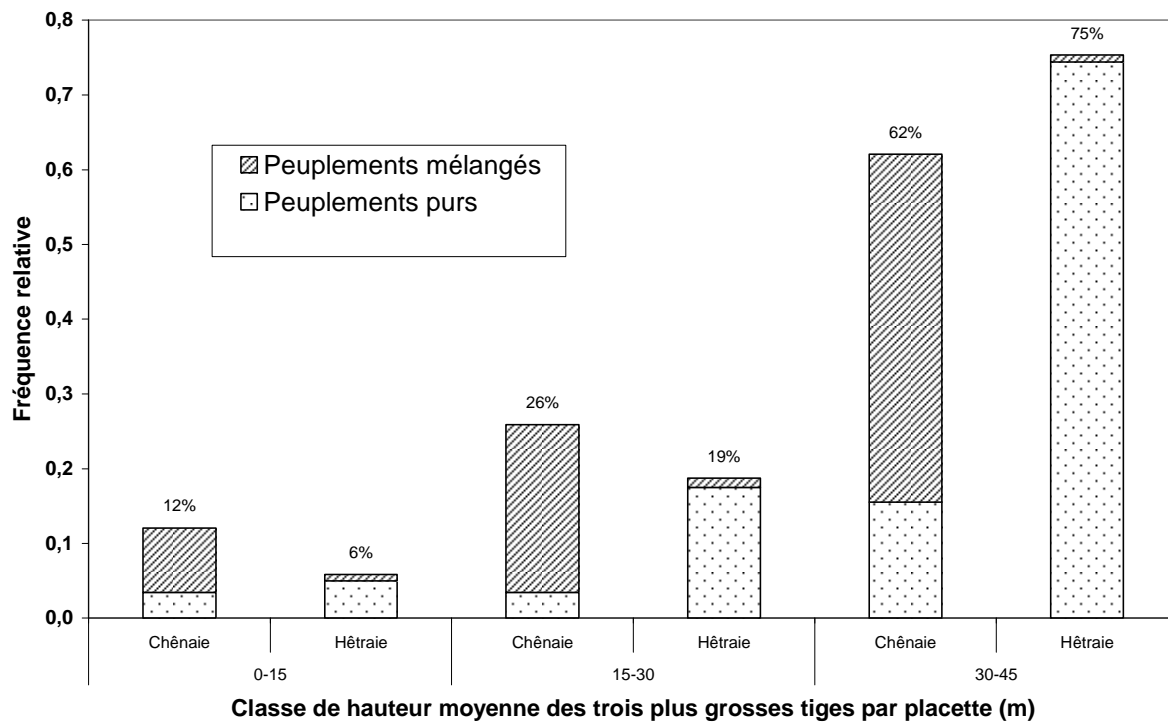


Figure 7. Distribution des hauteurs en hêtraies et chênaies pures et mélangées (BALLEUX et TIMAL, 2005)

Tableau 4. Diamètre du tronc à 1,5 m de hauteur (DBH), en chênaies et hêtraies pures et mélangées (écart-type entre parenthèses)

	<i>DBH moyen (cm)</i>	<i>Coefficient de variation (%)</i>	<i>Effectif</i>
<i>Chênaie pure</i>	41,9 (17,4)	41	10
<i>Chênaie mélangée</i>	38,6 (13,1)	34	26
<i>Hêtraie pure</i>	47,6 (18,5)	39	173
<i>Hêtraie mélangée</i>	39,7 (16,1)	40	14

Surface terrière

En 2003-2005, au sein de chaque placette d'échantillonnage, la surface terrière a été évaluée à l'aide du relascope. Si la visibilité en forêt rendait l'estimation difficile, une deuxième mesure était effectuée (BALLEUX et TIMAL, 2005). Le cas échéant, la moyenne de ces deux mesures a été calculée. La Figure 8 montre la distribution des surfaces terrières moyennes par placette (G, en m²/ha) en chênaie et en hêtraie de Soignes. Les pourcentages ont été rapportés au nombre total de placettes pour la hêtraie (961 placettes) ou pour la chênaie (58 placettes). Voir aussi annexes, Figure 49 et suivantes.

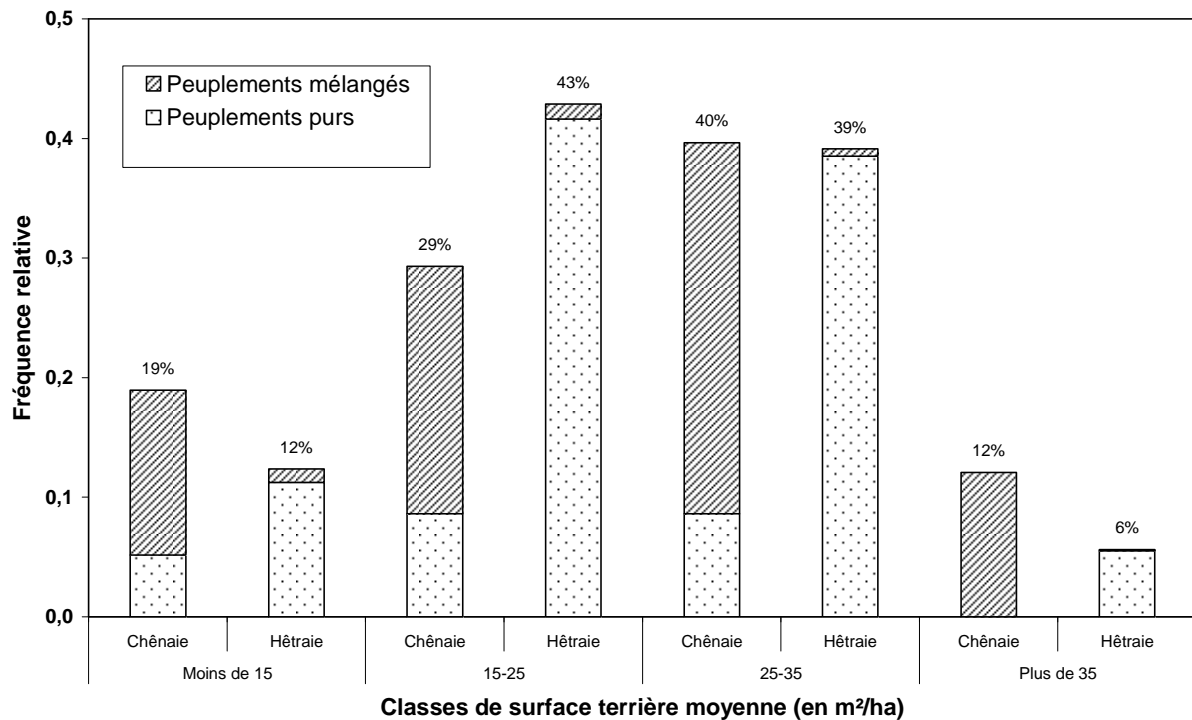


Figure 8. Distribution de la surface terrière moyenne en hêtraies et chênaies pures et mélangées (BALLEUX et TIMAL, 2005)

3.3. Précédentes évaluations de l'état sanitaire en Forêt de Soignes

La méthode DEPEFEU est un protocole d'évaluation des dépérissements qui se base sur des critères comme la réduction de croissance, la répartition de la masse foliaire au sein du houppier, la transparence du houppier (densité du feuillage), la mortalité d'organes pérennes ou la simplification de la ramification (NAGELEISEN, 2000). Chacun des critères fait l'objet d'une cotation, les cotations étant finalement réunies dans une note synthétique de 5 niveaux (Tableau 5).

Tableau 5. Les cinq classes sanitaires du protocole DEPEFEU (NAGELEISEN, 2000)

Classe sanitaire	État
0	Sain
1	Dépérissement léger
2	Dépérissement moyen
3	Dépérissement grave
4	Mort du houppier

La méthode DEPEFEU a été utilisée par BALLEUX et TIMAL (2005) dans la hêtraie de Soignes. Sauf exceptions, les 3 hêtres dominants de 138 placettes, réparties uniformément sur l'ensemble de la forêt de Soignes bruxelloise, ont été évalués en 2005. 404 hêtres ont été notés au total. Le Tableau 6 montre la distribution relative des arbres diagnostiqués selon les niveaux de santé décrits plus haut. En 2005, 51% des hêtres évalués présentaient des signes de dépérissement plus ou moins avancés. Cependant, aucun arbre mort n'a été observé.

Tableau 6. Dépérissement observé selon le protocole DEPEFEU par BALLEUX et TIMAL (2005) sur 404 hêtres dominants

Classe sanitaire	État	Proportion (%)	Effectif (total = 404 arbres)
0	Sain	45	182
1	Dépérissement léger	42	169
2	Dépérissement moyen	11	43
2+	Dépérissement moyen à grave	2	10

La Figure 9 montre les niveaux de santé par classes de circonférence, mesurée à 150 cm de hauteur, d'intervalles variables. Parmi les arbres présentant un dépérissement, les classes de circonférence les plus représentées sont celles de [190-240[et [240-290[(cm). Dans les dépérissements moyens à graves, les plus grandes circonférences ([290-340[et [340-390[) ne sont pas du tout représentées.

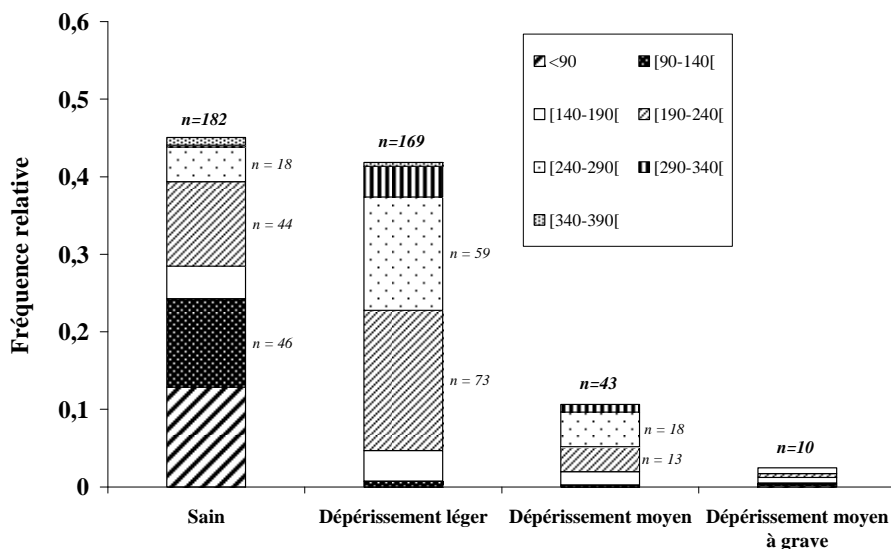


Figure 9. Distribution des 404 hêtres analysés par classe de circonférence (cm) et par classe sanitaire DEPEFEU.

Dans le travail de BALLEUX et TIMAL (2005), les âges ont été déduits à partir des accroissements périodiques ou sur base d'archives (§ 3.2.3.2). Cependant, la comparaison des âges estimés et des circonférences donnaient quelquefois des valeurs aberrantes. Pour montrer la distribution des hêtres analysés par classe d'âge et par classe sanitaire, nous avons d'abord écarté les arbres pour lesquels l'accroissement moyen annuel en circonférence était supérieur à 2,5 cm. De ce tri, il restait 322 arbres avec un rapport circonférence/âge plausible. La Figure 10 montre les résultats par classes d'âge (datés de 2005), d'intervalles variables. Dans toutes les classes de dépérissement, c'est la classe d'âge de 180 à 210 ans qui est la plus représentée. Ce n'est pourtant pas la classe des âges les plus élevés ([240-270[).

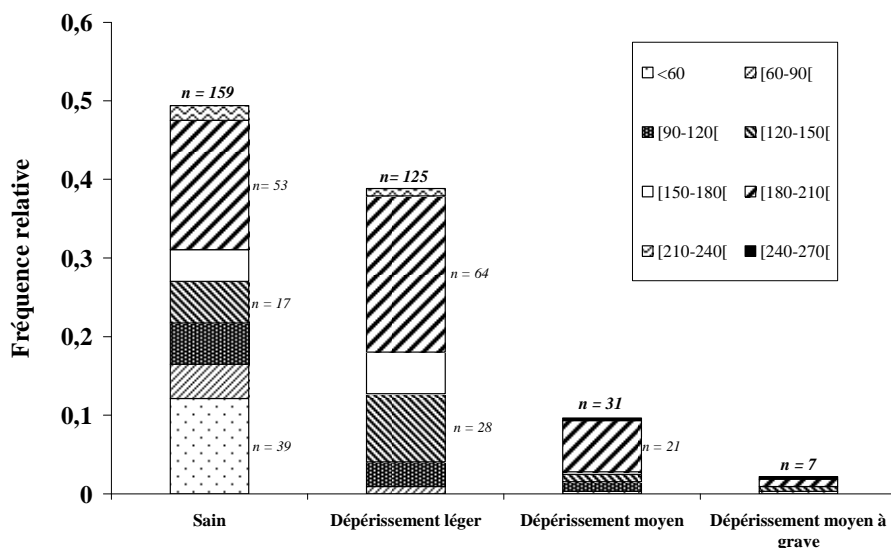


Figure 10. Distribution des 322 hêtres par classe d'âge (datés de 2005) et par classe sanitaire DEPEFEU.

3.4. Plan d'échantillonnage

3.4.1. Introduction

Les observations sont faites au sein de placettes. Le nombre de ces placettes et leur répartition dans le massif forestier doivent assurer une bonne représentativité de l'échantillon. Pour faciliter la prise de mesures et le croisement des données, les placettes de l'Inventaire Sanitaire ont été sélectionnées parmi les unités de l'Inventaire Permanent. Il s'agit d'une grille de maille de 200 m x 200 m (soit une unité d'échantillonnage pour 4 hectares), pour un total de 431 nœuds répartis sur l'ensemble de la Forêt de Soignes bruxelloise (ALDERWEIRELD, 2007). Il a été procédé à une stratification *a priori* établie sur deux critères : (i) la composition spécifique et (ii) le stade de développement. En ce qui concerne la composition spécifique, seuls deux types de peuplements ont été retenus : les hêtraies (pures et mélangées) et les chênaies (pures et mélangées). En ce qui concerne l'âge du peuplement, seuls les arbres de plus de 60 ans sont repris dans l'analyse. Ce seuil à 60 ans est notamment employé par FABIÁNEK (2004). De plus, au stade jeune, les cimes sont enchevêtrées les unes dans les autres, ce qui rend toute observation difficile. Nous avons choisi d'exclure les placettes situées à moins de 20 mètres d'une limite de peuplement ou d'une voirie, pour préserver l'homogénéité individuelle des placettes et faciliter l'installation.

Deux stratégies d'échantillonnage ont été élaborées : un échantillonnage stratifié aléatoire d'une part et un échantillonnage stratifié systématique d'autre part. Elles ont été comparées afin de retenir la plus adéquate. C'est l'échantillonnage stratifié systématique qui a été choisi. C'était en effet le meilleur compromis entre une répartition spatiale équitable et une bonne représentativité dans le temps, c'est-à-dire reflétant l'évolution de la forêt elle-même. L'échantillonnage aléatoire est succinctement évoqué pour mémoire, l'échantillonnage systématique est quant à lui plus complètement décrit.

3.4.2. Échantillonnage stratifié aléatoire

L'échantillonnage aléatoire a pour but de représenter proportionnellement chacune des strates, les placettes étant positionnées sur le terrain au hasard. Chaque strate doit avoir un nombre de placettes proportionnel à son poids. Le Tableau 7 présente deux scénarios. Des placettes supplémentaires sont prévues si certaines placettes ne conviennent pas. Le nombre de placettes du scénario 1 suppose trois placettes visitées par agent, pour un total de 8 agents (24 placettes en tout). Pour le scénario 2, cinq placettes sont supposées être visitées par agent (40 placettes en tout).

Tableau 7. Deux scénarios d'échantillonnage aléatoire

Composition spécifique	Stade de développement	% de la surface totale	% de la surface des strates	Nombre de placettes		
				Scénario 1 (n ₁)	Scénario 2 (n ₂)	Supplément (n ₃)
Chênaies pures et mélangées	60 à 120 ans	5	7	2	3	1
	Plus de 120 ans	5	7	2	3	1
Hêtraies pures et mélangées	60 à 120 ans	14	19	4	8	2
	120 à 180 ans	30	41	10	15	4
	Plus de 180 ans	19	26	6	11	3
TOTAL		73	100	24	40	11

Le nombre de placettes à visiter étant fixé, les placettes sont présélectionnées de manière aléatoire au sein de chaque strate. Pour chacune d'elle, un nombre déterminé de placettes a été tiré de manière aléatoire et sans remise, grâce au logiciel statistique « R ». De la liste générée par le logiciel, les placettes situées à moins de 20 m d'une limite de peuplement ou d'une voirie ont été éliminées. Une seconde sélection a ensuite été effectuée en écartant les placettes ne correspondant pas aux caractéristiques de la strate. L'échantillonnage aléatoire a pourtant été écarté, à cause de sa couverture spatiale inégale qui pourrait engendrer des problèmes de représentativité dans le futur. Voir aussi annexes, Figure 51 et suivantes, et Tableau 30 et suivants.

3.4.3. Échantillonnage stratifié systématique

Pour des raisons de représentativité spatiale et temporelle, c'est l'échantillonnage stratifié systématique qui a été finalement choisi. En ne retenant que les placettes présentes sur les strates et en écartant celles à moins de 20 m d'une voirie, une première grille de 116 nœuds, issue de la grille de l'Inventaire Permanent, est d'abord obtenue (Tableau 8).

Tableau 8. Distribution entre les strates des placettes situées à moins de 20 m d'une limite ou d'une voirie

Strate	Effectif
Chênaies, 60 à 120 ans	4
Chênaies, plus de 120 ans	5
Hêtraies, 60 à 120 ans	22
Hêtraies, 120 à 180 ans	55
Hêtraies, plus de 180 ans	30
Total	116

Parmi ces 116 placettes disponibles, nous avons choisi de nous limiter à un sous-échantillon en doublant la maille de la grille systématique, ce qui réduit par quatre le nombre de placettes. Selon la position du point de départ, quatre grilles pouvaient alors être construites. À partir du nombre total de placettes de chacune des quatre grilles et du poids des strates (Tableau 7), le nombre de placettes attendu par strate a été calculé. Pour chaque scénario d'échantillonnage, ces nombres attendus ont été comparés aux nombres de placettes prévus par chacune des quatre grilles. La meilleure option est déterminée à l'aide du test du chi carré (χ^2). L'hypothèse nulle de ce test suppose que, pour chacune des quatre grilles, les proportions de placettes dans chaque strate sont similaires à celles prévues par le Tableau 7. Pour que cette hypothèse soit acceptée, le χ^2 calculé doit être inférieur ou égal à 0,71 (valeur de χ^2 théorique pour 4 degrés de liberté, avec $\alpha = 0,05$). Seule la quatrième grille (32 placettes) rencontre ces conditions. Aux 32 placettes ont été adjointes 2 placettes en chênaie (l'une en première brigade, l'autre en deuxième brigade), pour renforcer la représentation des chênaies. Ce sont les placettes les mieux réparties spatialement qui ont été choisies. L'ensemble des 34 placettes constitue la grille finale qui sera utilisée pour l'évaluation visuelle des houppiers (Figure 11).

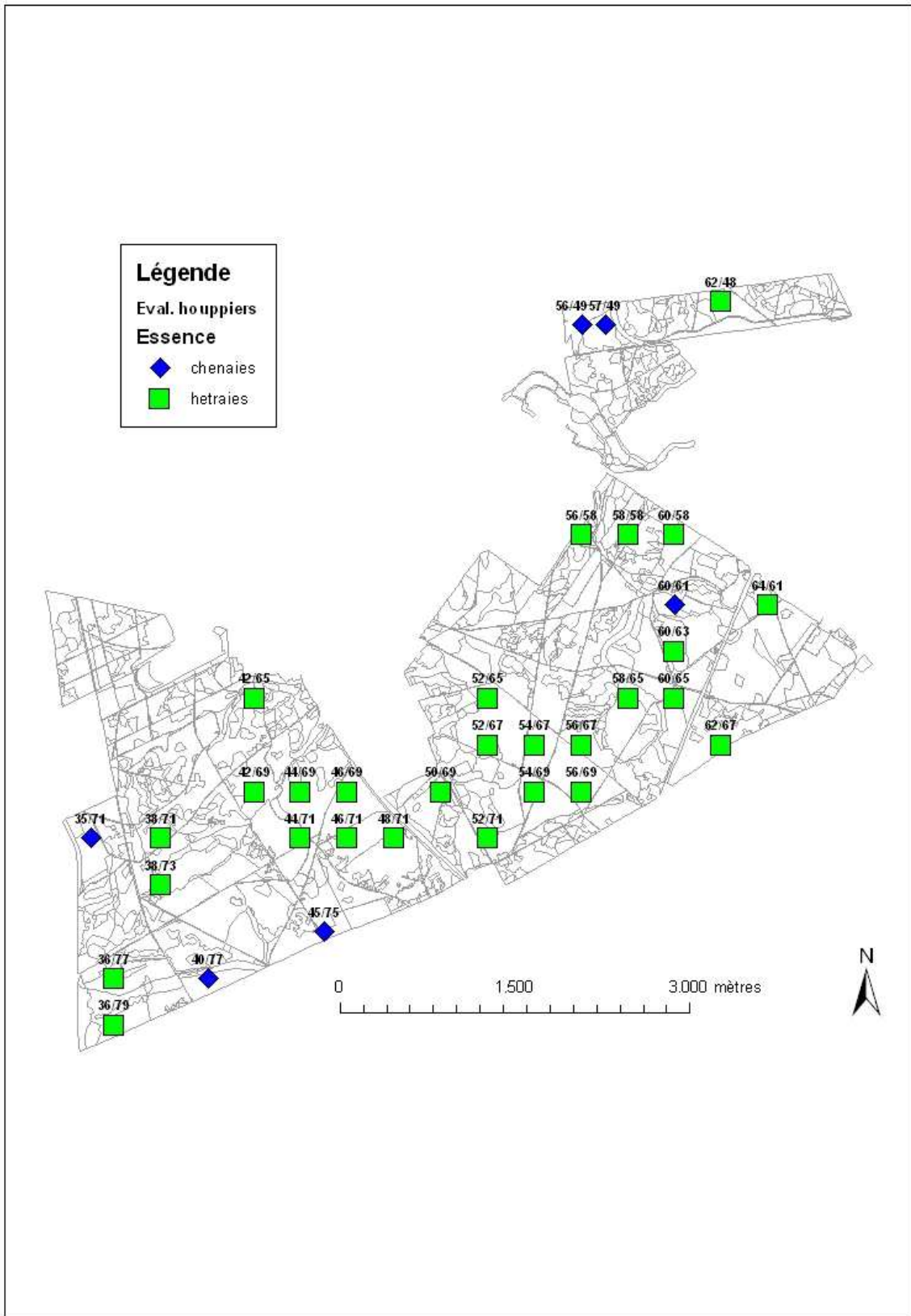


Figure 11. Répartition spatiale des placettes.

La Figure 12 montre la distribution des placettes sélectionnées selon les classes d'âges. Pour rappel, les âges attribués ont été extrapolés à partir d'archives ou de données dendrométriques, ils sont donc peu fiables (§ 3.2.3.2). Les proportions sont rapportées au nombre total de placettes, tous types confondus, soit 34 placettes. La hêtraie de 120-180 ans est légèrement sous-représentée (35% au lieu de 42%), mais ce biais est négligeable vu le poids très élevé de la strate. Les autres catégories sont légèrement surreprésentées (comparer avec la Figure 5). La représentativité générale reste satisfaisante.

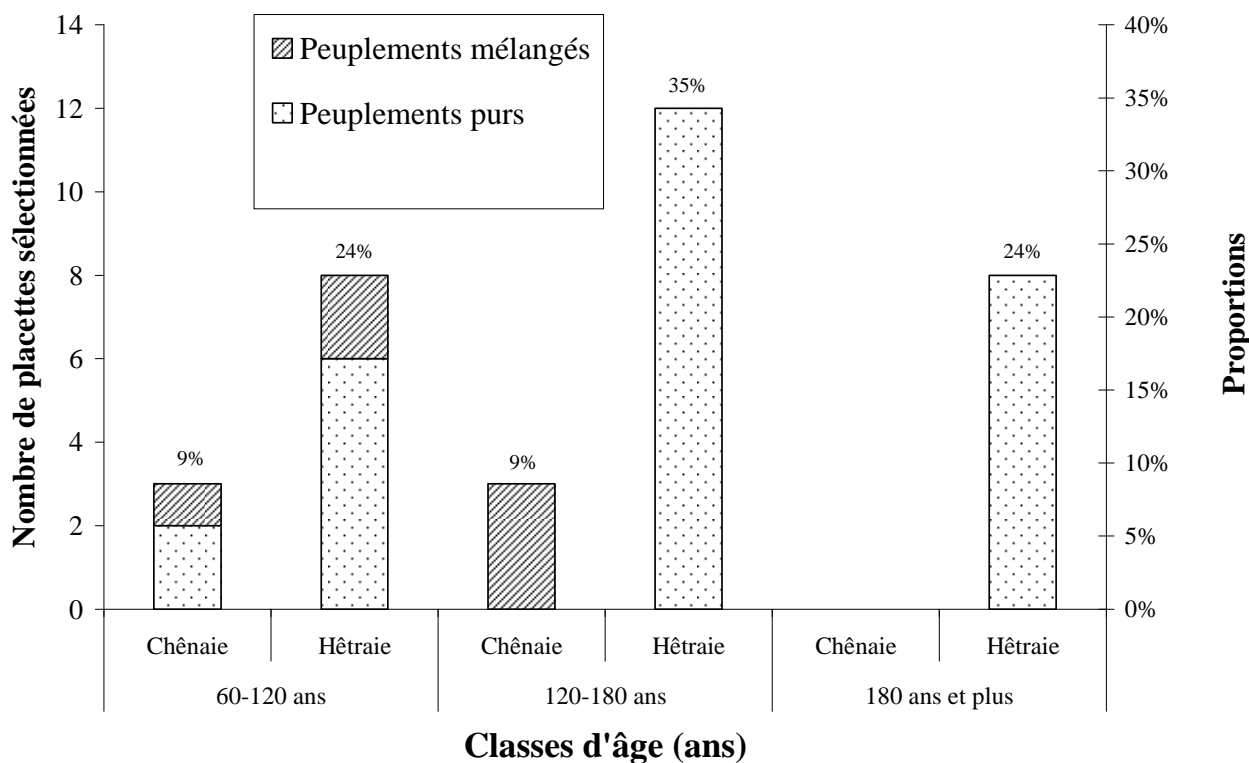


Figure 12. Distribution des placettes sélectionnées selon les classes d'âges (grille finale)

La Figure 13 montre la distribution des placettes de la grille finale pour chaque type de peuplement (hêtraies ou chênaies) et selon les classes de sol définies dans le 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 m. Les sols de la forêt de Soignes se sont développés sur une roche-mère composée essentiellement de lœss carbonaté du Quaternaire ainsi que de sables du Tertiaire apparents sur les pentes les plus abruptes. Neuf dixièmes de la Forêt de Soignes bruxelloise se trouvent sur un sol limoneux (Vanwijnsberghe, 2003).

. Si la proportion de placettes en hêtraies sur sol Abc reste la plus importante, les peuplements sur d'autres sols limoneux sont légèrement sous-représentés, tandis que ceux sur sols non-limoneux sont légèrement surreprésentés (comparer avec la Figure 2). La représentativité générale reste satisfaisante.

Voir aussi annexes, Tableau 42 et suivants.

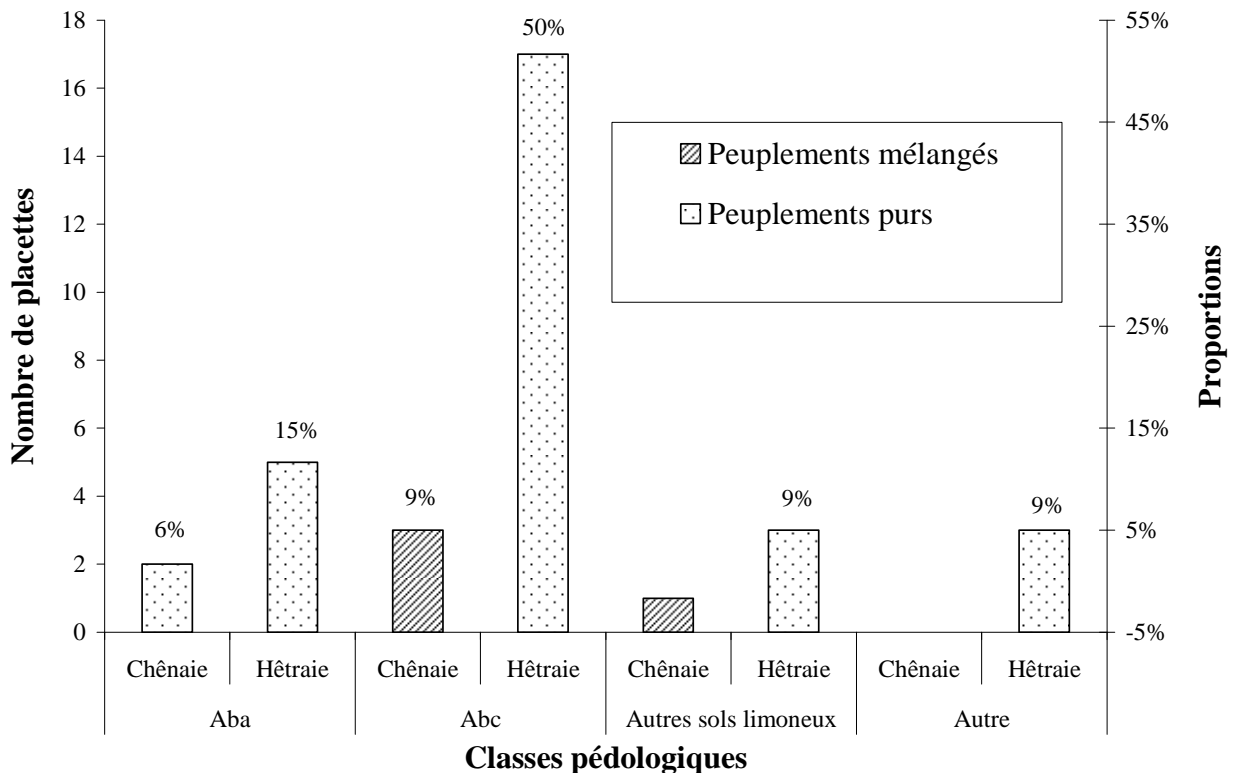


Figure 13. Distribution des placettes sélectionnées selon les types de sol (grille V)

3.4.4. Taille et surface de la placette

Pour connaître le nombre approximatif d'arbres par placette à partir duquel la variabilité de la défoliation moyenne commence à se stabiliser, un exercice de ré-échantillonnage a été élaboré dans le logiciel R (annexes, Tableau 45, Figure 58 et Figure 59). Les données de départ sont les niveaux de défoliation mesurés en 2005 et en 2007 dans les 8 placettes de suivi intensif en Région Wallonne. Chacune des placettes contient 52 arbres. Le logiciel R effectue dans chaque lot de données (un par placette) 100 ré-échantillonnages avec remise pour chaque valeur de n , n étant le nombre d'arbres échantillonnés allant de 1 à 52. Pour une taille d'échantillon fixée, la moyenne des moyennes obtenues pour chacun des tirages ainsi qu'un intervalle de confiance, sont calculés. L'intervalle de confiance est ici défini comme l'écart entre le quantile 0,025 et le quantile 0,975 de la distribution des moyennes. Cet intervalle absolu est ensuite divisé par deux, puis par la moyenne du tirage pour obtenir le demi-intervalle relatif (IC relatif). Ces différentes valeurs d'intervalle sont mises en relation avec la taille de l'échantillon dans un graphique. Ces graphiques montrent que l'intervalle de confiance relatif se stabilise à partir de 10 tiges mesurées, ce qui confirme a posteriori la méthodologie de l'Inventaire Permanent (ALDERWEIRELD, 2007).

La règle de maximum 10 arbres par placette, dans un rayon maximum de 18 m ⁽⁶⁾ autour du centre de la placette, a donc été retenue. Sont inclus les chênes indigènes et les hêtres dominants et codominants, les arbres dominés étant optionnels car trop influencés par la concurrence. Pour arbitrer les cas litigieux, le seuil de 80 cm de circonférence à 1,5 m de haut a été fixé. Dans le cas de la disparition d'un arbre échantillonné (accident, coupe), une nouvelle tige doit être désignée. Une mise à blanc sera remplacée par une autre placette de caractéristiques comparables, choisie au sein de la grille simplifiée de l'Inventaire Permanent (§ 3.4.3). Une cépée est considérée comme un individu et non comme un groupe d'individus. Les arbres à observer doivent être numérotés

⁶ Soit une surface 10 ares.

définitivement et sans ambiguïté : les individus nouvellement inclus doivent avoir leurs propres numéros et non ceux des disparus.

La prise des données s'est déroulée du 13 juillet 2009 au 28 août 2009. 223 arbres ont été décrits (21 chênes, 202 hêtres). Le nombre d'arbres par placette varie de 1 à 13. Les arbres sont répartis de la façon exposée à la Figure 14.

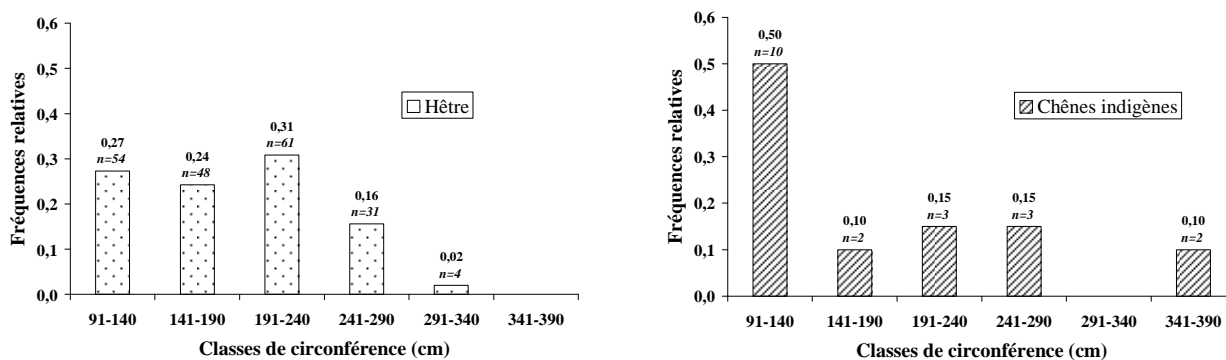


Figure 14. Distribution des classes de circonférence dans l'échantillon (hêtre, chênes à droite)

3.4.5. Observations dans les unités d'échantillonnage

Le programme international concerté sur les forêts *ICP forests* (*International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests*) est chargé du suivi de l'état sanitaire à travers toute l'Europe (DESHAYES *et al.*, 2006)⁷. Ce programme a été lancé en 1985 dans le cadre de la convention sur le transport à longue distance de la pollution atmosphérique (*Convention on Long-range Transboundary Air Pollution*) de la Commission Economique des Nations Unies pour l'Europe (UNECE). Un comité d'experts révisé régulièrement la méthodologie à suivre. Le principe est de coter divers critères (défoliation, décoloration, volume de fructification, symptômes...) à observer à l'œil nu ou aux jumelles, en été. Des intercalibrations internationales régulières assurent de la cohérence, dans le temps et dans l'espace, des données recueillies.

Le protocole du présent projet s'inspire directement de la convention *ICP forests*. Une version traduite et adaptée du manuel a été préparée pour ce projet (§ 3.4.6). Ce protocole est basé sur l'observation des arbres à l'œil nu ou à la paire de jumelles. Cette évaluation visuelle décrit l'arbre en trois étapes : (i) description des conditions d'observation, (ii) évaluation proprement dite de l'état du houppier, (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 numéro (« code »). Les options de chaque critère sont reprises dans aide-mémoire de terrain spécialement préparé (§ 3.4.6), et les codes sont inscrits dans une fiche d'Inventaire Sanitaire formatée.

Les observations se font sur le houppier dit « évaluable ». Ce houppier évaluable est défini comme la couronne visible au moment de l'évaluation, indépendamment de son passé ou de son avenir. Le houppier évaluable inclut seulement les zones qui ne sont pas influencées (c'est-à-dire ombragées) par les arbres voisins.

⁷ Il existe d'autres méthodes basées sur le même principe, notamment celle développée par NAGELEISEN (1995) en France. L'intérêt de la méthode *ICP FORESTS Forests* réside dans son application à l'échelle européenne et sa relative ancienneté.

(i) La description des conditions d'observation

Visibilité

La visibilité d'un houppier correspond aux conditions sous lesquelles le houppier évaluable peut être vu à partir du sol.

Les niveaux suivants sont utilisés pour le houppier évaluable :

Niveau	Description
1	houppier entièrement visible
2	houppier partiellement visible
3	houppier partiellement visible mais à contre-jour
4	houppier non visible

Statut social

Le statut social est une mesure relative de la taille et de la place d'un arbre par rapport aux arbres environnants. Connaître le statut social permet de mieux interpréter l'état de la couronne d'un arbre. Par exemple, les arbres dominants sont supposés être plus sensibles au stress que les arbres co-dominants, mieux insérés dans la masse de la canopée.

Quatre classes sont définies :

Statut	Description
1	Dominant (ou arbre en croissance libre)
2	Codominant : arbres dont les houppiers s'insèrent dans la masse générale de la canopée
3	Sous-dominant : arbres dans les houppiers touchent la canopée mais de taille plus faible que la moyenne
4	Dominé : arbres largement dépassés par les autres et ne recevant aucune lumière directe.

Indice d'ombrage (concurrence)

L'indice d'ombrage est une évaluation de la liberté de croissance de l'arbre. Un changement dans le degré d'ombrage peut avoir des effets significatifs sur l'état de couronne.

Selon la surface touchée par les arbres voisins (ombre ou contact physique), 6 niveaux sont définis :

Niveau	Description
1	houppier significativement touché par les arbres voisins (ombre ou contact physique) sur un côté
2	houppier significativement touché par les arbres voisins (ombre ou contact physique) sur deux côtés
3	houppier significativement touché par les arbres voisins (ombre ou contact physique) sur trois côtés
4	houppier significativement touché par les arbres voisins (ombre ou contact physique) sur quatre côtés
5	houppier en croissance libre, sans ombrage significatif
6	arbre dominé

(ii) Les critères diagnostiques

Deux critères diagnostiques sont particulièrement importants, étant donné leur caractère intégrateur : (i) la défoliation et (ii) la structure du houppier.

La défoliation

La défoliation est définie comme la perte foliaire dans la partie évaluable du houppier, par comparaison à un arbre sain de référence. L'évaluation de la défoliation ne préjuge pas des causes de défoliation. C'est une stricte quantification d'un volume de biomasse. La défoliation est évaluée par intervalles de 5%. Un score de 100% est donné aux arbres morts (UNECE, 2006).

Structure du houppier

La structure du houppier est définie comme l'architecture des organes aériens de l'arbre. Elle varie avec le temps et selon différents stades de développement. La perte de vitalité se traduit par une simplification progressive de la ramification.

L'évaluation se base sur le degré de simplification de la ramification. Le manuel *ICP forests* (UNECE, 2006) propose quatre catégories (« houppier dense », « simplification légère », « simplification sévère », « déclin ») pour les pins, les chênes et le hêtre, décrites par des critères indicatifs et des illustrations.

Autres signes diagnostiques

La décoloration des feuilles

La décoloration est définie comme toute altération de la couleur normale du feuillage de l'espèce observée, que ce soit par la teinte ou par la répartition de cette couleur (UNECE, 2006). Elle s'évalue selon l'échelle décrite au Tableau 9 (les classes correspondent aux codes à inscrire) :

Tableau 9. Classes de décoloration

Niveaux	% de feuilles /aiguilles décolorées	Degrés de décoloration
1	0-10 %	Aucune
2	> 10 et <= 25 %	Légère
3	> 25 et <= 60%	Modérée
4	> 60 %	Sévère
5	Arbre mort	Arbre mort

Fructification

La fructification est le processus biologique de développement des fruits. Elle est contrôlée par l'environnement (photopériode, humidité, température, mécanismes de pollinisation, etc.) et la physiologie de la plante. Dans le cas de l'évaluation de l'état sanitaire, il s'agit d'estimer la fructification dans le houppier. Seuls les fruits produits au cours de l'année de l'évaluation doivent être pris en compte.

Deux évaluations distinctes sont à être réalisées pour chaque arbre : (i) dans la partie du houppier cotée en défoliation et (ii) dans le houppier entier. Dans chacun des cas, trois niveaux sont proposés :

Niveaux	Description
1	fructification absente ou rare
2	fructification visible
3	fructification abondante, au point de dominer l'aspect visuel de l'arbre.

Gourmands et pousses épicorniques

Les gourmands et les pousses épicorniques proviennent du débourrement de bourgeons dormants présents sur les branches ou le tronc. Chez les feuillus, le développement de gourmands dans le houppier et sur le tronc peut être dû à une mise en lumière, ou à un stress particulier. 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.

Trois niveaux sont définis. Ils décrivent chacun une fréquence donnée des pousses épicorniques visibles dans le houppier et sur le tronc. L'évaluation doit inclure toutes les pousses secondaires et pas seulement celles de l'année en cours. Ces trois niveaux sont :

Classe	Niveau
1	aucune pousse secondaire, ou rare
2	moyen : développement réduit ou pousses épicorniques limitées à quelques points du houppier ou du tronc
3	abondant : présent dans une grande partie du houppier, ou sur toute la surface du tronc.

(iii) Les dommages et symptômes

L'évaluation des causes des dommages comprend trois parties majeures :

- La description des dommages / symptômes
- La détermination de la cause
- La quantification de l'extension des dommages / symptômes

La description des dommages / symptômes doit être réservée aux facteurs importants qui peuvent avoir un impact actuel ou futur sur l'état des couronnes. Lors de la description, la partie de l'arbre affectée et sa localisation dans le houppier sont d'abord précisés. Trois catégories principales reprennent les parties affectées de l'arbre : (i) les feuilles / aiguilles, (ii) les branches, bourgeons et rameaux, et (iii) le tronc et le pied. Pour chaque catégorie une spécification plus fine est prévue. Les dommages / symptômes proprement dits sont ensuite décrits, avec de nombreuses options (blessures, déformations, nécroses, etc.). La même démarche s'applique pour la désignation des agents responsables, avec un choix parmi de nombreuses catégories (vertébrés, arthropodes, causes abiotiques, etc.). Dans chaque catégorie, des options plus précises permettent d'affiner encore davantage la description.

Manière d'observer

Les observations doivent être effectuées par groupe de deux ou plus. Les observateurs confrontent leurs évaluations :

- Chacun des observateurs se positionne à un point d'où le houppier est largement visible, situé à une distance égale à une fois et demie la hauteur estimée de l'arbre.
- Chacun des observateurs donne alors un premier score, provisoire, pour les différents paramètres.
- L'opération est répétée à partir d'un ou deux autres points d'observation. L'évaluation est ensuite rapidement débattue entre les deux observateurs, avant d'indiquer finalement une note unique.

La meilleure période d'observation est située après le débourrement complet du printemps et avant les premiers signes automnaux. Idéalement, la période d'observation doit être comprise entre le 15 juillet et le 15 août.

3.4.6. Formation des adjoints forestiers

Les adjoints forestiers sont chargés de l'évaluation de l'état sanitaire des 34 placettes sélectionnées. Ils doivent donc être formés pour estimer correctement l'état des houppiers selon les prescriptions du protocole adapté *ICP forests* (§ 3.4.5). Une formation théorique et pratique a été dispensée aux adjoints forestiers de l'IBGE le 25 juin 2009. Elle consistait en un exposé théorique de l'évaluation visuelle des houppiers, suivi d'une mise en pratique. Dans la partie théorique, les critères d'évaluation ont été successivement présentés, d'abord par leur définition, puis par la manière de les estimer, le plus souvent à l'aide d'illustrations. Quelques dommages et symptômes, parmi les plus courants, ont été montrés. La mise en pratique a d'abord consisté en un exercice d'estimation des principaux critères sur base de photographies, avec un exemplaire de fiche d'inventaire comme support. Ensuite, les peuplements alentour ont été visités sous la direction de M. Frédéric HARDY, gradué attaché à l'UCL et spécialiste de l'évaluation visuelle des houppiers (Figure 15). Les gardes forestiers étaient invités à estimer eux-mêmes le niveau de défoliation et les indices les plus visibles, pour en débattre ensuite avec les chercheurs.



Figure 15. Formation du 25 juin 2009, à la maison forestière de Bonne-Odeur.

Une fois la campagne d'observation lancée en juillet 2009, deux autres exercices pratiques sur base de photographies ont eu lieu. Lors de ces exercices, des aide-mémoires rappelant succinctement les principaux éléments de l'évaluation et les fiches d'Inventaire Sanitaire ont été présentés et distribués. Durant la période d'inventaire, chaque groupe d'agents a été suivi au moins une fois sur le terrain par un chercheur, dans le but de répondre aux questions pratiques, d'aligner les estimations de la défoliation entre observateurs et d'actualiser le protocole de terrain grâce aux conclusions de la dernière intercalibration européenne. Dix placettes (un peu moins d'un tiers du total) ont ainsi été visitées en présence du chercheur. Il a été constaté à cette occasion que la défoliation de 63 arbres (soit 29% des arbres) n'avait pas été observée, principalement à cause des mauvaises conditions de visibilité. À l'usage, le seuil de 80 cm de C150 (§ 3.4.4) a été porté à 100 cm, ce qui diminue le nombre d'arbres analysés.

3.4.7. Mise en œuvre

Les 34 placettes de la grille d'inventaire ont été choisies parmi les placettes de l'Inventaire Permanent (§ 3.4.3). Le centre de ces placettes est matérialisé par un piquet métallique de 30 cm enfoncé jusqu'au ras du sol. Quatre arbres témoins (arbres d'élite marqués d'un chiffre romain, Figure 16)⁸ signalent la proximité du piquet (ALDERWEIRELD, 2007). Les 431 points de l'Inventaire Permanent sont déjà matérialisés sur le terrain.



Figure 16. Arbre témoin, marqué d'un chiffre romain.

Le travail se déroule en 4 étapes :

- 1) positionnement de la placette à l'aide de l'appareil GPS (ALDERWEIRELD 2007)
- 2) Détermination du rayon de la placette, qui doit inclure 10 arbres observables au plus dans un rayon maximum de 18 m⁹.
- 3) Sur la fiche de l'Inventaire Permanent, les distances, azimuts et circonférences des arbres de plus de 80 cm de circonférence à 1,5 m sont inscrits. Les arbres sont aussi numérotés, en commençant par celui le plus proche du Nord, puis en progressant dans le sens horloger. Ces numéros sont identiques pour l'Inventaire Permanent et l'Inventaire Sanitaire.
- 4) Sur la fiche de l'Inventaire Sanitaire, les notations des critères *ICP forests* sont inscrites. Si le rayon de l'Inventaire Sanitaire dépasse celui de l'Inventaire Permanent et inclut de nouveaux arbres, la distance et l'azimut de ceux-ci sont ajoutés sur la fiche de l'Inventaire Sanitaire, dans les colonnes prévues à cet effet.

⁸ Les arbres-témoins sont désignés une fois que tous les arbres de la placette sont mesurés. Les arbres-témoins portent donc deux numéros : le numéro d'ordre dans la série de mesures (en chiffres arabes) et le numéro-témoin (en chiffres romains) (FUSAGx, 2007).

⁹ L'Inventaire Permanent prévoit un minimum de 15 arbres, même surcimés, de plus de 40 cm de C150 (ALDERWEIRELD, 2007). Il se peut donc que le rayon nécessaire pour l'Inventaire Sanitaire dépasse celui de l'Inventaire Permanent. Deux rayons coexistent alors sur la placette, selon que l'on se réfère à l'un ou à l'autre des inventaires.

Le matériel suivant est à emporter sur le terrain :

- une paire de jumelles,
- un guide-photo,
- un mètre-ruban,
- une boussole,
- un dendromètre Vertex®, son transpondeur et sa canne,
- un appareil GPS,
- un aide-mémoire reprenant les principaux codes prévus par la méthode,
- par placette, une fiche d'Inventaire Permanent, où l'opérateur inscrit le numéro de l'arbre décrit, sa circonférence et sa position (distance et azimut) par rapport au piquet,
- par placette, une fiche d'Inventaire Sanitaire, où l'opérateur décrit l'état de santé de l'arbre en inscrivant le chiffre (code) ICP *forests* correspondant à l'option choisie (§ 3.4.5).

Idéalement, la période d'observation doit être comprise entre le 15 juillet et le 15 août (§ 3.4.5). Pour des raisons pratiques, cette période a dû être prolongée. La prise des données s'est déroulée du 13 juillet 2009 au 28 août 2009.

3.4.8. Assurance qualité

Au niveau international, pour contrôler la qualité et la consistance des données, le programme *ICP forests* prévoit des cours d'intercalibration : les experts nationaux de différents pays se réunissent pour confronter leur expérience et ajuster leurs appréciations des principaux indices sanitaires.

La session des cours d'intercalibration 2009 a conduit à quelques constatations :

- 1) l'estimation de la défoliation pour un même arbre varie d'un pays à l'autre, les variations étant plus importantes en pessière qu'en hêtraie. Cependant, ces variations restent faibles et la cohérence des évaluations est tout à fait satisfaisante.
- 2) La définition du houppier évaluable diffère parfois fortement d'un pays à l'autre. Il a donc été convenu de se restreindre à la définition la moins ambiguë : le houppier évaluable se limite à la partie du houppier située au-dessus de la plus grande largeur, ce qui correspond dans la plupart des cas au tiers supérieur de la couronne.

Au niveau de la Forêt de Soignes bruxelloise, pour contrôler la cohérence des estimations de la défoliation, trois placettes ont été visitées deux fois : une première fois en juillet 2009, une deuxième fois en août 2009. Quatre arbres évalués en juillet ne l'ont pas été en août. 65% des estimations de défoliation sont équivalents à 10% près. Les chiffres sont exposés au Tableau 10. La Figure 17 montre la distribution des données autour d'une droite verte représentant une correspondance parfaite des estimations. Les droites pointillées rouges correspondent à un intervalle de 10% de défoliation autour de cette correspondance parfaite.

Tableau 10. Défoliations estimées en juillet et en août 2009, avec les écarts entre chaque analyse.

Placettes	N° arbre	Défoliation (%)		Écarts		
		Juillet 2009	Août 2009	5%	10%	>10%
3511	6	20	20	1	0	0
3511	1	30	25	1	0	0
3511	5	30	35	1	0	0
3511	3	30	40	0	1	0
3511	7	35	45	0	1	0
3511	4	65	70	1	0	0
3511	2	85	-	0	0	1
3595	15	25	20	1	0	0
3595	19	30	25	1	0	0
3595	20	35	40	1	0	0
3669	5	15	25	0	1	0
3669	7	25	30	1	0	0
3669	6	30	45	0	0	1
3669	8	30	60	0	0	1
3669	2	30	-	0	0	1
3669	3	30	-	0	0	1
3669	4	40	-	0	0	1
Moyenne		37	34	37	18%	35%

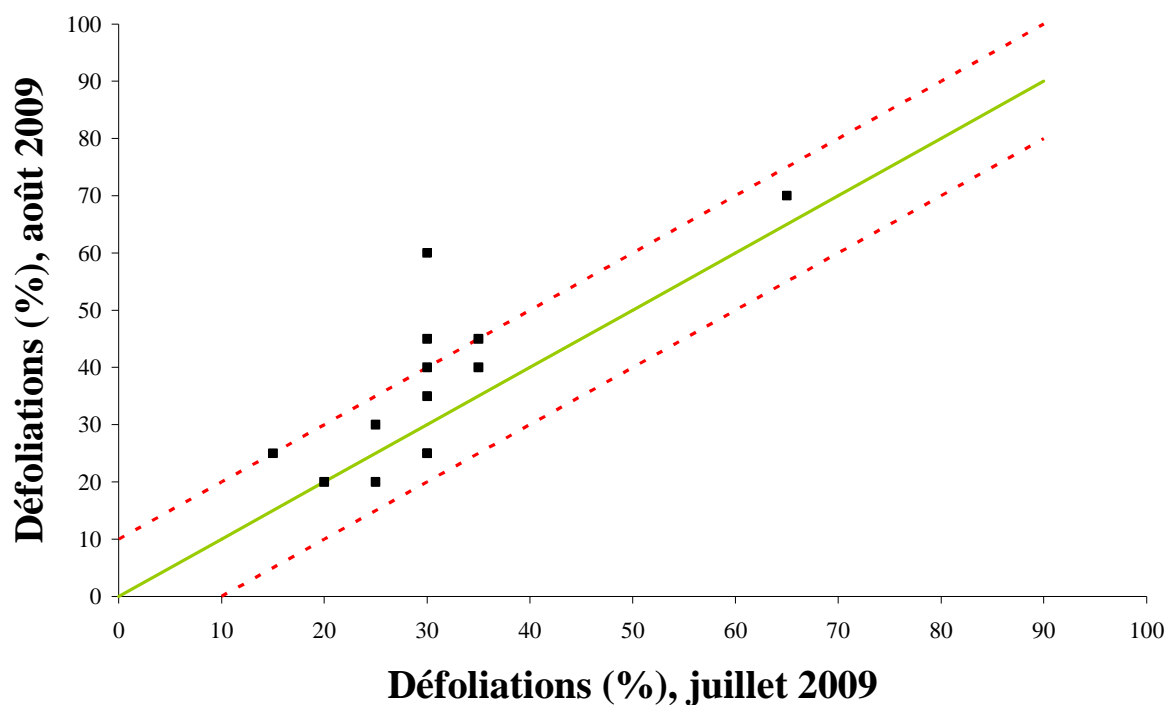


Figure 17. Correspondance des évaluations de la défoliation sur 13 arbres, répartis en trois placettes. Les droites pointillées représentent un intervalle de 10% par rapport à la droite 1 :1.

3.4.9. *Traitement des données*

Les fiches d'Inventaire Sanitaire et d'Inventaire Permanent de chaque placette visitée ont été réunies. L'ensemble des données recueillies au cours de la campagne ont ensuite été enregistrées 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.

Il est intéressant de vérifier les relations entre la défoliation et certaines variables explicatives comme la structure du houppier etc. L'effet de ces variables a été testé grâce à une ANOVA à un critère. Dans la présentation des résultats, la valeur P est indiquée pour le hêtre et pour les chênes. Les ANOVAs ont été réalisés sous le logiciel JMP 8. Pour chaque facteur, les Défoliations moyennes ont été calculées. 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 figures sont présentées avec une convention graphique permettant d'apparier les moyennes statistiquement semblables. Le test de Tukey est réalisé sous le logiciel JMP 8.

4. Résultats et discussions de l'évaluation visuelle des houppiers

Étant donné leur importance, les chiffres concernant la défoliation sont présentés en premier. Viennent ensuite les facteurs expliquant la défoliation, puis les autres paramètres décrivant l'état sanitaire des arbres. Enfin, un paragraphe est consacré aux symptômes et dommages. Hormis pour les indicateurs les plus importants, les données pour les chênes indigènes ne sont pas présentées, car l'effectif (21 tiges) est trop petit pour tirer des conclusions valides sur le plan statistique.

Remarques

- Dans les graphiques, les données relatives au hêtre sont rangées à gauche (motif ponctué) et celles relatives aux chênes sont rangées à droite (motif hachuré).
- Les graphiques présentant les défoliations moyennes sont, le cas échéant, dotés d'une barre d'erreur représentant l'intervalle de confiance calculé à partir de l'écart-type de chaque moyenne, avec un α de 0,05.
- Dans les relations entre un facteur donné et la défoliation, les classes indiquées par des lettres communes ne sont pas significativement différentes, au sens du test de Tukey (§ 3.4.9).

4.1. Défoliation

La défoliation moyenne pour le hêtre est de 37%. Elle est de 30% pour les chênes indigènes. Une analyse de la variance ne montre aucune différence significative entre les défoliations moyennes selon l'essence. L'ensemble des 160 arbres de défoliation connue (§ 3.4.8) présente une défoliation moyenne de 36,25%.

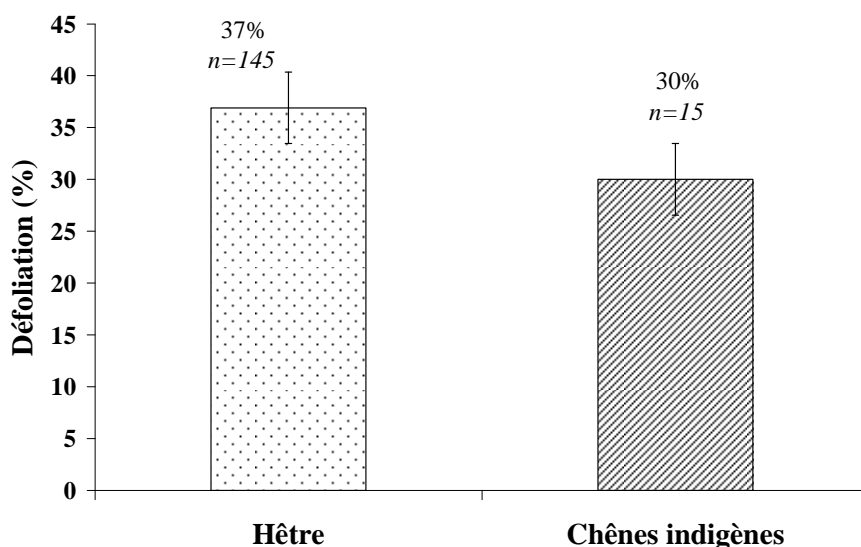


Figure 18. Défoliations moyennes par essence.

La défoliation chez le hêtre suit une distribution de type log-normale étirée vers la droite (Figure 19). 81% des hêtres ont un niveau de défoliation supérieur à 25%. 62% des chênes ont un niveau de défoliation supérieur à 25% (Figure 19). Suivant les niveaux de défoliation définis par le manuel *ICP forests* (FABIANEK (2004) : Tableau 11 et Figure 20), plus des deux tiers des hêtres observés présentent un « dépérissement net ». Seuls 2 hêtres sur 145 (soit 1%) sont considérés comme « sains ».

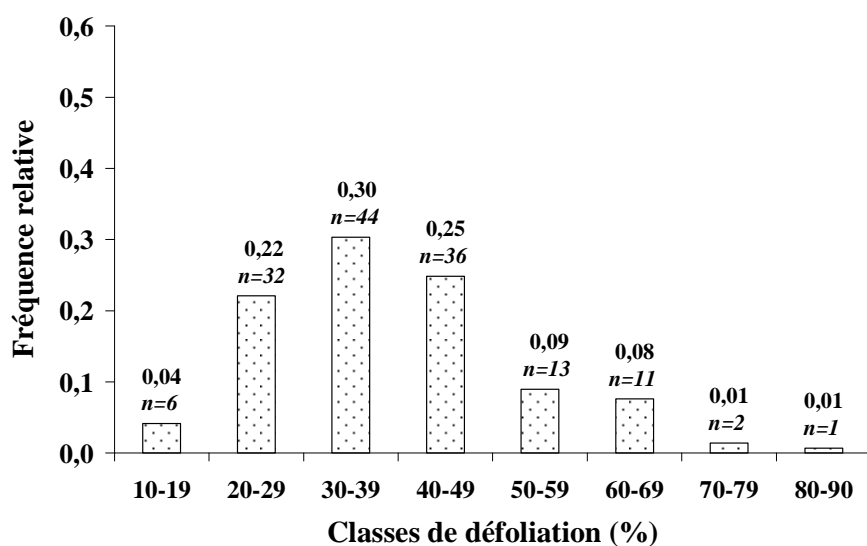


Figure 19. Distribution des arbres échantillonnés selon les classes de défoliation (hêtre)

Tableau 11. Classes de défoliation (FABIANEK, 2004)

Pourcentage de défoliation	Degré de défoliation	Degré de dépérissement (<i>sic</i>)
0-10%	Aucune	Arbre sain
> 10-25%	Légère	Début de dépérissement
> 26-60%	Modérée	Dépérissement net
> 60 - <100%	Sévère	Dépérissement très avancé
100%	Arbre mort	Arbre mort sur pied

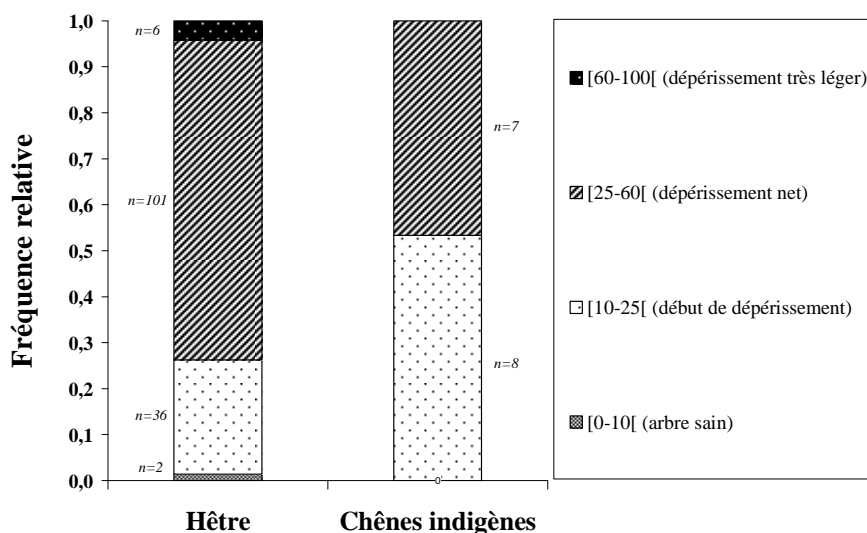


Figure 20. Distribution des arbres échantillonnés selon les classes de défoliation (en % ; cf. Tableau 1).

Le nombre de placettes par niveau de défoliation est exposé au Tableau 12. La répartition spatiale est exposée au Tableau 13 et à la Figure 21. La défoliation moyenne la moins élevée pour une placette est de 20%. La défoliation moyenne la plus élevée pour une placette est de 65%. Plus de la moitié des placettes présente une défoliation moyenne supérieure à 30%.

Tableau 12. Nombre de placettes par niveau de défoliation (chênes et hêtre confondus).

Critère	Nombre de placettes	Proportion (%)
Placettes sans données	2	6
De 0 à 10% de défoliation	0	0
De 11 à 20% de défoliation	1	3
De 21 à 30% de défoliation	8	24
Plus de 30% de défoliation	23	67

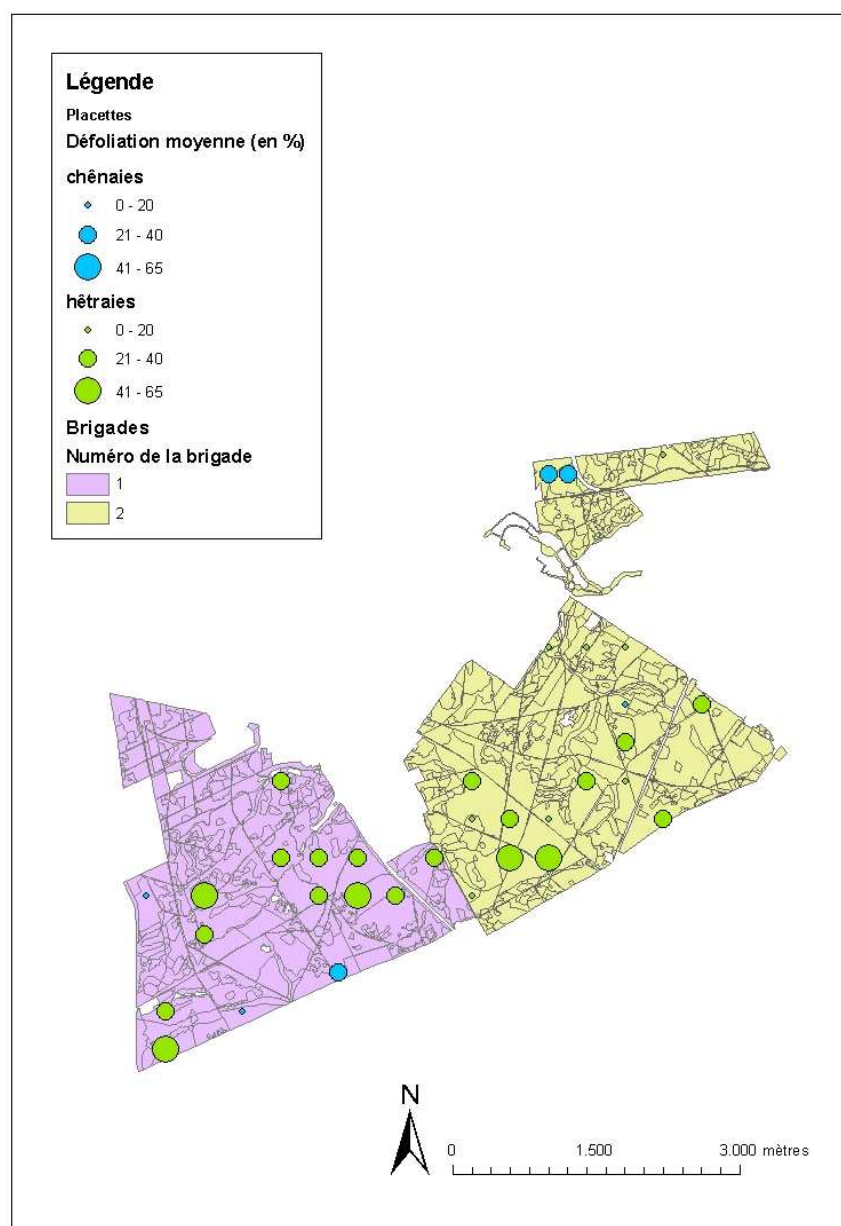


Figure 21. Défoliations moyennes par placettes (répartition spatiale)

Tableau 13. Défoliations moyennes par brigade

Brigade	Hêtre	Effectif	Chênes indigènes	Effectif
Première (moitié est)	39%	69	29%	4
Deuxième (moitié ouest)	35%	76	30%	11

Les défoliations moyennes observées en Forêt de Soignes bruxelloise sont à comparer aux chiffres recueillis en Wallonie et en Flandre¹⁰ en 2008 et 2009 (Tableau 14). Les défoliations moyennes notées en Wallonie dans le réseau de surveillance intensive (Ardenne) sont de 14% pour le chêne sessile¹¹ (1 placette) et 19% pour le hêtre (4 placettes) en 2009 (Mathieu JONARD, communication personnelle, novembre 2009). Dans l'ensemble de la région (réseau de niveau I, 49 placettes sur toute la Wallonie), on note pour 2008 : 17% pour le hêtre, 15% pour le chêne pédonculé, 12% pour le chêne sessile¹² (Christian LAURENT, communication personnelle, décembre 2009). En Flandre, les défoliations moyennes s'élevaient à 21% pour le chêne pédonculé (32 placettes) et à 14% pour le hêtre (11 placettes) en 2008 (SIOEN *et al.*, 2009). Les tableaux suivants montrent que c'est en Région Bruxelloise que les niveaux de défoliation les plus élevés sont observés. Le Tableau 15 fournit les défoliations moyennes dans deux autres placettes en Forêt de Soignes, en 2009. Il est très important de noter que, étant donné les protocoles d'échantillonnage, les âges, les compositions spécifiques et les conditions stationnelles différentes, les chiffres sont donnés à titre purement indicatif.

Tableau 14. Comparaison des défoliations moyennes observées en Belgique

	Bruxelles	Flandre	Wallonie
Année	2009	2008	2009
Hêtre	37%	14%	17%
Source	Présente étude	SIOEN <i>et al.</i> (2009)	Christian LAURENT (SPW), communication personnelle, décembre 2009

Tableau 15. Défoliations moyennes dans deux autres placettes en Forêt de Soignes (2009)

Commune	Tervuren	Hoeilaart
Massif forestier	Forêt de Soignes	Forêt de Soignes
Essences	Hêtre	Hêtre
Âge (année de plantation)	91 ans (1918)	154 ans (1855)
Défoliation moyenne	21,3%	19,2%
Source	Geert SIOEN (INBO) (communication personnelle, octobre 2009)	

¹⁰ Pour le détail de la méthodologie (placette, etc.) pratiquée en Flandre, cf. : SIOEN, G.; ROSKAMS, P. (2007). *Basiskennmerken van het bosvitaliteitsmeetnet in het Vlaamse Gewest; periode 1987-2005 (Level I)*. [INBO.R.2007.5]. Rapport de l'Institut voor Natuur- en Bosonderzoek, 2007(5). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek: Grammont : Belgique. 155 pp.

¹¹ Il reste difficile de comparer les chiffres de défoliation entre chênes d'espèces différentes, leurs aptitudes n'étant pas comparables.

¹² En Wallonie, niveau I, on note une augmentation de la défoliation moyenne depuis les années 2000, toutes essences confondues.

4.2. Facteurs affectant la défoliation

4.2.1. Âge et circonférence

Aucun effet manifeste de l'âge sur la défoliation n'a été mis en évidence (hêtre : $p=0,0097$, Figure 22). Il faut noter toutefois que l'âge attribué aux arbres analysés en Forêt de Soignes est celui du peuplement auquel ils font partie. Cet âge a été estimé sur base d'archives ; à défaut, il a été déduit à partir de données dendrométriques (TIMAL (2006), § 3.2.3.2). Les classes d'âges sont donc peu précises. Par contre, le stade de développement estimé sur base de la dimension a un effet significatif sur la défoliation du hêtre ($p=0,0004$). Chez le hêtre, la défoliation est d'autant plus élevée que la circonférence est importante. Il y a donc sans doute un effet positif de l'âge sur la défoliation qui n'a toutefois pas pu être mis en évidence, étant donné les incertitudes quant à l'estimation de l'âge (§ 3.2.3.2).

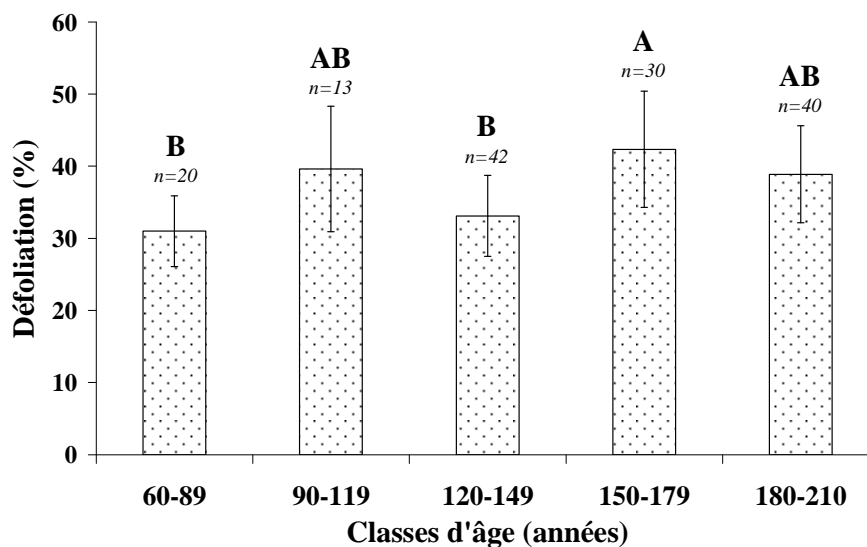


Figure 22. Défoliations moyennes par classes d'âges (hêtre)

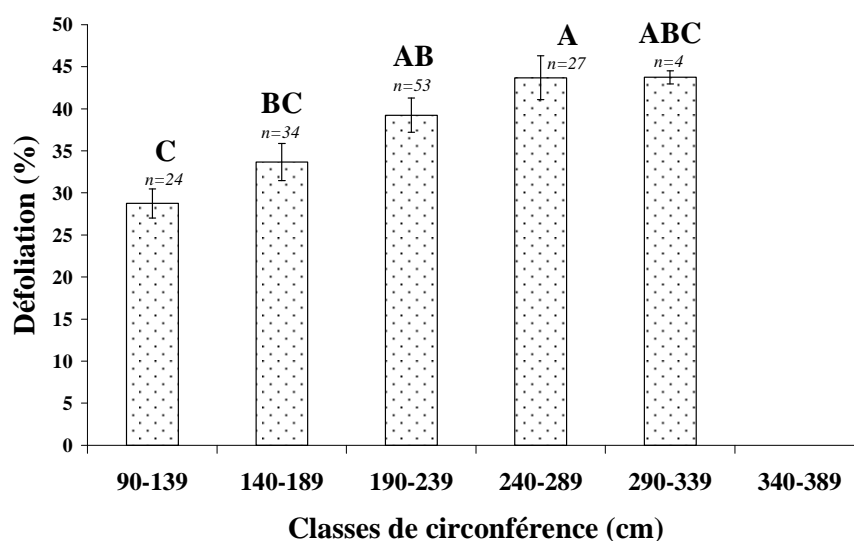


Figure 23. Défoliations moyennes par classes de circonférence (hêtre)

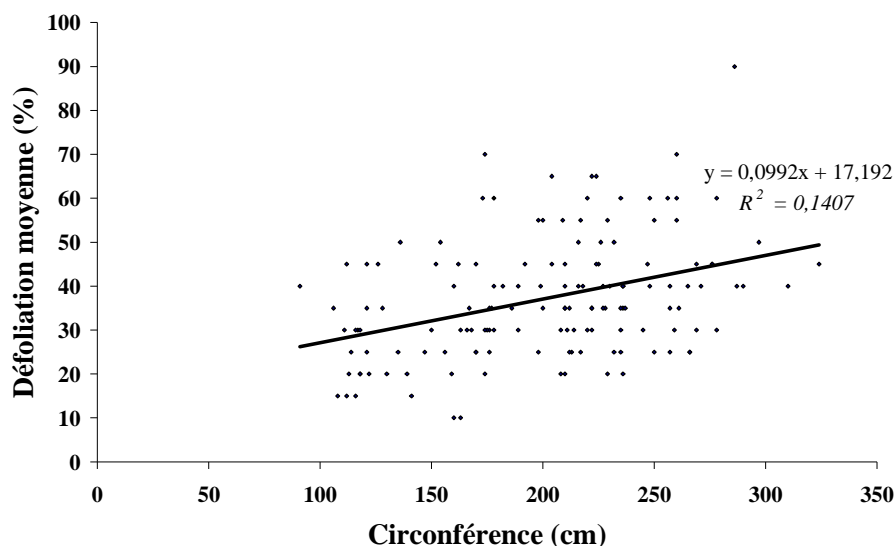


Figure 24. Droite de régression entre la circonférence et la défoliation, pour le hêtre

La Figure 24 montre la droite de régression entre la défoliation moyenne par arbre et la circonférence (pour le hêtre). La régression linéaire proposée a un coefficient R^2 faible (0,1407), ce qui signifie que le pouvoir explicatif de la défoliation par la circonférence est faible. La droite, cependant, est bien ajustée (Tableau 16). On peut affirmer que la défoliation est globalement proportionnelle à la circonférence. Un hêtre d'une circonférence de l'ordre de 250 cm présente en moyenne une défoliation de 40%.

Tableau 16. Paramètre de la droite de régression

<i>Terme</i>	<i>Estimation</i>	<i>p-valeur</i>
Constante	17,191792	0,0001
Pente	0,0992445	<0,0001

4.2.2. Sol

Aucune influence du sol (rangés dans les quatre types définis au § 3.2.2) sur la défoliation ne peut être déduite (hêtre : $p=0,0824$, Figure 25). Cependant, il est impossible de conclure sur une relation entre la défoliation et la nature du sol, étant donné la complexité du contexte édaphique de la Forêt de Soignes (§ 3.2.2).

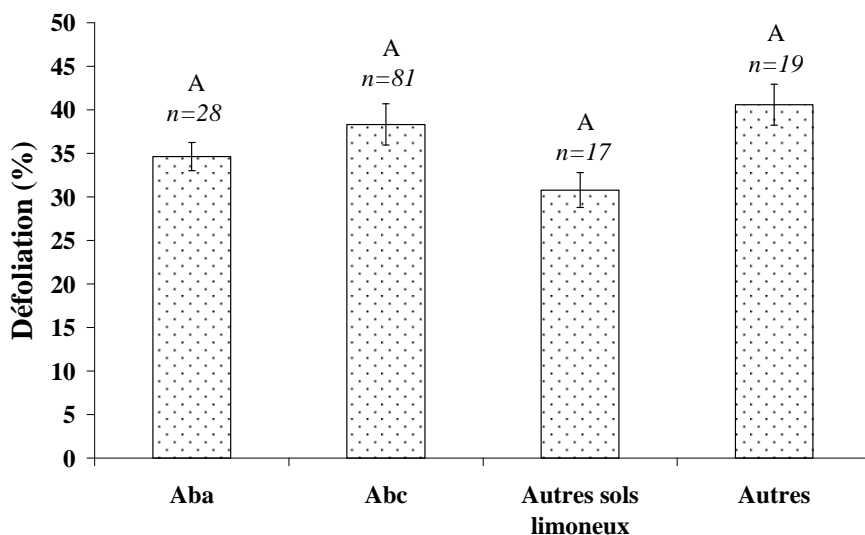


Figure 25. Défoliations moyennes par types de sols (hêtre).

Les quatre types de sols proposés ne reflètent pas les facteurs susceptibles d'expliquer le dépérissement. Pourtant, HERBAUTS *et al.* (1998) affirment que le dépérissement du hêtre en forêt de Soignes est probablement lié aux conditions édaphiques. Diverses études sur la pédologie de la forêt de Soignes suggèrent que les perturbations hydriques et les problèmes liés au fragipan sont particulièrement stressants pour le hêtre. Mais ces facteurs ne sont pas aisés à relever, c'est pourquoi ils n'ont pu être étudiés ici (BALLEUX et TIMAL, 2005).

4.2.3. Visibilité

Une légère influence de la visibilité est à noter pour le hêtre ($p=0,0203$), ce qui corrobore la relation observée entre concurrence et défoliation (§ 4.2.4).

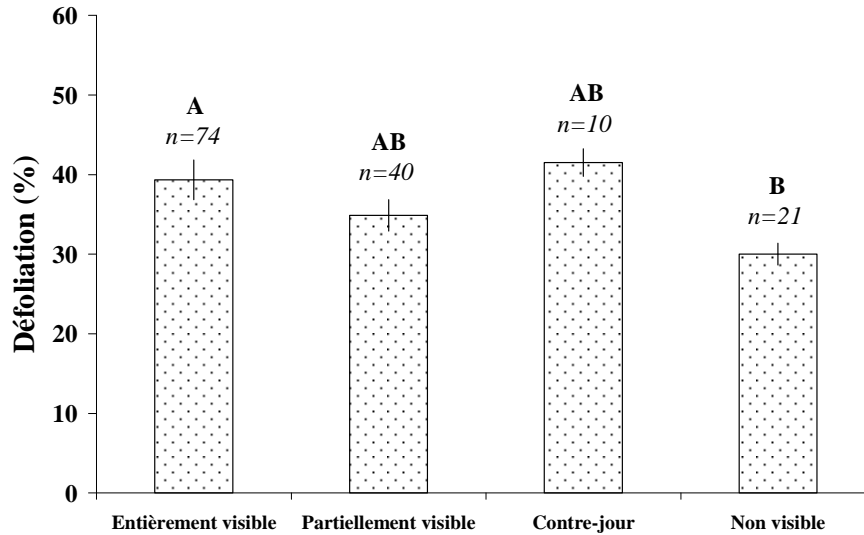


Figure 26. Défoliations moyennes par niveau de visibilité (hêtre).

4.2.4. Indice d'ombrage (concurrence)

Un peu moins de la moitié des hêtres analysés sont touchés des quatre côtés de leur houppier, c'est-à-dire qu'ils se trouvent dans des peuplements denses (Figure 27). Seuls 3% des hêtres croissent sans contraintes (le plus souvent dans les vieux peuplements fortement éclaircis).

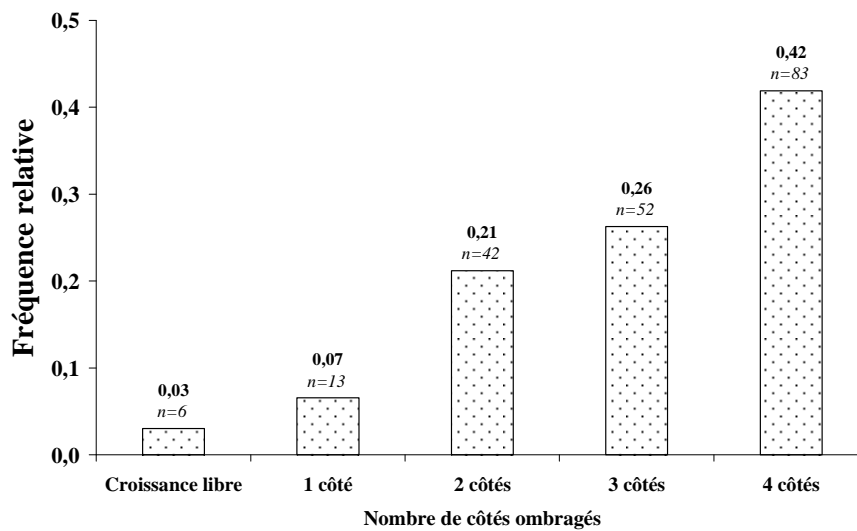


Figure 27. Distribution des arbres échantillonnés selon les niveaux d'ombrage (concurrence) (hêtre).

Pour le hêtre, la défoliation semble d'autant plus grande que la concurrence est faible, quoique l'effet reste léger ($p=0,0276$) (Figure 28).

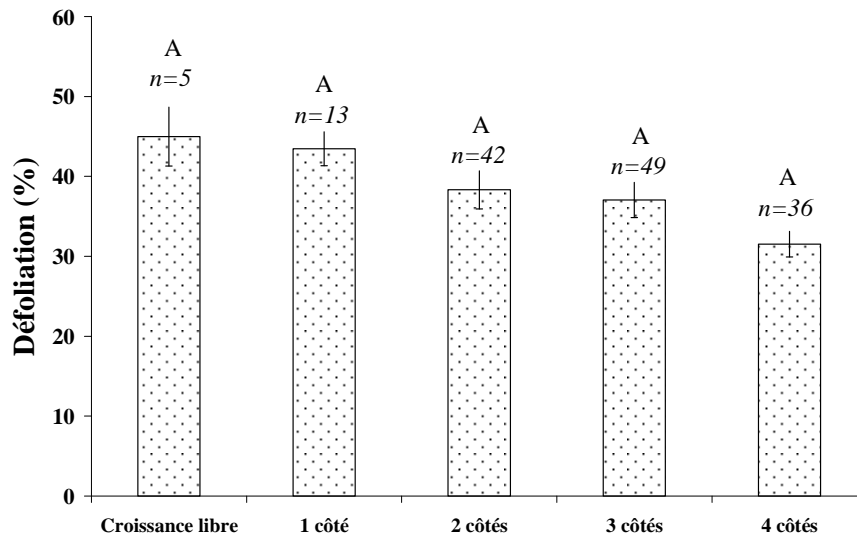


Figure 28. Défoliations moyennes par degré d'ombrage (concurrence) (hêtre)

4.2.5. Statut social

La Figure 29 montre qu'une majorité des arbres sont dominants ou codominants. Près de trois quarts des hêtres analysés sont dominants. Il faut néanmoins préciser que le protocole biaise la distribution en fonction du statut en écartant de l'échantillon les arbres surcimés. Au travers des observations, c'est le type de peuplement et de sylviculture qui transparait : futaie équiennne et monospécifique pour le hêtre.

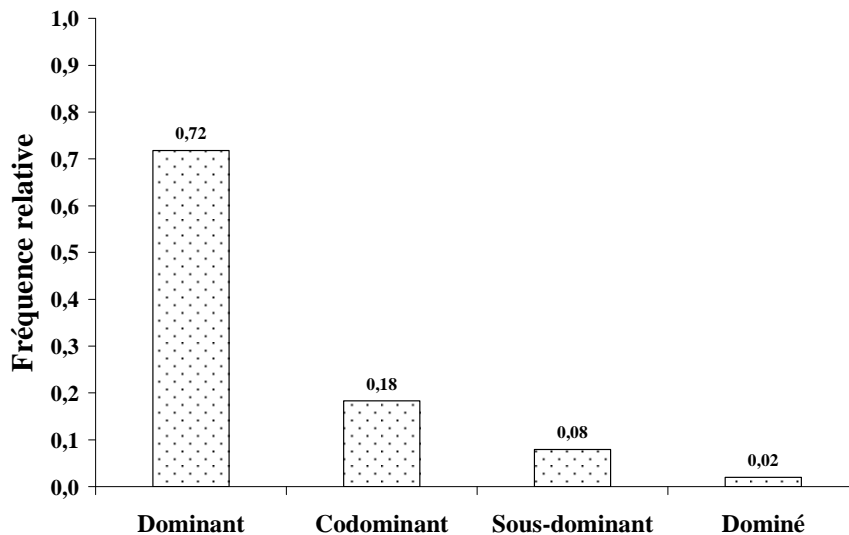


Figure 29. Distribution des arbres échantillonnés selon les classes sociales (hêtre).

Pour le hêtre ($p=0,0010$), la défoliation est plus forte chez les arbres *dominants* (Figure 30).

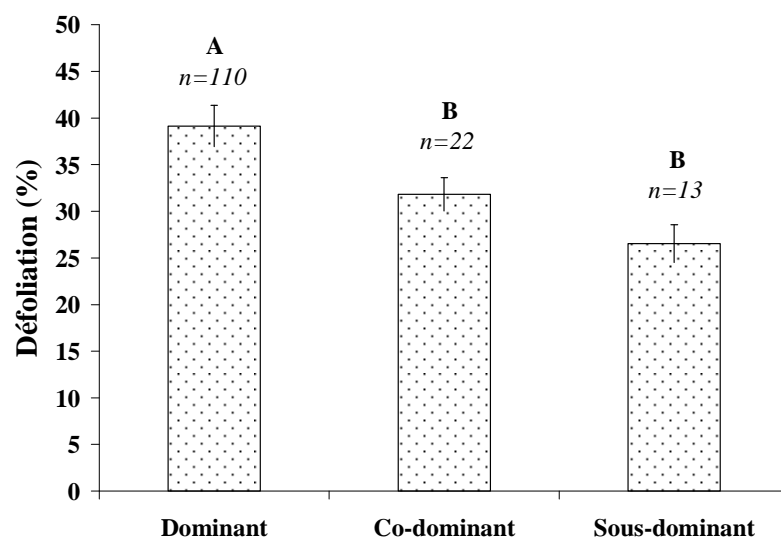


Figure 30. Défoliations moyennes selon le statut social (hêtre)

4.2.6. Pousses épicorniques

La plupart des hêtres observés ne présentait pas de pousses épicorniques. Seul un quart des hêtres et la moitié des chênes portaient des gourmands (§ 3.4.5). Un peu moins d'un quart des hêtres portent des gourmands en nombre « moyen » à « abondant ». Aucun effet manifeste entre l'abondance de pousses épicorniques et la défoliation n'est notée, pour aucune des deux essences (hêtre : $p=0,9604$, Figure 31).

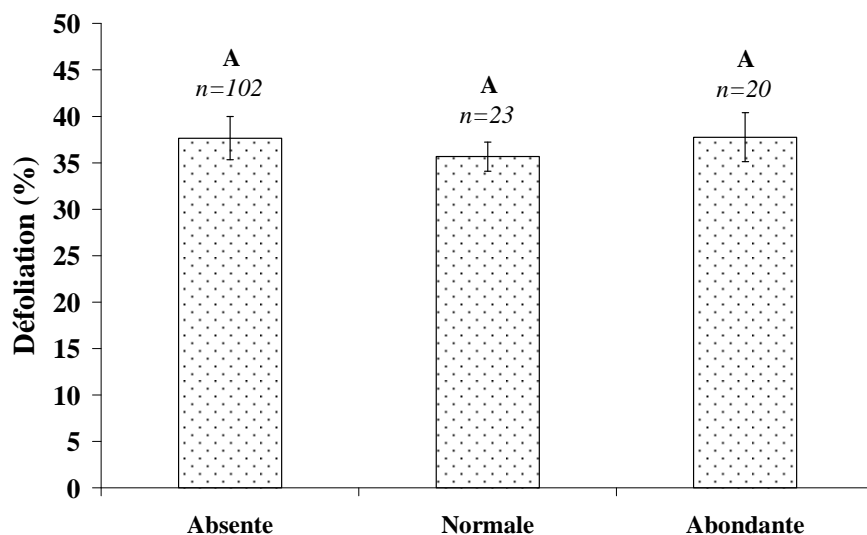


Figure 31. Défoliations moyennes selon l'abondance des pousses épicorniques (hêtre).

4.3. Autres indicateurs de l'état sanitaire

4.3.1. Décoloration

La plupart des arbres analysés (chênes et hêtre confondus) ne présentent aucune décoloration notable (Figure 32). Pour le hêtre, les arbres avec une coloration anormale sont de l'ordre de 20%. Pour les chênes, la proportion monte à 27%. À titre de comparaison, on observe en Wallonie (réseau niveau I) un peu plus de 9% de feuillus décolorés. Les deux échantillons, par leurs effectifs (167 tiges pour la forêt de Soignes, 589 tiges pour la Wallonie) et l'étendue de leur site d'étude, sont cependant difficilement comparables.

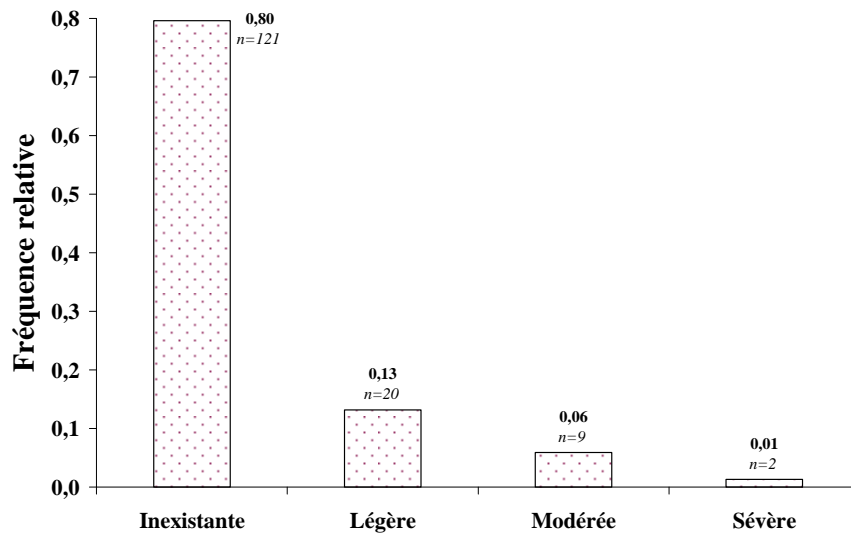


Figure 32. Distribution des arbres échantillonnés selon le niveau de décoloration (hêtre).

Pour le hêtre, la décoloration sévère s'accompagne d'une défoliation importante, quoique l'effectif (2 arbres) invite à la précaution ($p=0,0004$) (Figure 33). À noter que certaines études, dont celle de Christian Laurent (communication écrite, 2009), laissent supposer que la décoloration précède la défoliation à mesure des années.

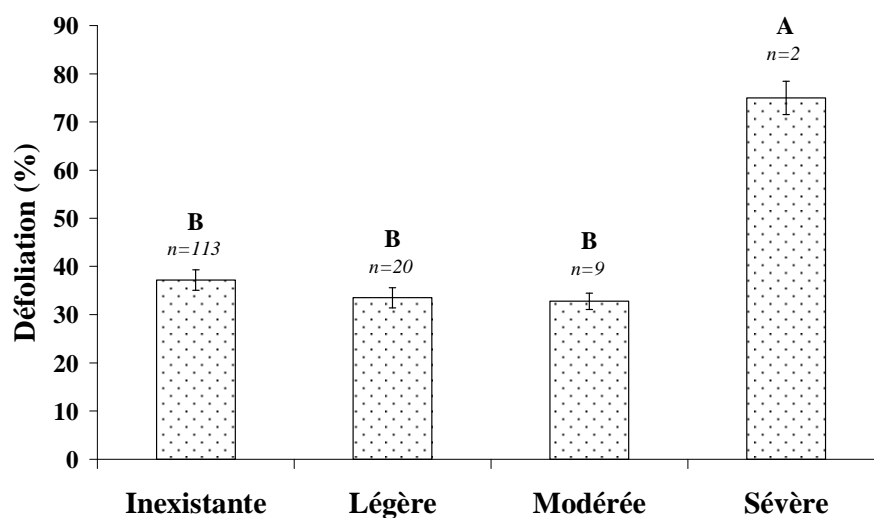


Figure 33. Défoliations moyennes par niveau de décoloration (hêtre).

4.3.2. Structure du houppier

Plus des deux tiers des hêtres analysés présentait une simplification plus ou moins importante de leur couronne (Figure 34). Cependant, les hêtres déclinants sont rares (4%).

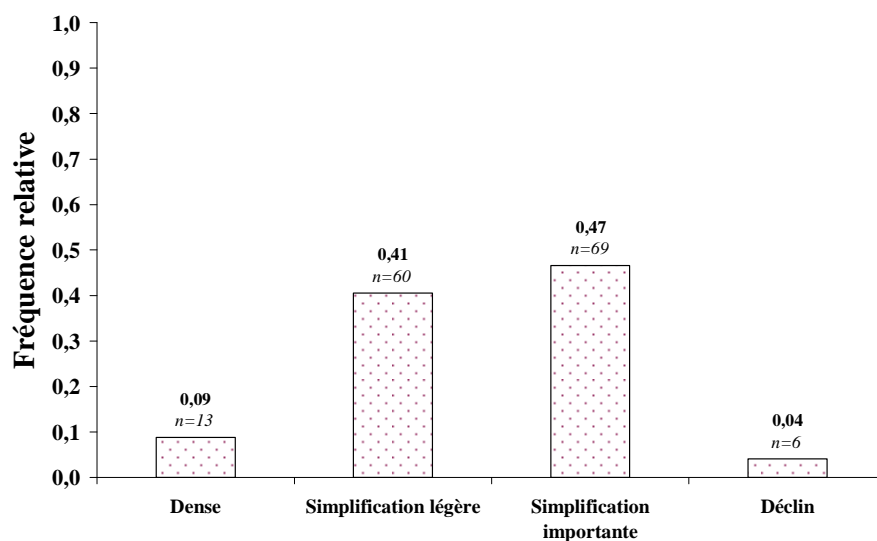


Figure 34. Distribution des arbres échantillonnés selon les structures de houppier (hêtre).

Il paraît évident que la structure du houppier a une répercussion sur la défoliation. Chez le hêtre, la relation entre défoliation et structure du houppier est très nette ($p < 0,0001$) (Figure 35). À partir des observations, un tableau de correspondances approximatives peut être dressé (Tableau 17). Ce tableau peut guider les opérateurs lors de leurs évaluations. Cependant, il ne peut en aucun cas être supposé que les deux facteurs sont liés de manière automatique, car la densité de feuilles sur les parties du houppier peut varier d'un individu à l'autre.

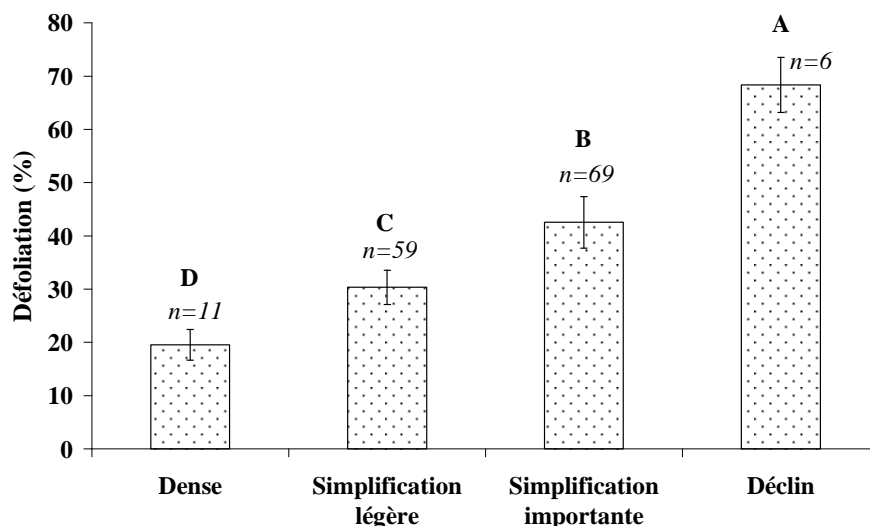


Figure 35. Défoliations moyennes par structures du houppier (hêtre).

Tableau 17. Correspondances approximatives entre la structure du houppier et le niveau de défoliation moyen (été 2009).

Structure du houppier	Niveau de défoliation (%)
Dense	20
Simplification légère	30
Simplification importante	40
Déclin	70

4.3.3. Fructification

Deux tiers des hêtres ont une fainée abondante (Figure 36). Seuls 10% des hêtres ne montrent aucun fruit dans le houppier supérieur.

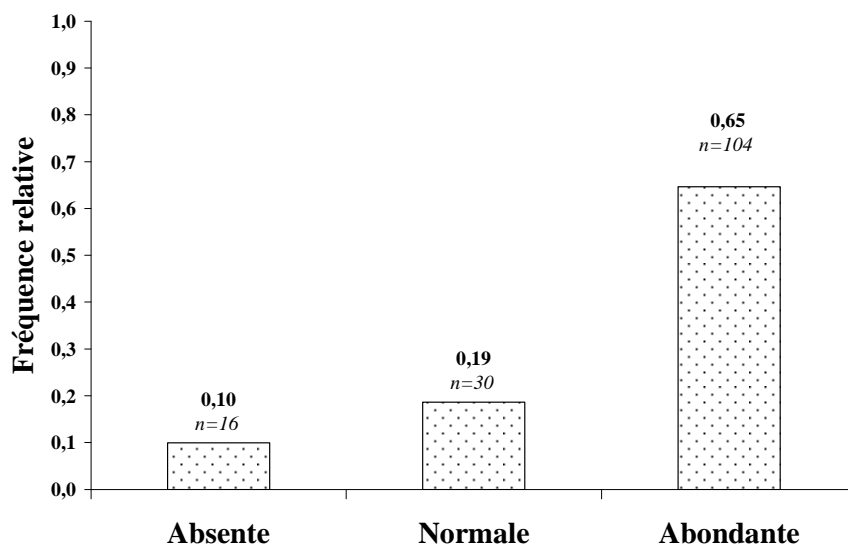


Figure 36. Distribution des arbres échantillonnés selon les niveaux de fructification (hêtre).

Pour le hêtre, la défoliation augmente avec le volume de fructification ($p < 0,0001$) (Figure 37). Le processus d'allocation des ressources (répartition des réserves de carbone et d'énergie dans les organes de l'arbre) peut expliquer cette observation.

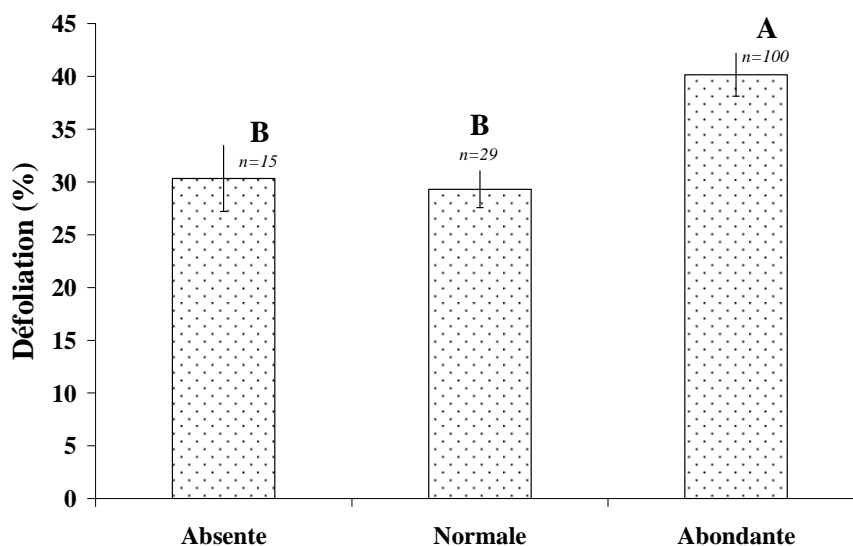


Figure 37. Défoliations moyennes par niveaux de fructification (hêtre).

4.4. Dommages et symptômes

64% des arbres analysés présentent au moins un dommage. Il n'y a qu'une seule placette sans symptôme ou dommage observés. Le pourcentage d'arbres avec un dommage ou plus par placette varie de 17% à 100%. 24 placettes sur 34 (c'est-à-dire 71%) présentent plus de 50% d'arbres avec au moins un dommage. Les symptômes les plus fréquemment notés (chênes et hêtre confondus) sont repris au Tableau 18 et à la Figure 38.

Tableau 18. Symptômes et dommages les plus fréquemment notés (chênes et hêtre confondus), selon la nomenclature ICP forests.

Partie affectée	Symptôme	Nombre de cas		
Branches	Diamètre de 2 à 10 cm	Mortes ou mourantes	48	} 66
	Diamètre variable	Mortes ou mourantes	18	
Rameaux	Rameaux de l'année en cours	Morts ou mourants	33	} 58
	Rameaux latéraux	Morts ou mourants	25	
Feuilles		Décolorées en vert clair	28	} 50
		Nanisées	22	

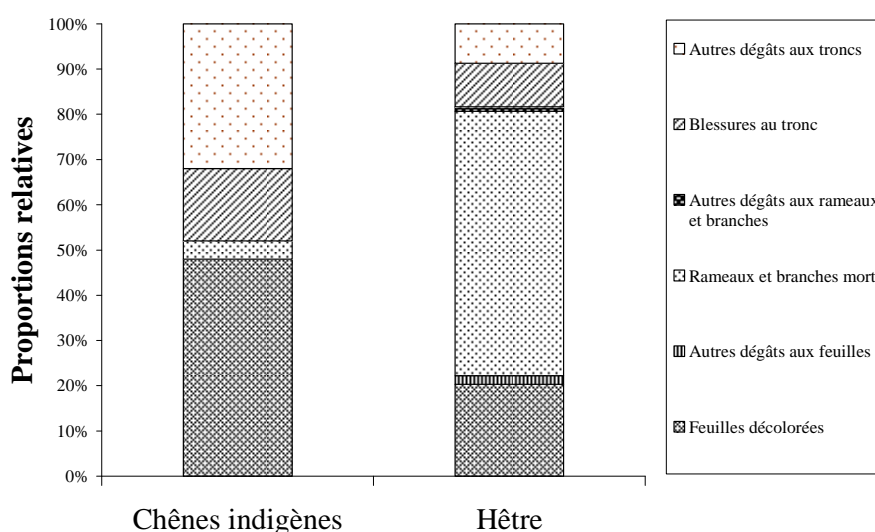


Figure 38. Dommages et symptômes observés (nomenclature ICP forests (UNECE, 2006)).

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 et branches morts qui sont principalement observés sur le hêtre. Les premières manifestations liées à la descente de cime (*dieback*, etc.) sont notées, principalement sur le hêtre. Quant au tronc, les blessures (meurtrissures d'origine accidentelle, plaies diverses, etc.) sont les dégâts les plus fréquents, devant les nécroses ou les déformations.

5. Futures campagnes d'observation

5.1. Distinguer les chênes indigènes

En ce qui concerne les chênes, les résultats obtenus sont limités par l'effectif réduit d'arbres échantillonnés (15 individus). Pour améliorer le diagnostic, il conviendrait d'augmenter les effectifs observés, en veillant à distinguer les deux espèces indigènes compte-tenu de leurs caractéristiques écologiques contrastées. La détermination des espèces pourra par exemple se faire en période de végétation, avec prélèvement d'échantillons de feuilles et de rameaux à l'échenilloir.

5.2. Observer tous les arbres

La proportion d'arbres non échantillonnés est fort importante (§ 3.4.8). Pour corriger cette perte d'information, l'observateur devra s'efforcer, dans le futur, d'estimer la défoliation même dans le cas de houppiers évaluables difficilement visibles. L'indication du manque de visibilité suffira à avertir de la moindre qualité de l'estimation. De plus, le seuil de 80 cm de C150 (§ 3.4.4) doit être rétabli et respecté à l'avenir.

5.3. Description des placettes

Il est difficile de mettre en évidence des facteurs qui pourraient expliquer le dépérissement observé. L'un des facteurs évoqués est le microrelief. Les travaux du Dr Roger LANGHOR montrent la grande complexité du contexte édaphique en Forêt de Soignes (§ 3.2.2). Les conditions pédologiques particulières peuvent aider à comprendre la santé des arbres. Il est donc intéressant de noter, dans le futur, ces détails du relief des placettes pour déceler une éventuelle influence. La description du microrelief n'est pour l'instant prévue que dans l'Inventaire Permanent, à titre de remarques fortuites notée sur la fiche (ALDERWEIRELD, 2007). Les récents travaux d'Hugues CLAESSENS et Julien DAISE (catalogue des stations, décembre 2009) peuvent aussi aider à interpréter les données sanitaires. Pour les prochaines campagnes de terrain, la notation du microrelief devra être systématique. Un choix multiple, inspiré de la méthode *ICP forests*, permettrait au descripteur de noter la situation observée dans un encart spécial de la fiche d'Inventaire Permanent (Tableau 19). Un autre facteur évoqué pour expliquer le dépérissement du hêtre est la dégradation physique des sols (compactage). Un encart et un choix multiple supplémentaires peuvent être proposés.

Tableau 19. Suggestion de choix multiple pour la description de la microtopographie (d'après LANGHOR, 2009).

Choix	Description
1	Dépression de 40 à 60 cm de profondeur
2	Dépression de 20 à 40 cm de profondeur
3	Dépression de moins de 20 cm de profondeur

Tableau 20. Suggestion de choix multiple pour la description de la dégradation physique du sol (d'après HERBAUTS *et al.*, 1998)

Choix	Description
1	Orniérage et surface perturbée par le passage d'engins Tapis herbacé de joncs, laîches et/ou de poivre d'eau Autres zones compactés Pas de compaction visible

5.4. Réduire le nombre de placettes

Pour réduire la charge des adjoints forestiers, il est proposé de scinder la grille de 34 placettes en trois sous-échantillons. Le premier est constitué des 6 placettes en chênaie et sera visité chaque année. Les deux autres sont situés en hêtraie, chacun avec une quinzaine de placettes. Ces deux sous-échantillons seront visités alternativement d'une année à l'autre. À partir de la grille des 28 placettes en hêtraie, en considérant cette grille comme une maille d'alignements nord-sud et est-ouest, deux options ont été prises : (I) supprimer une rangée nord-sud (« colonne ») sur deux, ou (II) supprimer une rangée est-ouest (« ligne ») sur deux. L'option choisie est celle qui assure la meilleure représentativité. Pour vérifier cette exigence, les défoliations moyennes et les distributions de circonférence de chaque sous-échantillon ont été comparées à celles issues de l'échantillon initial de 34 placettes :

- En sélectionnant une « colonne » sur deux (option I), le nombre de placettes de chaque sous-échantillon est inégal mais les défoliations moyennes sont équivalentes à la valeur de l'échantillon initial (Tableau 21). Les moyennes des circonférences mesurées à 1,5 m calculées pour chaque sous-échantillon sont équivalentes à la moyenne globale (Tableau 21), comme le confirme le test de Tukey. Avec une *p*-valeur de 0,8560, l'ANOVA permet aussi de conclure qu'il n'y a pas de différence significative entre les moyennes.
- En sélectionnant une « ligne » sur deux (option II), les défoliations moyennes de chaque sous-échantillon sont équivalentes à la valeur de l'échantillon initial (Tableau 21). Mais les moyennes des circonférences mesurées à 1,5 m calculées pour chaque sous-échantillon sont nettement différentes de la moyenne globale (Tableau 22), comme le confirme le test de Tukey. Avec une *p*-valeur de 0,0703, l'ANOVA permet aussi de conclure qu'il n'y a pas de différence significative entre les moyennes.

Tableau 21. Comparaison des défoliations moyennes entre les deux sous-échantillons. Les écarts-types sont indiqués entre parenthèses.

<i>Sélection par « colonnes » (option I)</i>	<i>Défoliation moyenne (%)</i>	<i>Nombre de placettes</i>	<i>Sélection par « lignes » (option II)</i>	<i>Défoliation moyenne (%)</i>	<i>Nombres de placettes</i>
A	39,3 (1,47)	15	A	37 (1,83)	14
B	36,1 (2,13)	13	B	37,5 (1,63)	14
34 placettes (hêtres)	37,3 (1,21)	34	34 placettes (hêtres)	37,3 (1,22)	34

Tableau 22. Comparaison des circonférences moyennes entre les deux sous-échantillons. Les écarts-types sont indiqués entre parenthèses.

<i>Sélection par « colonnes » (option I)</i>	<i>Circonférence moyenne (cm)</i>	<i>Nombres de placettes</i>	<i>Sélection par « lignes » (option II)</i>	<i>Circonférence moyenne (cm)</i>	<i>Nombres de placettes</i>
A	186,8 (5,6)	15	A	172,2 (6,3)	14
B	192,8 (6,5)	13	B	205,1 (5,2)	14
34 placettes (hêtres)	189,3 (4,2)	34	34 placettes (hêtres)	189,3 (4,2)	34

Tableau 23. Distribution des classes de circonférences entre les sous-échantillons (option I)

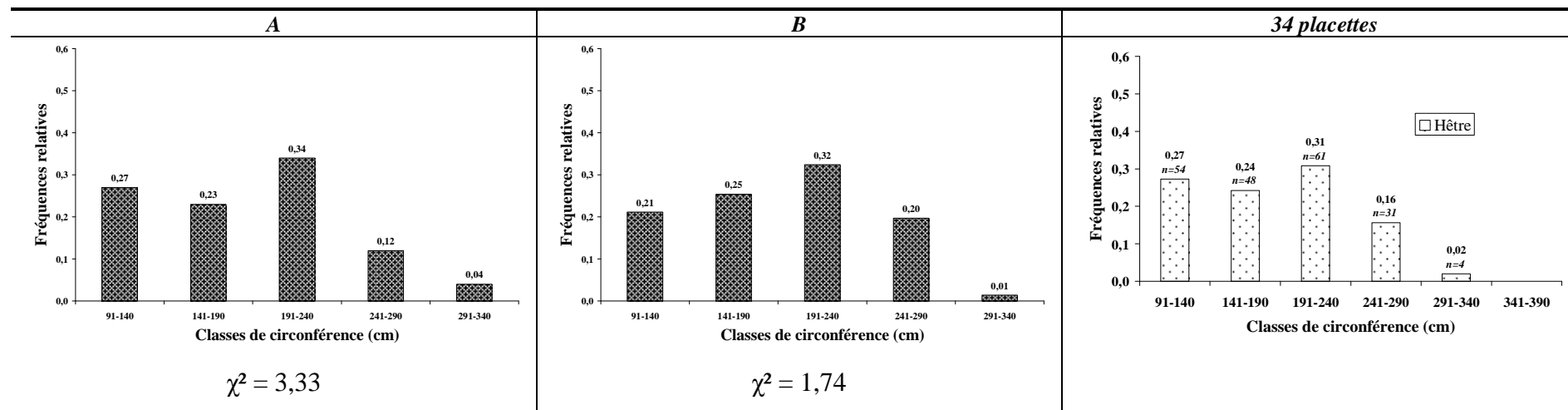
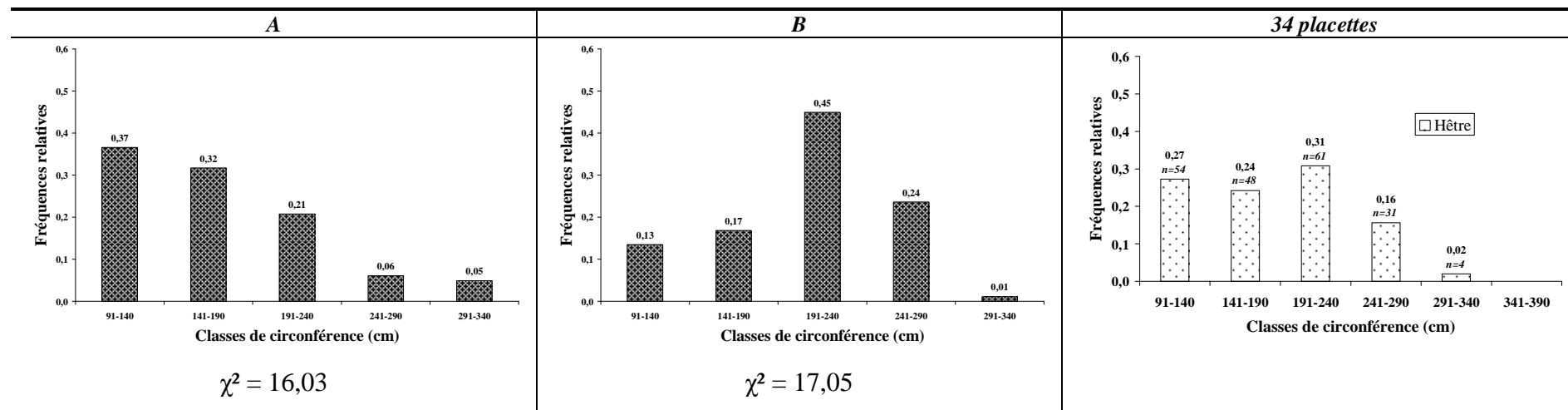


Tableau 24. Distribution des classes de circonférence entre les sous-échantillons (option II)



Pour évaluer la similitude des sous-échantillons avec l'échantillon initial, le χ^2 de chacune des quatre distributions a été calculé. Pour accepter l'hypothèse nulle de similitude, il faut que le χ^2 calculé soit inférieur ou égal à 0,711 (valeur pour 4 degrés de libertés et risque d'erreur de 5%). Aucune option ne remplit ce critère, cependant c'est l'option I qui présente les χ^2 les plus bas. De plus, l'allure de la distribution des classes de circonférence dans chaque sous-échantillon de l'option I reste semblable à celle observée pour l'ensemble des 34 placettes.

C'est donc l'option I qui est proposée pour les prochaines campagnes d'observation. Pour les campagnes futures, les placettes seront visitées selon le programme présenté au Tableau 25:

Tableau 25. Programme des prochaines campagnes d'observation

	<i>Année 1 (15 placettes)</i>	<i>Année 2 (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 chênaies	3197, 3595, 2791, 4781, 4449, 4529 (6 placettes)	

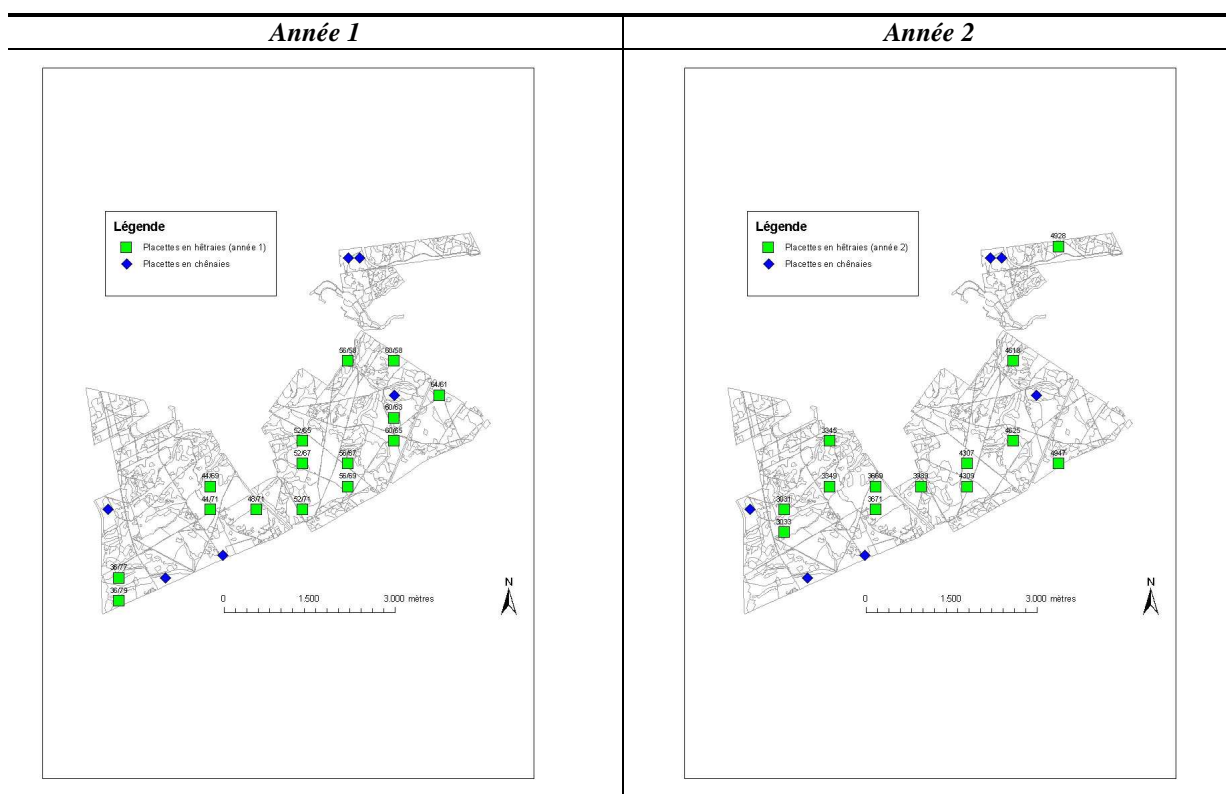


Figure 39. Grilles des campagnes de terrain.

6. Télédétection

6.1. Introduction

Les deux approches (télédétection et observations de terrain) sont complémentaires (§ 2). À côté des inventaires de terrain, les images aériennes et satellitaires permettent la récolte instantanée d'informations sur de grandes étendues, ainsi que la spatialisation de ces informations. Les mesures, prises en un seul temps, sont donc d'une grande homogénéité (pas d'effet observateur). La cartographie forestière, actualisée fréquemment, devient plus fiable (KENNEWEG (1994), BEMELMANS et DESCLÉE, (2008)). Dans le cas du suivi de l'état sanitaire, la télédétection sert à suivre la répartition spatiale des dommages et leur évolution temporelle (notamment par la rétrospective via archives). Sur le long terme, il serait possible de confirmer la périodicité du dépérissement, fréquemment évoqué dans la littérature (KREMER, 1979). Dans la pratique, la comparaison des clichés pris à des dates différentes peut aider à déceler des zones où les arbres subissent un stress non encore observable à l'œil nu, et affiner ainsi le réseau de surveillance et d'alerte pour le gestionnaire.

6.2. Images obtenues

Une première iconothèque a été constituée :

Images aériennes

Ont été obtenues :

- 5 lots d'images infrarouges (CIR), couvrant des parties de la Forêt de Soignes bruxelloise (2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008),
- 1 lot d'orthophotoplans Urbis, couvrant la Forêt de Soignes bruxelloise,

Images satellitaires

Ont été obtenues :

- 3 images Ikonos (2003), couvrant une partie de la Forêt de Soignes bruxelloise,
- 1 image Quickbird (2003), couvrant une partie la Forêt de Soignes bruxelloise
- 1 image GeoEye-1 (2009), couvrant la Forêt de Soignes bruxelloise.

6.3. Élaboration d'une méthodologie de travail

De manière générale, la méthodologie passera par les étapes classiques du traitement d'images. La qualité de chaque image est d'abord rapidement évaluée par un premier examen visuel. Si nécessaire, les images sont préparées (correction géométrique, orthorectification, filtrage). Lorsque la résolution spatiale est suffisamment fine, les images sont photo-interprétées à l'aide de clefs d'interprétation (clef d'évaluation de l'état sanitaire de HILDEBRANDT, 1992). Lorsque les images sont contemporaines de l'évaluation visuelle des houppiers au sol, les arbres analysés sont, dans la mesure du possible, retrouvés sur l'image. Leurs représentations sur l'image sont alors interprétées avec la clef. Les conclusions de la photo-interprétation sont comparées aux observations de terrain. Parallèlement, les opérations de base de l'analyse d'images (détection de changement, analyse de texture, fusion d'images multi-sources, classification, calculs d'indices, etc.) sont effectuées. Dans la mesure du possible, des méthodes plus élaborées comme le *template matching* (comparaison de groupes de pixels de caractéristiques connues à d'autres groupes similaires mais inconnus) ou la classification orientée-objet sont tentées.

Relier les observations de terrain aux données satellitaires et aériennes pose de nombreux problèmes. FABIÁNEK (2004) en cite plusieurs:

- Problèmes liées à la transformation de l'image brute : certaines déviations géométriques ne peuvent être totalement éliminées.
- Les données télédéteectées 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. Il s'ensuit que la comparaison des deux lots de données est délicate.
- Les conditions climatiques peuvent considérablement brouiller le signal (ennuagement, brume, etc.).

Un autre problème peut encore être cité. La définition d'un arbre stressé pose de nombreuses questions sémantiques. En effet, pour définir le stress, l'observateur de terrain ne se fie pas aux mêmes indices que le géomaticien étudiant une image télédéteectée ; le premier décrit plutôt les conséquences d'un stress passé, tandis que le second décrit une étape d'un stress en cours. L'objet analysé n'est donc pas nécessairement le même dans les deux cas. Les deux approches sont pourtant complémentaires et, bien utilisées, peuvent se révéler profitables.

7. Conclusion et perspectives

Le bilan de santé de la forêt de Soignes bruxelloise montre qu'une proportion élevée de hêtres, supérieure à deux tiers, présente des symptômes traduisant un dépérissement net. Avec un niveau moyen de 37%, la défoliation importante de la hêtraie invite à analyser de façon plus approfondie la contribution des différents facteurs de dépérissement potentiels — qu'ils relèvent des sols (hydromorphie, podzolisation, dégradation physique, etc.), de la pollution atmosphérique (dépôts azotés, etc.), des changements globaux (augmentation des températures globales, modification du régime des précipitations et de la fréquence des sécheresses, etc.), des traitements sylvicoles et/ou de l'exploitation forestière (compactage des sols, etc.) — et à prendre les mesures de gestion qui s'imposent. Dans ce contexte, l'augmentation de la défoliation moyenne avec la dimension des arbres suggère, par exemple, de réduire l'âge d'exploitabilité des peuplements ; une autre piste consiste à diversifier la hêtraie, tout en réduisant la densité des peuplements.

8. 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.
- BALLEUX P. et TIMAL G. (2005). *Étude des critères dendrométriques qui doivent permettre d'assurer le suivi des peuplements de hêtres orientés vers l'objectif de « maintien de la Hêtraie Cathédrale »*. 3 rapports de convention CDAF-IBGE 2003-2005. 60 p., 53 p. et 81 p.
- BEMELMANS et DESCLEE (2008). *Méthode d'inventaire forestier à l'arbre près par télédétection aérienne et satellitaire*. *Forêt Wallonne*, 93 (2008) 9-14.
- 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 (2006) 579-595
- DE VOS B. (2005). *Bodemcompactie en de invloed op de natuurlijke verjonging van Beuk in het Zoniënwoud*. Janvier 2005. IBW.Bb R 2005.004. Financé par le Société Générale des Fonds pour la Forêt de Soignes, sous les auspices de la Fondation Roi Baudouin. Institut pour la Gestion des Forêts et des Espaces Naturels (INBO), Grammont. 75 p.
- FABIÁNEK J. (ed.) (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 pp.
- HERBAUTS J. ; EL BAYAD J. ; GRUBER W. (1998). *L'impact de l'exploitation forestière mécanisée sur la dégradation physique des sols : Le cas des sols limoneux acides de la forêt de Soignes (Belgique)*. *Revue Forestière Française*, 1998, vol. 50, n°2, 124-137.
- HILDEBRANDT G. (ed.) (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.
- INSTITUT POUR L'ENCOURAGEMENT DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE DANS L'INDUSTRIE ET L'AGRICULTURE (I.R.S.I.A.), LOUIS A. (1959) : *planchette Uccle 102 W de la Carte des Sols de Belgique*, avec le texte explicatif.
- KENNEWEG H. (1994). *Forest Condition and Forest Damages – Contribution of Remote Sensing to Different Inventory Approaches*. *GeoJournal*, 32.1, 47-53.
- KREMER F. (1979). *Contribution à l'étude du dépérissement du hêtre (Fagus sylvatica L.)*. Travail de fin d'études. Louvain-la-Neuve, 161 p.
- LANGHOR R. (2001). *L'anthropisation du paysage pédologique agricole de la Belgique depuis le Néolithique ancien – Apports de l'archéopédologie*. *Étude et Gestion des Sols*, volume 8 (2), 103 - 118.

- LANGHOR R. (2009) *The Sonian Forest – A unique site for Earth Science and Archaeology - Understang soilscape evolution of the Belgium loess belt - The edaphic factor in the Sonian Forest ecosystem*. Brochure imprimée pour la visite commentée en forêt du 22 octobre 2009. 38 p.
- NAGELEISEN L.-M. (1995). *Méthode d'évaluation de l'aspect du houppier (protocole DEPEFEU)*. Brochure du Département Santé des Forêts – Échelon Technique Nord-Est. 12 p.
- NAGELEISEN L.-M. (2000). *Évaluation de l'aspect des houppiers des essences feuillues en hiver*. Brochure du Département Santé des Forêts – Échelon Technique Nord-Est (support informatique).
- NAGELEISEN L.-M. (2002). *Méthodologie d'approche des dépérissements – protocole d'évaluation de l'aspect des houppiers (DEPEFEU)*. Diaporama du Département Santé des Forêts – Échelon Technique Nord-Est (support informatique).
- RONDEUX J. (1999). *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*. Presses Agronomiques de Gembloux. 512 p.
- SIOEN G., ROSKAMS P., COENEN S. (2009). *Bosvitaliteitsinventaris 2008. Resultaten van de kroonbeoordelingen in het bosvitaliteitsmeetnet*. Rapport de l'Institut voor Natuur- en Bosonderzoek 2009 (10). INBO, Bruxelles. 70 p.
- THILL A. et GRAYET J.-P. (1978). *Étude dendrométrique du hêtre commun*. Notes techniques du Centre d'écologie forestière et rurale, I.R.S.I.A., Gembloux. 79 p.
- TIMAL G. (2006). *Mise à jour de la carte des peuplements*. Document annexe de la convention CDAF-IBGE 2003-2005. 5 p.
- TIMAL G. Divers documents communiqués en février 2009 (base de données d'inventaire et shapefiles décrits dans le texte).
- UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) (2006). *Manuel on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests, part II: visual assessment of crown condition (ICP forests)*. 69 p.
- VANNIERE B., *Tables de production pour les forêts françaises, 2^{ème} édition*, Nancy, 1984. 158 pp.
- VANWIJNSBERGHE S. (2003). *Plan de gestion de la Forêt de Soignes, partie de Bruxelles-Capitale*. Document public disponible à l'IBGE (Bruxelles). 162 p.

Site Internet

- <http://www.meteo.be/> (site de l'Institut Royal Belge de Météorologie). Consulté le 12 octobre 2009.

ANNEXES

Liste des tableaux

Tableau 26. Description de l'inventaire typologique de 2003-2005 (Balleux et Timal, 2005) .iii	.iii
Tableau 27. Principales données reprises des travaux du CDAF.....iii	.iii
Tableau 28. Description des 4 couches cartographiques utilisées pour la caractérisation de la forêt de Soignes bruxelloise (fournies par l'IBGE, février 2009)..... iv	.iv
Tableau 29. Présentation générale de la Forêt de Soignes, secteur bruxellois (IBGE, 2003).... v	.v
Tableau 30. Placettes présélectionnées en hêtraies de 60 à 120 ans xxii	.xxii
Tableau 31. Placettes présélectionnées en hêtraies de plus de 120 à 180 ans..... xxiii	.xxiii
Tableau 32. Placettes présélectionnées en hêtraies de plus de 180 ans..... xxiii	.xxiii
Tableau 33. Placettes présélectionnées en chênaies de 60 à 120 ans xxiv	.xxiv
Tableau 34. Placettes présélectionnées en chênaies de plus de 120 ans xxiv	.xxiv
Tableau 35. Évaluation des unités d'échantillonnage (placettes) en hêtraies par interprétation des orthophotoplans de février 2006 25	.25
Tableau 36. Évaluation des unités d'échantillonnage (placettes) en chênaies par interprétation des orthophotoplans de février 2006 31	.31
Tableau 37. Évaluation des unités d'échantillonnage (placettes) à partir des images aériennes infrarouges de l'été 2006..... 32	.32
Tableau 38. Distribution des placettes tirées selon le scénario I..... xxxiii	.xxxiii
Tableau 39. Distribution des placettes tirées selon le scénario II xxxiv	.xxxiv
Tableau 40. Distribution des placettes tirées selon le scénario III..... xxxv	.xxxv
Tableau 41. Distribution des placettes tirées selon le scénario IV xxxvi	.xxxvi
Tableau 42. Liste des 34 placettes de l'Inventaire Sanitaire, avec leurs positions. xxxvii	.xxxvii
Tableau 43. Âge et typologie des 34 placettes xxxviii	.xxxviii
Tableau 44. Liste des 223 arbres analysés en 2009..... 39	.39
Tableau 45. Description des lots de données ayant servi à la simulation statistique. xli	.xli

Liste des figures

Figure 1. Triages de la première brigade (moitié ouest) et de la deuxième brigade (moitié est). La chaussée de la Hulpe sert de démarcation. Les coupes sont indiquées par des chiffres romains (données IBGE, février 2009).	viii
Figure 2. Carte des sols en hêtraies (I.R.S.I.A., 1959).....	ix
Figure 3. Carte des sols en chênaies (I.R.S.I.A., 1959).....	x
Figure 4. Répartition des classes d'âge en hêtraies (TIMAL, 2006)	xi
Figure 5. Répartition des classes d'âges en chênaies (TIMAL, 2006)	xii
Figure 6. Répartition spatiale des classes de hauteur en hêtraies pures et mélangées (BALLEUX et TIMAL, 2005)	xiii
Figure 7. Répartition spatiale des classes de hauteur en chênaies pures et mélangées (BALLEUX et TIMAL, 2005)	xiv
Figure 8. Répartition spatiale des classes de diamètres en hêtraies pures et mélangées (788 placettes) (BALLEUX et TIMAL, 2005)	xv
Figure 9. Répartition spatiale des classes de diamètre en chênaies pures et mélangées (48 placettes) (BALLEUX et TIMAL, 2005)	xvi
Figure 10. Répartition spatiale des surfaces terrières moyennes en hêtraies (961 placettes au total) (BALLEUX et TIMAL, 2005)	xvii
Figure 11. Répartition spatiale de la surface terrière moyenne en chênaies (58 placettes au total) (BALLEUX et TIMAL, 2005)	xviii
Figure 12. Répartition spatiale des 24 placettes du scénario 1.....	xix
Figure 13. Répartition spatiale des 40 placettes du scénario 2.....	xx
Figure 14. Parcelles supplémentaires en chênaies (2) et en hêtraies (14) pures et mélangées. Les chênaies de 60 à 120 ans n'ont pas de parcelles supplémentaires	xxi
Figure 15. Répartition spatiale des placettes sélectionnées selon le scénario I.....	xxxiii
Figure 16. Répartition spatiale des placettes sélectionnées selon le scénario II	xxxiv
Figure 17. Répartition spatiale des placettes sélectionnées selon le scénario III.....	xxxv
Figure 18. Répartition spatiale des placettes sélectionnées selon le scénario IV.....	xxxvi
Figure 19. Courbes du demi-intervalle de confiance relatif rapporté au nombre d'arbres mesurés par placette (feuillus).....	xli
Figure 20. Courbes du demi-intervalle de confiance relatif rapporté au nombre d'arbres mesurés par placette (résineux)	xlii

1. Description de la forêt de Soignes bruxelloise

Tableau 26. Description de l'inventaire typologique de 2003-2005 (BALLEUX et TIMAL, 2005)

Échantillonnage	Systématique : grille de 100 m x 100 m
Critères d'inclusion	Seuls les peuplements où le hêtre couvre plus de la moitié de la surface terrière ont été analysés
Taux de sondage	Rapport de la surface sondée totale à la surface totale : 5,8%
Nombre de placettes	1000
Type d'unité d'échantillonnage (UE)	30 tiges minimum si la hauteur dominante est inférieure à 18 m ; 5 ares si les arbres ont moins de 100 ; 10 ares si les arbres ont entre 100 et 160 ans ; 15 ares si les arbres ont plus de 160 ans.
Nombre d'objets analysés	13 363 arbres au total

Tableau 27. Principales données reprises des travaux du CDAF

Travaux	Données reprises dans la présente description	Objet	Méthode
Inventaire typologique, 2003-2005 (BALLEUX et TIMAL, 2005)	Hauteur dominante	Par placette	Hauteur des trois tiges (chêne ou hêtre) dominantes (trois plus grands diamètres) de la placette, relevée au vertex.
	Diamètre à 1,5 m	Par placette	Mesuré au compas à 1,5 m de hauteur sur les arbres de plus de 13 cm de diamètre
	Surface terrière	Par placette	Estimée au relascope en ne tenant compte que des tiges de plus de 13 cm de diamètre à 1,5 m
Révision de la carte des peuplements (TIMAL, 2006)	Typologie des peuplements	Peuplement	Classification algorithmique des types sur base des taux de recouvrement (définition de 24 types différents)
	Âge des peuplements	Peuplement	Reconstitution à partir d'archives, sinon conjectures à partir des dimensions des arbres

Tableau 28. Description des 4 couches cartographiques utilisées pour la caractérisation de la forêt de Soignes bruxelloise (fournies par l'IBGE, février 2009)

		Thèmes			
		Pédologie	Inventaire permanent	Peuplements	Parcellaire de gestion
Nom du fichier		pedologie	ue_gr200x200_140307	Pplt_2006_FdS-Bxl_projete	Triages_FdS-Bxl_Projete
Format		.shp + fichiers connexes (.sbn, etc.)	.shp + fichiers connexes (.sbn, etc.)	.shp + fichiers connexes (.sbn, etc.)	.shp + fichiers connexes (.sbn, etc.)
Description		Carte pédologique	Grille d'échantillonnage de l'inventaire permanent	Carte des peuplements, révisée par G. Timal en juillet 2006	Limites de triages
Représentation		Vectorielle	Vectorielle	Vectorielle	Vectorielle
Étendue (coord. Lambert 72)	Objet	Polygones	Points	Polygones	Polygones
	X min	148605	144500	150713	144739
	X max	157781	157700	157782	157781
	Y min	161483	161700	161472	161481
	Y max	168140	177100	168138	175539
Système de projection		Belge Lambert 72	Belge Lambert 72	Belge Lambert 72	Belge Lambert 72
Contenu de la table d'attributs		Sigles pédologiques et commentaires, aires, etc.	Positions X-Y des nœuds (unités d'échantillonnages), identifiants, etc.	Âge des peuplements, typologie, aires, etc.	Noms des triages, aires, etc.
Date de création		Janvier 2005	Mars 2007	Juillet 2006	Juin 2005
Créateur		?	FUSAGx	CDAF	IBGE
Gestionnaire		IBGE	IBGE-FUSAGx	IBGE-CDAF	IBGE
Propriétaire		IBGE	IBGE	IBGE	IBGE
Remarques		/	/	Ajout d'un système de projection par nos soins	Ajout d'un système de projection par nos soins

Tableau 29. Présentation générale de la Forêt de Soignes, secteur bruxellois (IBGE, 2003)

1. CADRE INSTITUTIONNEL ET ASSOCIATIF	
Propriétaire	Région de Bruxelles-Capitale
Gestionnaire	Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (Bruxelles-Environnement), Division des Espaces Verts, Département de la Forêt, cantonnement de Bruxelles
Autres décideurs	Etat fédéral (signataire des conventions internationales sur la gestion durable des forêts), Région de Bruxelles-Capitale (application de ces conventions).
Coopérateurs	ANB (Région Flamande), DNF (Région Wallonne)
Associations	'Amis de Soignes', 'Association Protectrice des Arbres en Forêt de Soignes'; autres associations culturelles, naturalistes et sportives; comités de quartier
Riverains	Région Flamande, quartiers de Watermael-Boitsfort, Uccle, Woluwe-Saint-Pierre, Auderghem et Bruxelles (Bois de la Cambre).
2. GESTION SYLVICOLE	
Objectifs principaux	paysage, patrimoine et conservation de la nature ; récréation ; éducation ; production. Traduction sylvicole : conversion de la futaie homogène en futaie jardinée, avec allongement de la révolution.
Type de gestion	Gestion intégrée et différenciée.
Superficie	1657 ha
Feuillus	92% (futaie). Le hêtre recouvre 74% de la surface de la Forêt de Soignes. Le chêne recouvre 16% de la surface de la Forêt de Soignes. Les 2% restant sont composés de châtaigner, de peuplier, de bouleau, d'aulne etc.
Résineux	8% (principalement pins et mélèzes en futaie, disséminés sur les versants sablonneux).
Régime	Varie selon les endroits. Principalement conversion vers la futaie irrégulière par groupes et mélange d'essences.
Réserves	5 réserves naturelles et 2 réserves forestières
Surface terrière moyenne	16 m ² /ha pour l'ensemble de la Forêt de Soignes bruxelloise.
Volume moyen par ha	290 m ³ /ha pour l'ensemble de la Forêt de Soignes bruxelloise.
Productivité	Hêtre : 8,5 m ³ /ha (classe de productivité 1 supérieure).

Coupes	Guidées par l'entretien et non par l'exploitation (coupes d'amélioration (peuplements de moins de 177 ans) et de régénération (peuplements âgés de moins de 177 ans essentiellement)).
Éclaircie	Principalement par le haut et assez fortes.
Rotation	8 ans (hêtre, chênes et résineux)
Révolution	De l'ordre de 180 ans (hêtre).
Volume exploité	9000 m ³ par an en moyenne
Régénération	Artificielle pour le hêtre et le chêne, naturelle pour l'érable, le frêne et le bouleau. La méthode des coupes progressives jardinatoires complétées de plantations est la plus fréquemment utilisée.
3. CONDITIONS TOPOGRAPHIQUES ÉDAPHIQUES	
Altitude	Entre 60 et 128 m d'altitude (120 m en moyenne).
Pentes	70 % de la surface de la forêt présentent des pentes inférieures à 5° ; 27% de la surface de la forêt présente des pentes comprises entre 5° et 15°
Sous-sol	Sables bruxelliens et lédiens, argiles asschien et tongrien, loess carbonaté.
Sol	85% de la surface de la forêt : limon non gleyifiés, acide. Argiles tongriens retenant l'eau en surface. Horizon induré (fragipan) entre 30 et 130 cm de profondeur.
Humus	Moder (chênaie) à dysmoder (hêtraie)
PH du sol	3,8 à 4,2 à faible profondeur, 5 à 7 au-delà de 2 mètres de profondeur
Associations phytosociologiques	(i) hêtraie à <i>Millium effusum</i> , (ii) hêtraie-chênaie à <i>Pteridium aquilinum</i> , (iii) hêtraie à <i>Deschampsia flexuosa</i> et <i>Luzula sylvatica</i> , (iv) hêtre à <i>Leucobryum glaucum</i> .

4. CONDITIONS CLIMATIQUES

Température moyenne annuelle	9,7° C (données IRM)
Température moyenne du mois le plus chaud	17,2° C (juillet) (données IRM)
Température moyenne du mois le plus froid	2,5° C (janvier) (données IRM)
Précipitations	820 mm par an, précipitations réparties assez équitablement sur toute l'année.
Extrêmes	Étés secs (1989, 1990, 1991, 2003 ¹³), hivers rigoureux, tempêtes (1922, 1940, 1988, 1990).

5. GESTION ADMINISTRATIVE

Brigades	Deux brigades sur la forêt de Soignes : la première brigade (moitié ouest) et la deuxième brigade (moitié est). N.B. : les réserves naturelles soniennes sont gérées par le Département des Espaces Naturels de l'IBGE (Figure 40)
Triages	4 triages par brigade, soit 8 triages au total. Leurs limites suivent des repères facilement identifiables sur le terrain et sont de surfaces à peu près égales (Figure 40).
Coupes	8 séries mixtes subdivisées en 8 coupes.
Gardes-forestiers	4 gardes par brigade, soit 8 pour toute la forêt de Soignes bruxelloise.
Agents	3 surveillants forestiers pour chaque brigade, soit 6 pour toute la forêt de Soignes bruxelloise. 6 ouvriers forestiers pour la 1 ^{ère} brigade, 8 ouvriers forestiers pour la 2 ^{ème} brigade, soit 14 pour toute la forêt de Soignes bruxelloise.

¹³ Communication personnelle de S. Vanwijnsberghe, avril 2009.

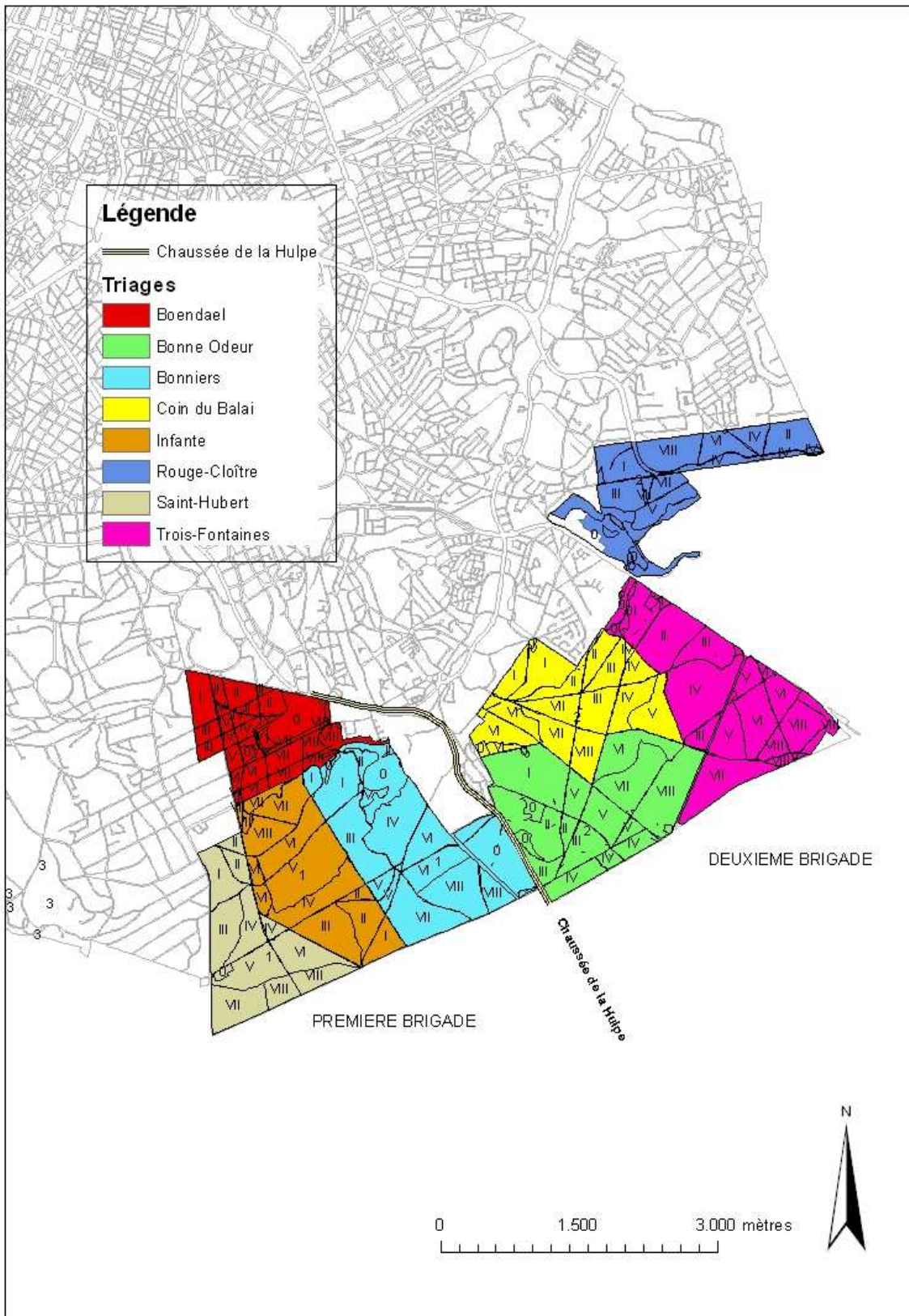


Figure 40. Triages de la première brigade (moitié ouest) et de la deuxième brigade (moitié est). La chaussée de la Hulpe sert de démarcation. Les coupes sont indiquées par des chiffres romains (données IBGE, février 2009).

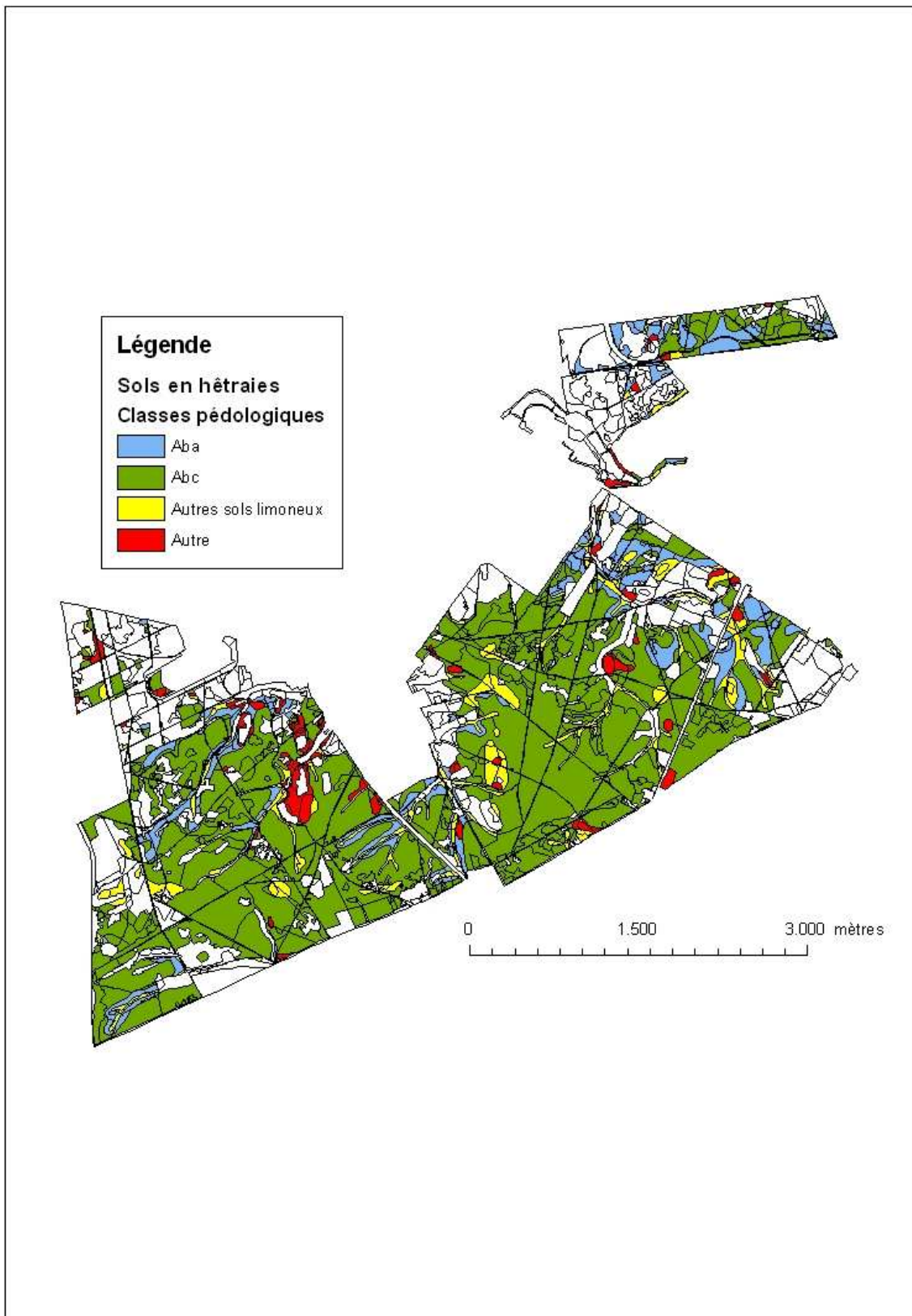


Figure 41. Carte des sols en hêtraies (I.R.S.I.A., 1959)

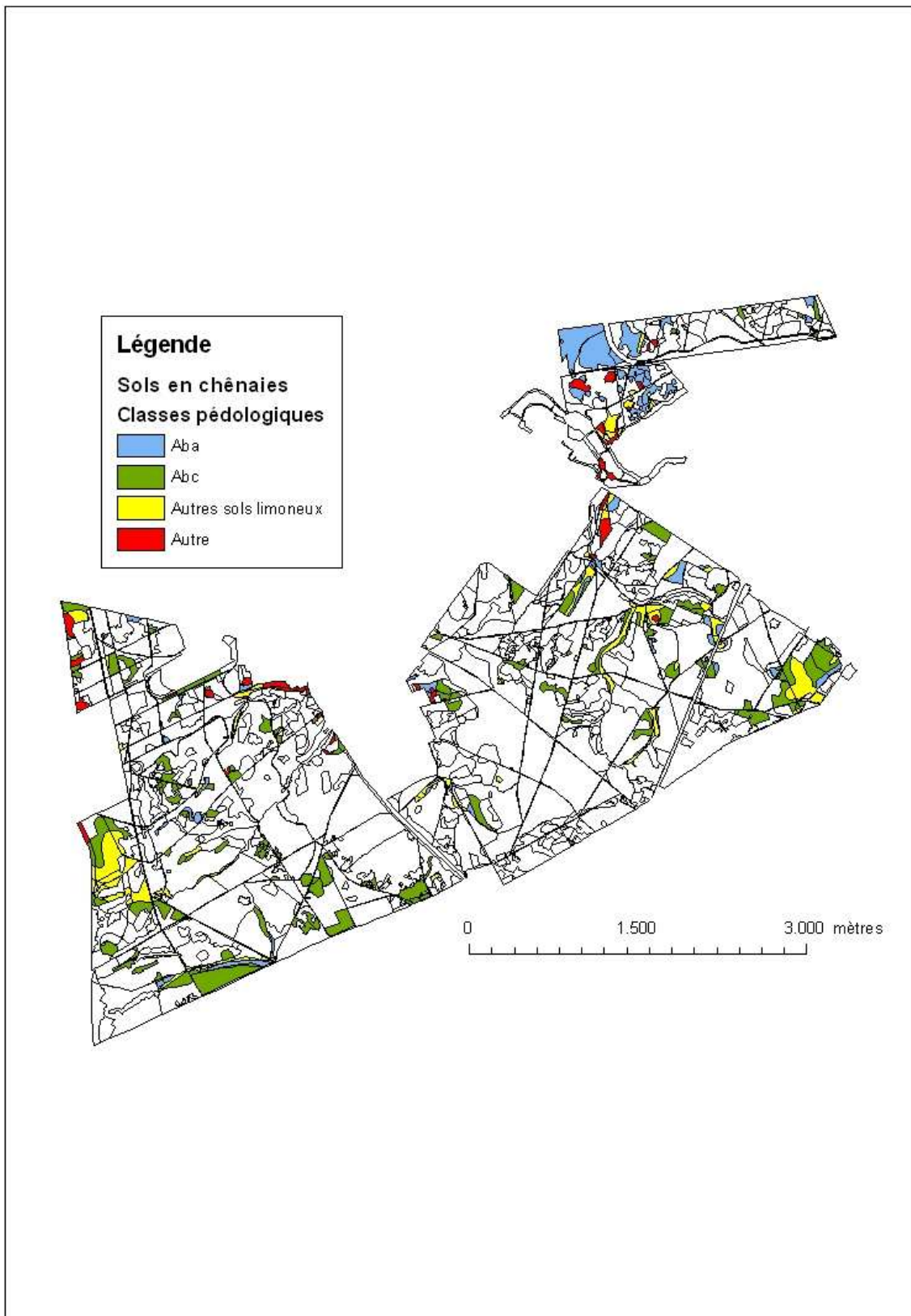


Figure 42. Carte des sols en chênaies (I.R.S.I.A., 1959)

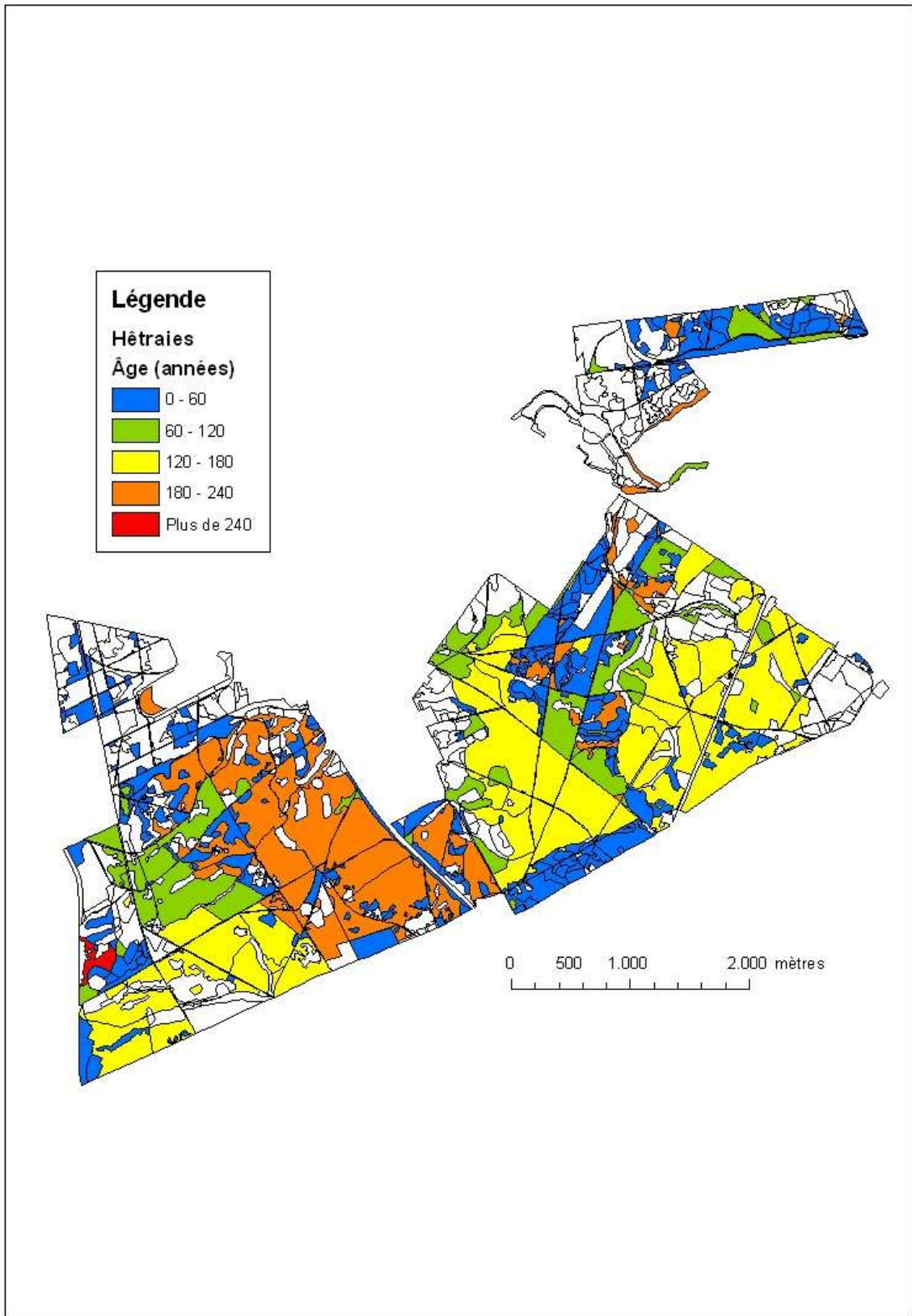


Figure 43. Répartition des classes d'âge en hêtraies (TIMAL, 2006)

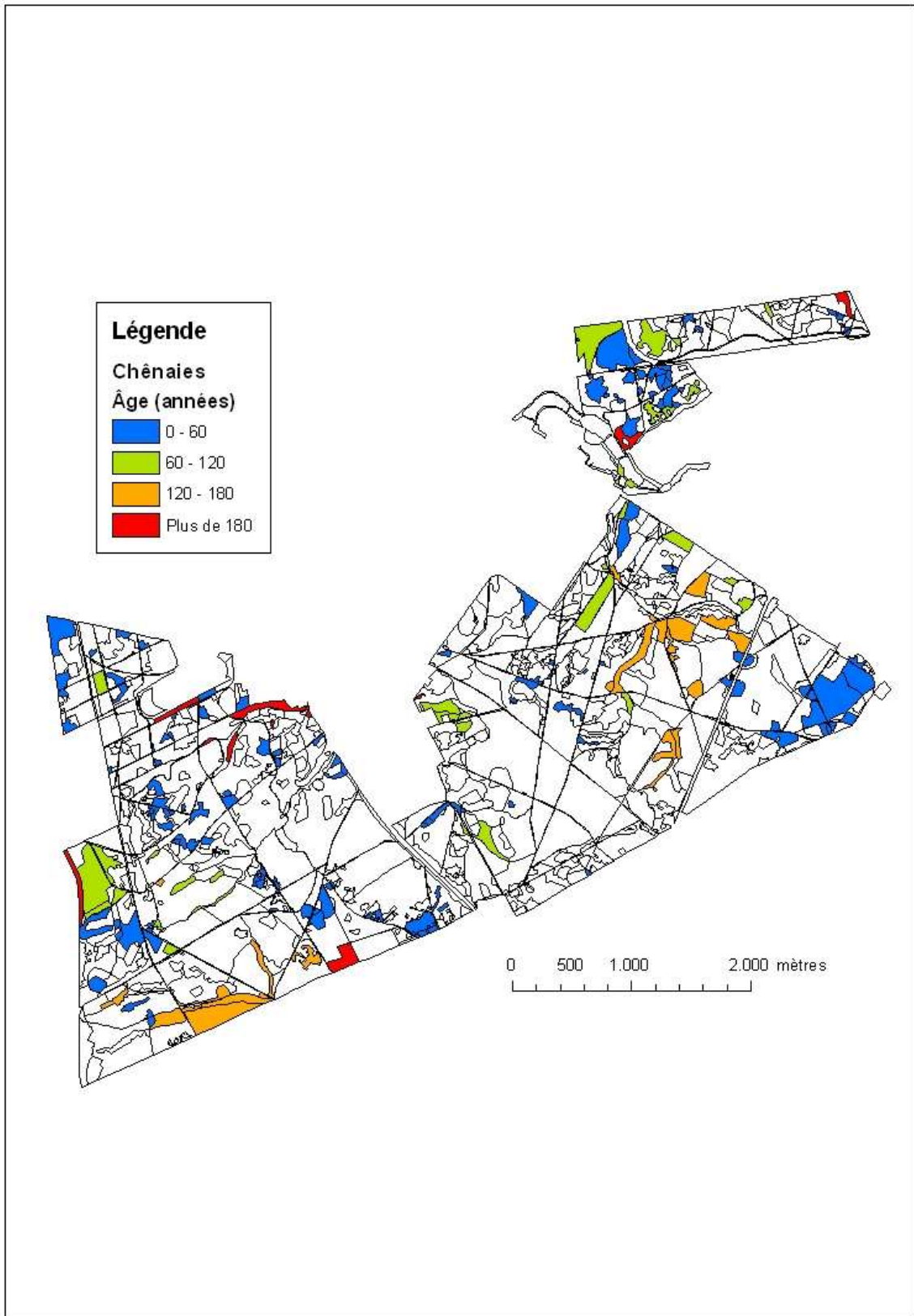


Figure 44. Répartition des classes d'âges en chênaies (TIMAL, 2006)

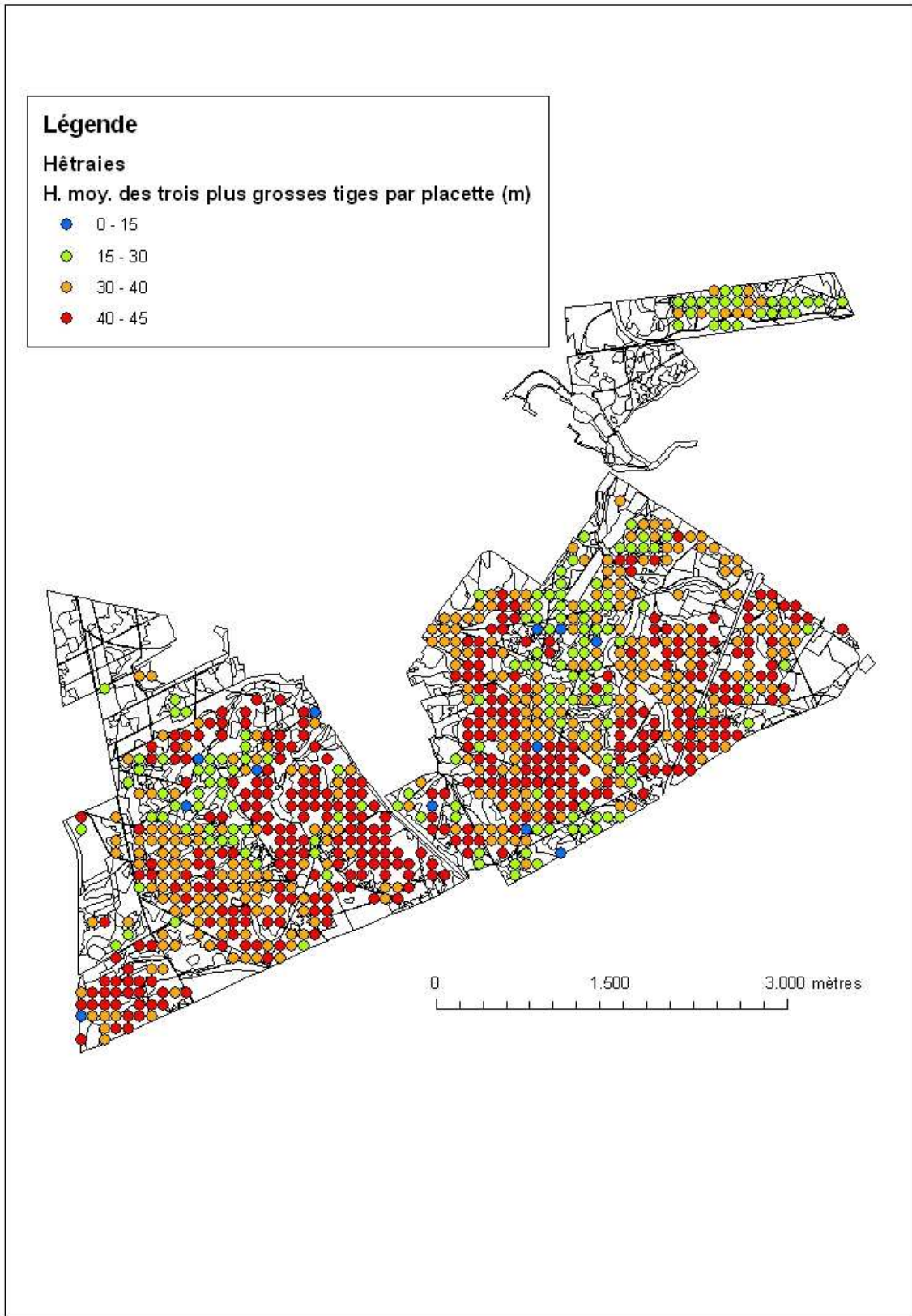


Figure 45. Répartition spatiale des classes de hauteur en hêtraies pures et mélangées (BALLEUX et TIMAL, 2005)

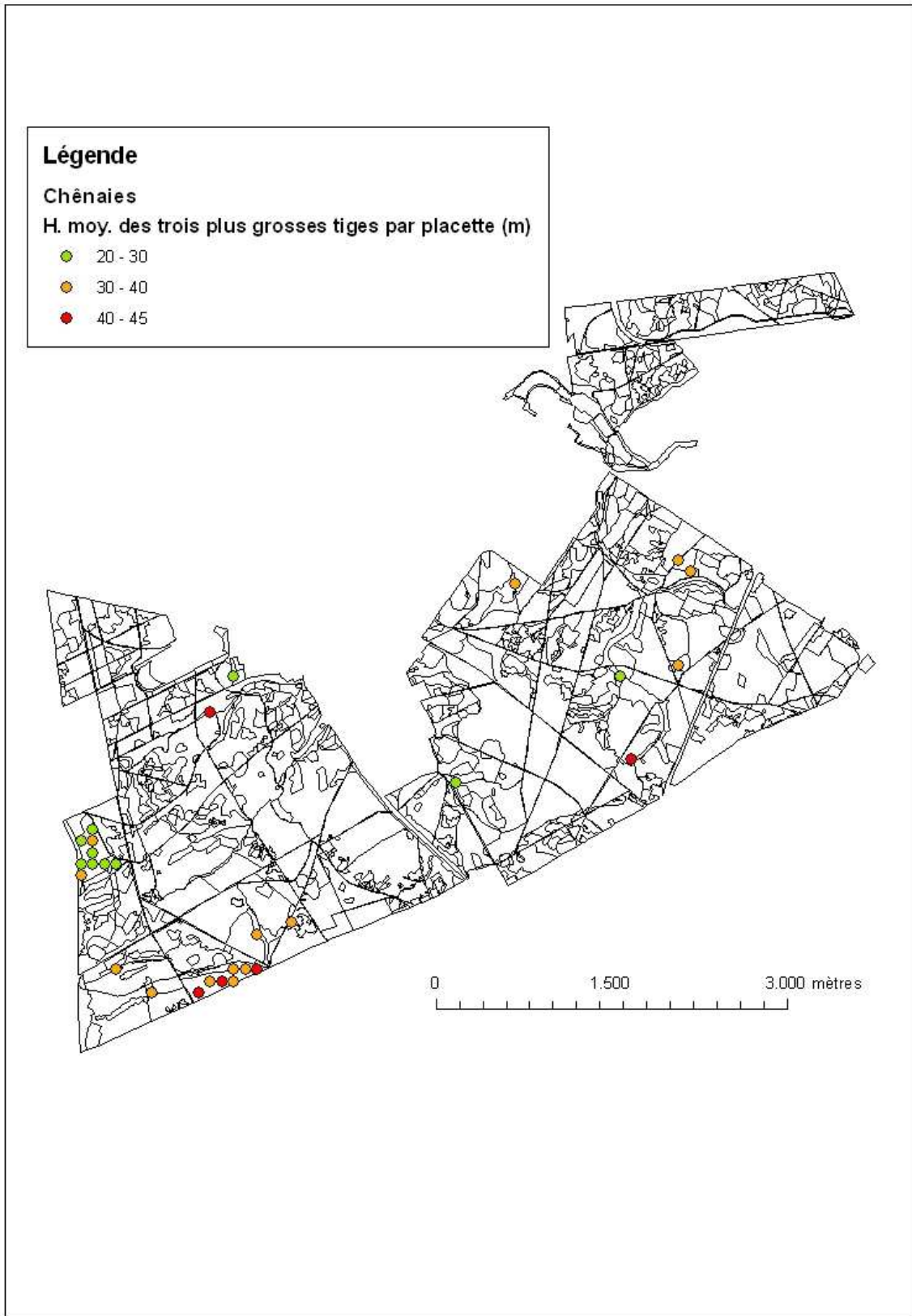


Figure 46. Répartition spatiale des classes de hauteur en chênaies pures et mélangées (BALLEUX et TIMAL, 2005)

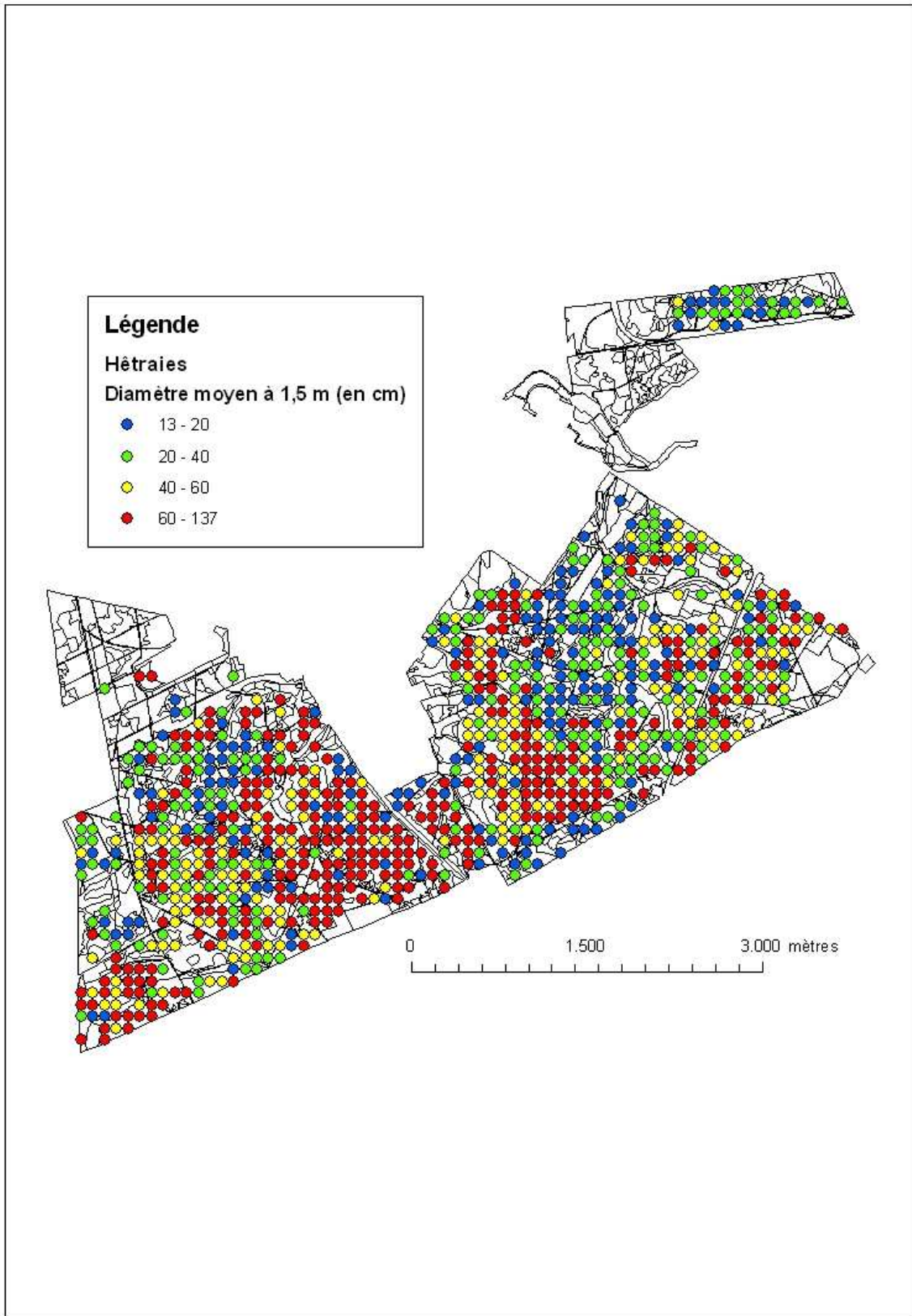


Figure 47. Répartition spatiale des classes de diamètres en hêtraies pures et mélangées (788 placettes)
(BALLEUX et TIMAL, 2005)

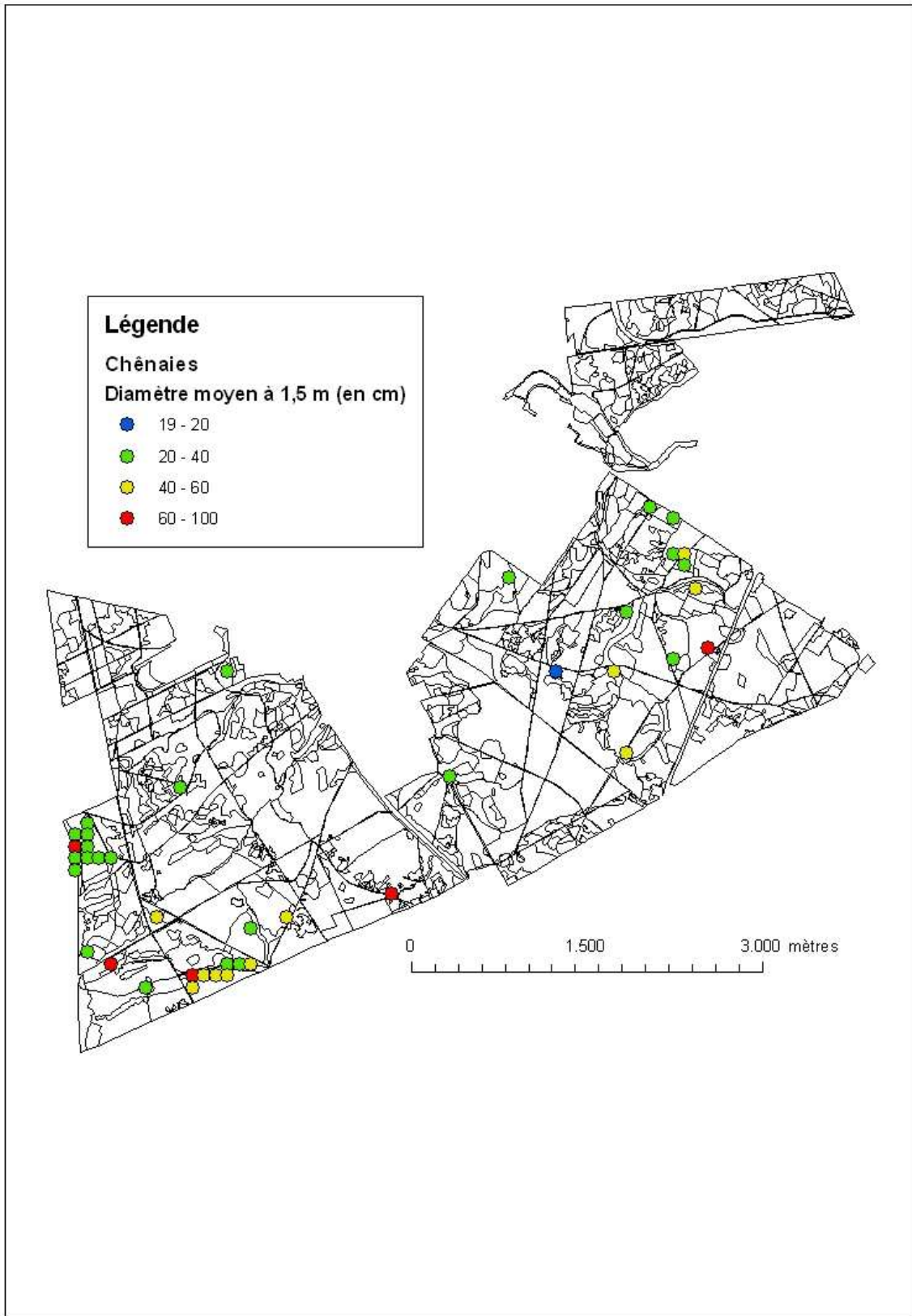
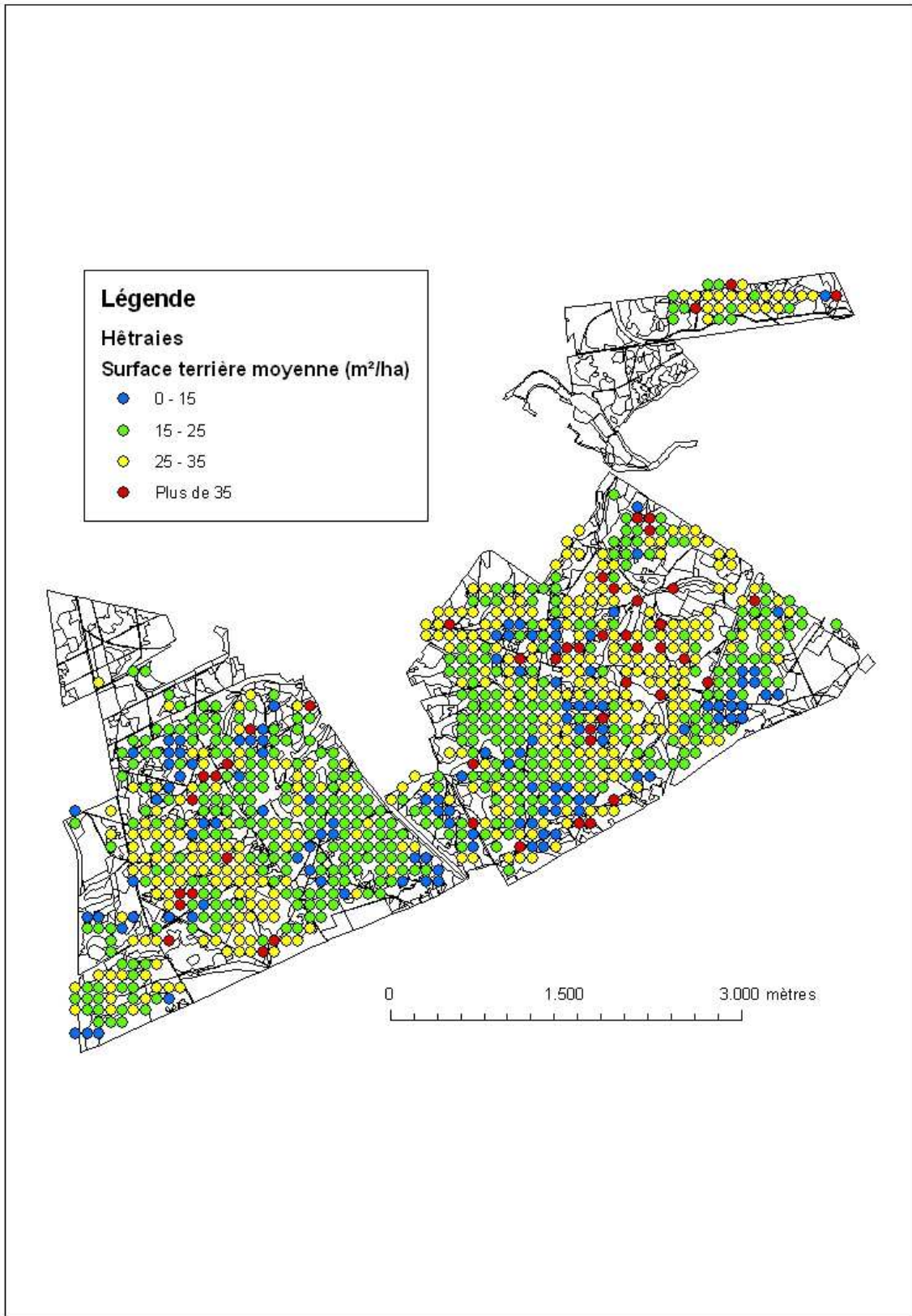


Figure 48. Répartition spatiale des classes de diamètre en chênaies pures et mélangées (48 placettes) (BALLEUX et TIMAL, 2005)



**Figure 49. Répartition spatiale des surfaces terrières moyennes en hêtraies (961 placettes au total)
(BALLEUX et TIMAL, 2005)**

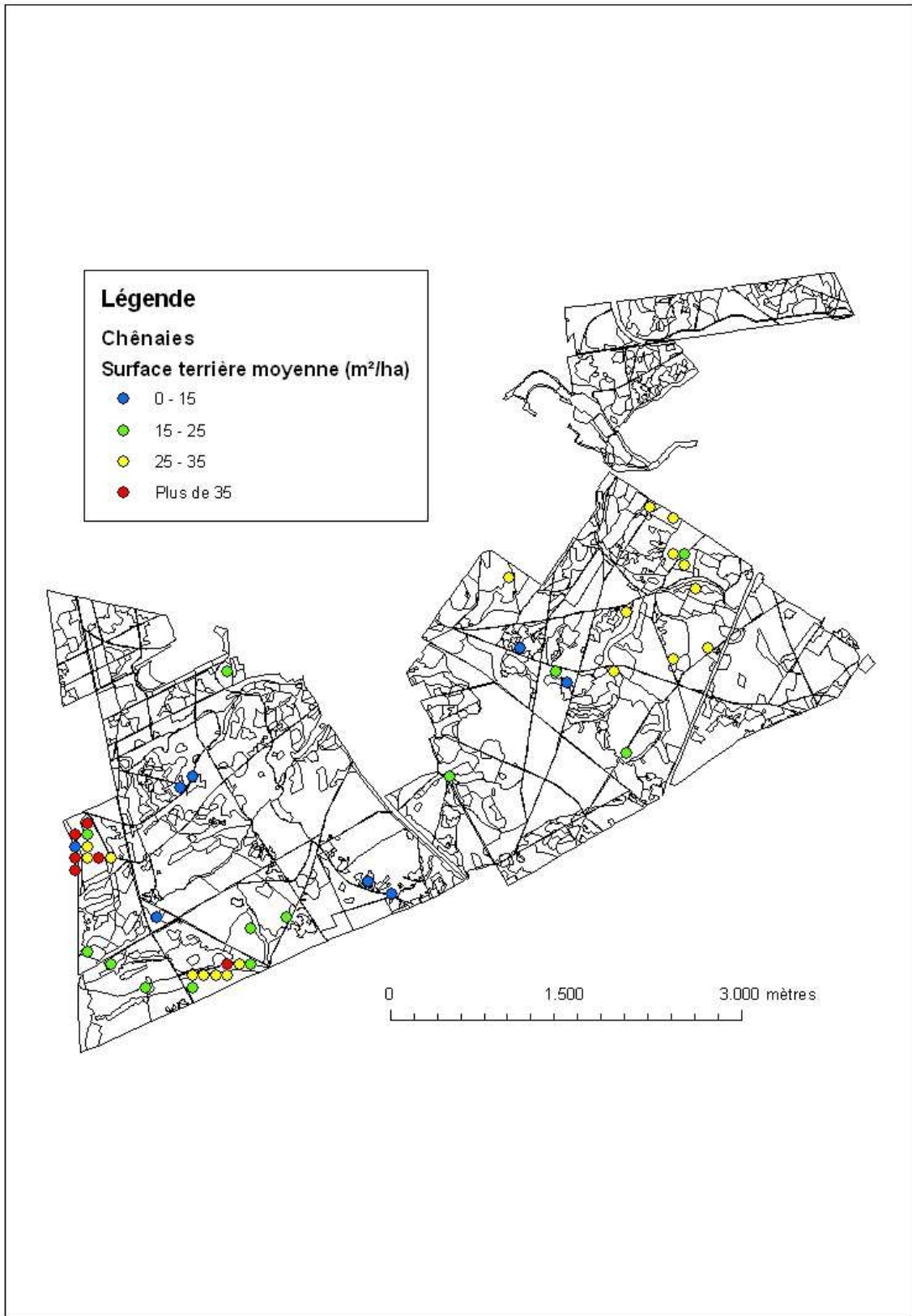


Figure 50. Répartition spatiale de la surface terrière moyenne en chênaies (58 placettes au total) (BALLEUX et TIMAL, 2005)

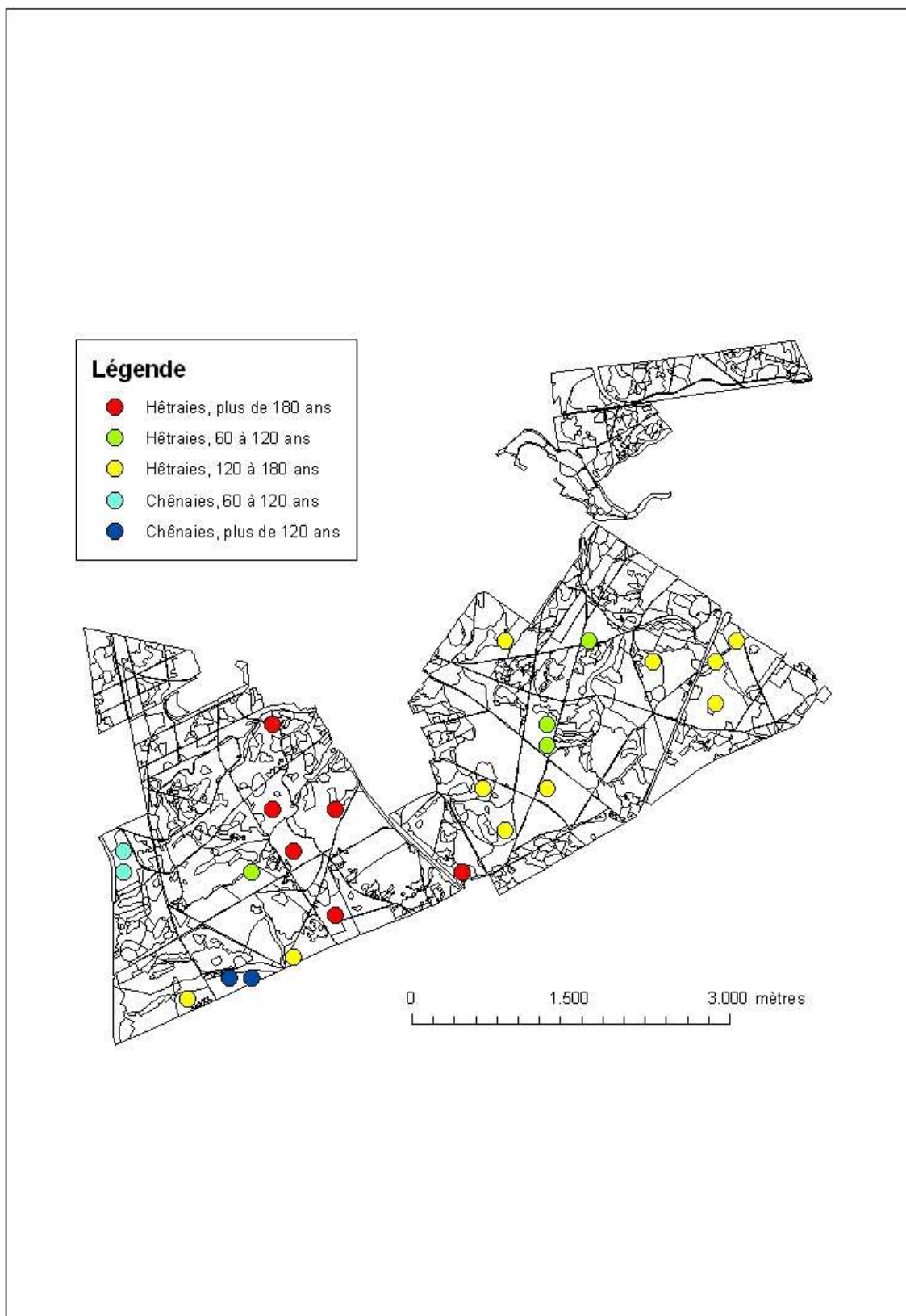


Figure 51. Répartition spatiale des 24 placettes du scénario 1

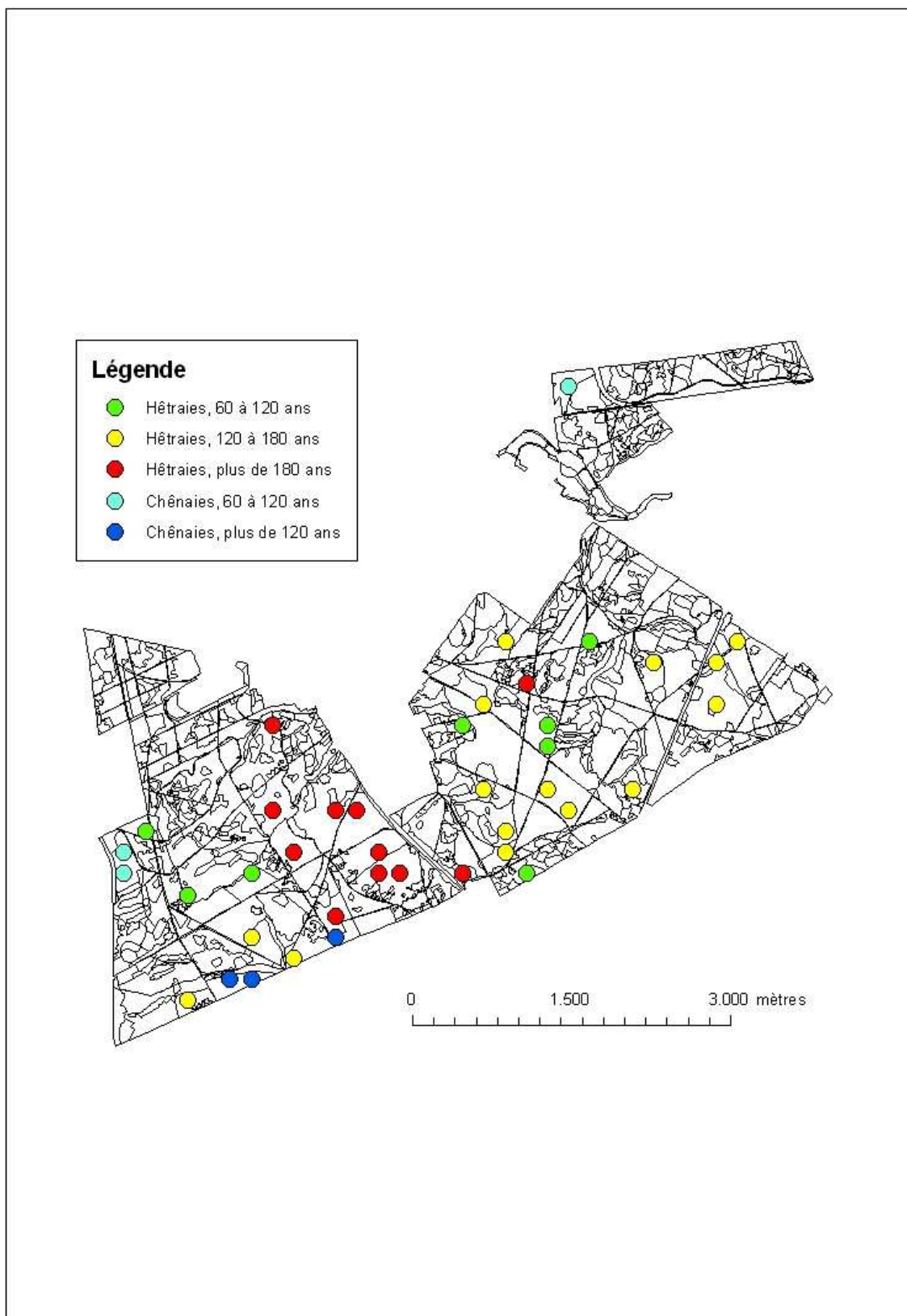


Figure 52. Répartition spatiale des 40 placettes du scénario 2

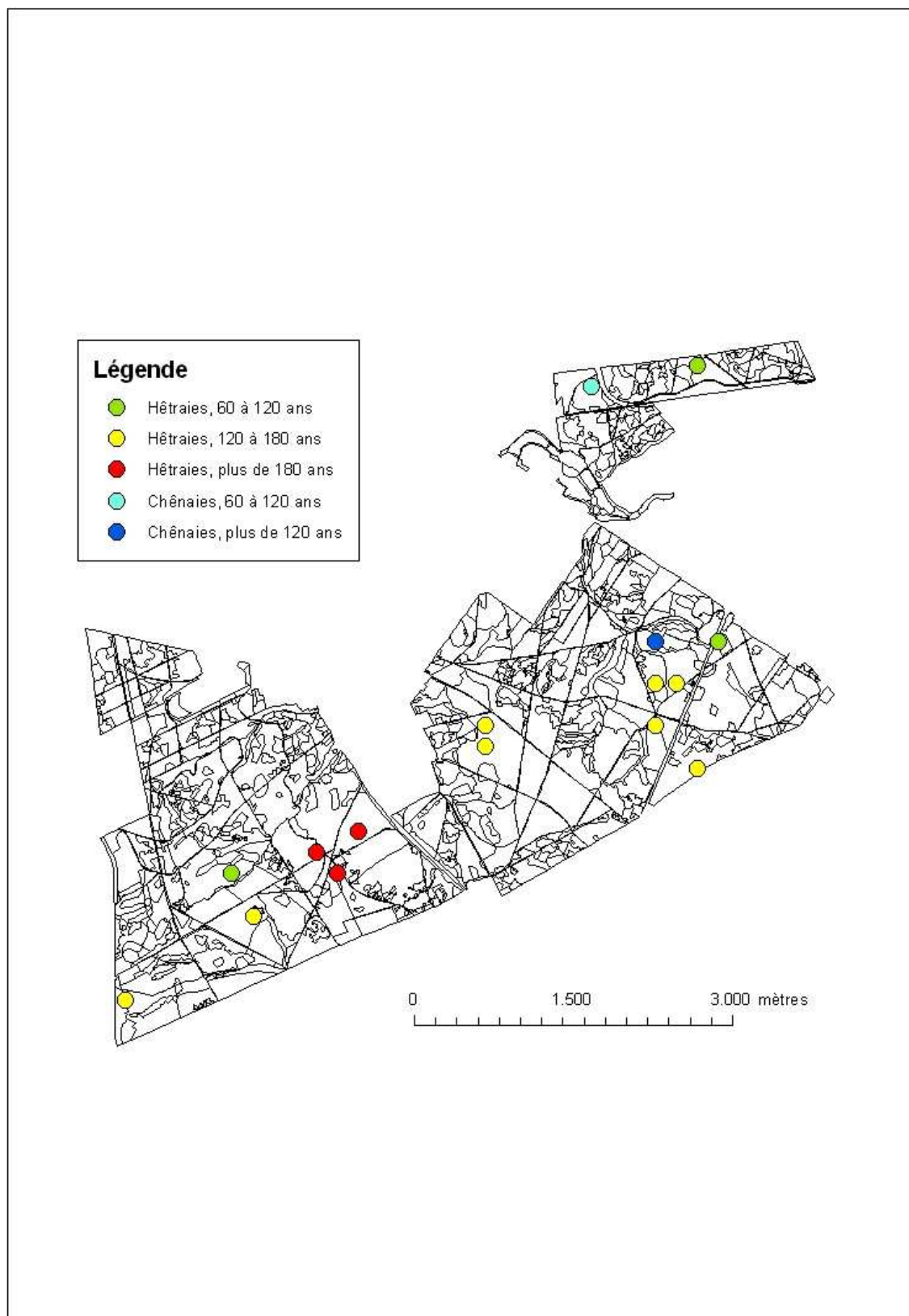


Figure 53. Parcelles supplémentaires en chênaies (2) et en hêtraies (14) pures et mélangées. Les chênaies de 60 à 120 ans n’ont pas de parcelles supplémentaires

2. Sélection des placettes de l'échantillonnage aléatoire

Les placettes, triées par strates, sont présentées dans l'ordre dans lequel elles ont été tirées par le logiciel R.

Tableau 30. Placettes présélectionnées en hêtraies de 60 à 120 ans

Identifiant	Âge du peuplement (2006), en années	Coordonnées Lambert 72		Scénario
		X	Y	
57/61	61	155500	165300	1 et 2
55/66	62	155100	164300	1 et 2
55/65	62	155100	164500	1 et 2
41/72	116	152300	163100	1 et 2
54/72	60	154900	163100	2
36/70	61	151300	163500	2
38/73	116	151700	162900	2
51/65	76	154300	164500	2
63/61	86	156700	165300	Supplément
40/72	116	152100	163100	Supplément
62/48	64	156500	167900	Supplément

Tableau 31. Placettes présélectionnées en hêtraies de plus de 120 à 180 ans

Identifiant	Âge du peuplement (2006), en années	Coordonnées Lambert 72		Scénario
		X	Y	
55/68	174	155100	163900	1 et 2
60/62	133	156100	165100	1 et 2
43/76	121	152700	162300	1 et 2
64/61	158	156900	165300	1 et 2
38/78	143	151700	161900	1 et 2
53/61	145	154700	165300	1 et 2
52/68	154	154500	163900	1 et 2
53/70	161	154700	163500	1 et 2
63/64	156	156700	164700	1 et 2
63/62	156	156700	165100	1 et 2
59/68	144	155900	163900	2
52/64	168	154500	164700	2
56/69	174	155300	163700	2
41/75	134	152300	162500	2
53/71	161	154700	163300	2
61/63	133	156300	164900	Supplément
35/78	143	151100	161900	Supplément
60/65	144	156100	164500	Supplément
52/66	153	154500	164300	Supplément
41/74	141	152300	162700	Supplément
52/65	153	154500	164500	Supplément
60/63	133	156100	164900	Supplément
62/67	156	156500	164100	Supplément

Tableau 32. Placettes présélectionnées en hêtraies de plus de 180 ans

Identifiant	Âge du peuplement (2006), en années	Coordonnées Lambert 72		Scénario
		X	Y	
45/74	194	153100	162700	1 et 2
51/72	194	154300	163100	1 et 2
45/69	187	153100	163700	1 et 2
43/71	189	152700	163300	1 et 2
42/69	189	152500	163700	1 et 2
42/65	198	152500	164500	1 et 2
46/69	190	153300	163700	2
47/72	197	153500	163100	2
48/72	197	153700	163100	2
47/71	190	153500	163300	2
54/63	191	154900	164900	2
44/71	189	152900	163300	Supplément
45/72	194	153100	163100	Supplément
46/70	190	153300	163500	Supplément

Tableau 33. Placettes présélectionnées en chênaies de 60 à 120 ans

Identifiant	Âge du peuplement (2006), en années	Coordonnées Lambert 72		Scénario
		X	Y	
35/72	61	151100	163300	1 et 2
35/71	61	151100	163100	1 et 2
56/49	61	155300	167700	2
57/49	60	155500	167700	Supplément

Tableau 34. Placettes présélectionnées en chênaies de plus de 120 ans

Identifiant	Âge du peuplement (2006), en années	Coordonnées Lambert 72		Scénario
		X	Y	
40/77	146	152100	162100	1 et 2
41/77	146	152300	162100	1 et 2
45/75	191	153100	162500	2
60/61	130	156100	165300	Supplément

Analyse des orthophotoplans

À moins d'une indication spéciale, tous les peuplements décrits apparaissent homogènes (équienne avec une espèce majoritaire). Les placettes, triées par strates, sont présentées dans l'ordre dans lequel elles ont été tirées par le logiciel R.

Tableau 35. Évaluation des unités d'échantillonnage (placettes) en hêtraies par interprétation des orthophotoplans de février 2006

Strate	Identifiant	Ecartement des arbres	Proximité d'une voirie	Remarque	Statut
Hêtraies, 60-120 ans	57/61	5 m	30 m d'un chemin	Assez hétérogène (présence de quelques grands arbres, peut-être des semenciers de coupes progressives)	CONSERVE
	55/66	5 m	30 m d'une route	Assez hétérogène (présence de quelques grands arbres, peut-être des semenciers de coupes progressives)	CONSERVE
	55/65	8 m	90 m d'une route	Assez hétérogène (présence de quelques grands arbres, peut-être des semenciers de coupes progressives)	CONSERVE
	41/72	5 m	/	À 40 m d'un fond de vallon.	CONSERVE
	36/70			<i>Hors image</i>	A REVISER
	38/73			<i>Hors image</i>	A REVISER
	39/72			<i>Hors image</i>	A REVISER
	38/72			<i>Hors image</i>	A REVISER
	54/72	5 m	À 50 m d'un chemin	Assez hétérogène (présence de quelques grands arbres, peut-être des semenciers de coupes progressives)	CONSERVE

Strate	Identifiant	Ecartement des arbres	Proximité d'une voirie	Remarque	Statut
	51/65	10 m	À 75 m d'un chemin	Traces d'exploitation (grumes, ornières).	CONSERVE
	51/70	5 m	À 25 m d'un chemin	Assez hétérogène (présence de quelques grands arbres, peut-être des semenciers de coupes progressives)	CONSERVE
	38/71			<i>Hors image</i>	A REVISER
	63/61	10 m	À 30 m du Ring O	Assez irrégulier ; mélange hêtres - pins.	CONSERVE
	40/72	8 m	75 m d'un chemin	Quelques traces d'exploitation (grumes, ornières)	CONSERVE
	62/48	10 m		Assez hétérogène (présence de quelques grands arbres, peut-être des semenciers de coupes progressives)	CONSERVE
	55/68	10 m	À 75 m d'un chemin	Quelques chablis	CONSERVE
Hêtraies, 120-180 ans	60/62	15 m	/	/	CONSERVE
	43/76	10 m	50 m d'un chemin	/	CONSERVE
	64/61	15 m	25 m d'un chemin	Traces d'exploitation (ornières).	CONSERVE
	36/79	/	/	Large ouverture du couvert (premier arbre à 17 m du centre de la placette). Ornières dues à l'exploitation ?	A DISCUTER
	38/78	10 m	/	/	CONSERVE

Strate	Identifiant	Ecartement des arbres	Proximité d'une voirie	Remarque	Statut
	53/61	15 m	85 m d'un chemin	À 30 m d'un peuplement plus dense	CONSERVE
	52/68	10 m	/	À 25 m d'un fond de vallon.	CONSERVE
	53/70	10 m	/	Traces d'exploitation (ornières, grumes).	CONSERVE
	63/64	10 m	À 100 m d'un chemin.	Traces d'exploitation (ornières). Chablis. À 30 m d'un peuplement mélangé avec résineux (pins)	CONSERVE
	63/62	10 – 15 m	25 m d'un chemin	Traces d'exploitation (ornières).	CONSERVE
	53/67	10 m	À 20 m d'un chemin.	Large ouverture (premier arbre à 13 m du centre de la placette). Ronces ?	A DISCUTER
	59/68	15 m	/	Traces d'exploitation (ornières).	CONSERVE
	37/77			<i>Hors image</i>	A REVISER
	52/64	5 m	À 20 m d'un chemin	Traces d'exploitation (grumes).	CONSERVE
	56/69	10 m	/	Chablis.	CONSERVE
	41/75	10 m	/	/	CONSERVE
	53/71	10 m	30 m d'un chemin	/	CONSERVE

Strate	Identifiant	Ecartement des arbres	Proximité d'une voirie	Remarque	Statut
	61/63	10 m	50 m d'un chemin	/	CONSERVE
	36/79	/	/	Peuplement très lâche. Large ouverture du couvert (premier arbre à 18 m du centre de la placette). Ornières dues à l'exploitation.	A DISCUTER
	35/78	15 m	/	Chablis.	CONSERVE
	60/65	10 m	À 70 m d'un chemin	/	CONSERVE
	52/66	10 m	À 80 m d'un chemin	/	CONSERVE
	41/74	10 m	/	/	CONSERVE
	52/65	10 m	/	/	CONSERVE
	60/63	10 m	90 m d'un chemin	/	CONSERVE
	62/67	10 m	40 m d'un chemin	/	CONSERVE
	43/74	5 – 10 m	/	/	CONSERVE
	61/64	5 – 10 m	/	/	CONSERVE
	64/62	15 m	/	/	CONSERVE

Strate	Identifiant	Ecartement des arbres	Proximité d'une voirie	Remarque	Statut
Hêtraies, plus de 180 ans	43/73	10 – 15 m	À 45 m d'une voirie	Peuplement assez lâche. Traces d'exploitation (ornières). Nombreux chablis.	A DISCUTER
	46/71	10 – 15 m	À 20 m d'un chemin	Peuplement assez lâche. Traces d'exploitation (ornières). Ronces ?	A DISCUTER
	45/74	10 m	/	Chablis	CONSERVE
	51/72	15 m	35 m d'un chemin	35 m d'un fond de vallon.	CONSERVE
	45/69	10 m	80 m d'un chemin	Traces d'exploitation (ornières). Nombreux chablis. 30 m d'un peuplement dense de résineux.	CONSERVE
	43/71	10 m	/	Chablis.	CONSERVE
	42/69	10 – 15 m	/	À 45 m d'un fond de vallon	CONSERVE
	42/65	10 m	50 m d'un chemin	/	CONSERVE
	46/69	10 m	À 90 m d'un chemin	Quelques chablis.	CONSERVE
	47/72	15 m		Traces d'exploitation (ornières).	CONSERVE
	42/68	15 – 20 m	À 60 m d'un chemin	Peuplement assez lâche (premier arbre à 10 m du centre de la placette). Traces d'exploitation (ornières). Nombreux chablis.	A DISCUTER
	48/72	15 m	/	Traces d'exploitation (ornières). Chablis. À 70 m d'un fond de vallon.	CONSERVE

Strate	Identifiant	Ecartement des arbres	Proximité d'une voirie	Remarque	Statut
	47/71	10 – 15 m	/	Quelques chablis.	CONSERVE
	54/63	10 m	À 40 m d'un chemin	Traces d'exploitation (ornières). Ronces, chablis. En limite de peuplements plus denses.	CONSERVE
	44/71	5 – 10 m	À 40 m d'un chemin	Traces d'exploitation (ornières). Ronces, chablis. En limite de peuplements plus denses.	CONSERVE
	50/69	10 – 15 m	/	<i>Peuplement assez lâche</i>	A DISCUTER
	41/67	15 – 20 m	/	<i>Peuplement très lâche.</i> Traces d'exploitation (ornières). Nombreux chablis.	A DISCUTER
	45/72	10 m	35 m d'un chemin	À 25 m d'un peuplement plus dense	CONSERVE
	46/70	10 m	/	Peuplement assez lâche. Traces d'exploitation (ornières). Ronces, chablis.	CONSERVE
	43/65	10 m	/	À proximité d'une clairière.	A DISCUTER

Tableau 36. Évaluation des unités d'échantillonnage (placettes) en chênaies par interprétation des orthophotoplans de février 2006

Strate	Identifiant	Ecartement des arbres	Proximité d'une voirie	Remarque	Statut
Chênaies, 60 à 120 ans	35/72		<i>Hors image</i>		A REVISER
	35/71		<i>Hors image</i>		A REVISER
	56/49	10 m	/	Traces d'exploitation (grumes, ornières).	CONSERVE
	57/49	10 m	À 75 m d'une chaussée	Traces d'exploitation (grumes, ornières).	CONSERVE
Chênaies, plus de 120 ans	40/77	15 m	À 90 m d'un chemin	Quelques résineux	CONSERVE
	41/77	15 m	/	Assez hétérogène.	CONSERVE
	45/75	10 m	À 35 m d'un chemin		CONSERVE
	58/62	15 m	<i>Sur un chemin</i>	/	A DISCUTER
	60/61	15 m	/	Mélangé avec pins.	CONSERVE

Analyse des images aériennes infrarouges

Tableau 37. Évaluation des unités d'échantillonnage (placettes) à partir des images aériennes infrarouges de l'été 2006

Strate	Identifiant	Ecartement des arbres	Proximité d'une voirie	Remarque	Statut
Hêtraies, 60 – 120 ans	36/70	10 m	À 45 m d'une drève	/	CONSERVE
	38/73	10 m	À 55 m d'un chemin	Peuplement assez ouvert	CONSERVE
	39/72		<i>Hors image</i>		?
	38/72	15 – 20 m	Sur une drève	/	REJETE
Hêtraies, 120 – 180 ans	37/77	10 – 15 m	À 75 m d'un chemin	Peuplement assez lâche	CONSERVE
Chênaies, 60 – 120 ans	35/72	5 – 10 m	À 80 m d'un chemin	Peuplement mélangé	CONSERVE
	35/71	10 m	À 70 m d'une drève	Peuplement mélangé	CONSERVE

Tableau 38. Distribution des placettes tirées selon le scénario I

Composition spécifique	Stade de développement	Nombre d'UE attendu (E)	Nombre d'UE sélectionnées (O)	Proportions	$(E - O)^2 / E$
Chênaies pures et mélangées	60 à 120 ans	2	1	4%	0,39
	Plus de 120 ans	2	2	7%	0,01
Hêtraies pures et mélangées	60 à 120 ans	5	4	15%	0,27
	120 à 180 ans	11	12	44%	0,07
	Plus de 180 ans	7	8	30%	0,13
TOTAL		27	27	100%	0,88 (χ^2)

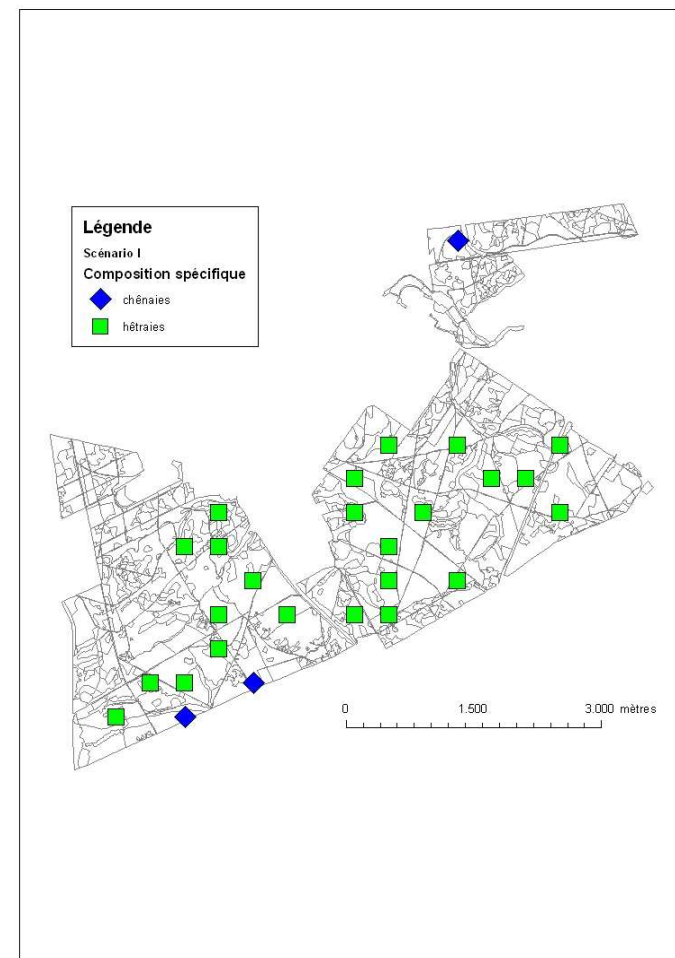


Figure 54. Répartition spatiale des placettes sélectionnées selon le scénario I

Tableau 39. Distribution des placettes tirées selon le scénario II

Composition spécifique	Stade de développement	Nombre d'UE attendu (E)	Nombre d'UE sélectionnées (O)	Proportions	$(E - O)^2 / E$
Chênaies pures et mélangées	60 à 120 ans	2	2	6%	0,02
	Plus de 120 ans	2	0	0%	2,19
Hêtraies pures et mélangées	60 à 120 ans	6	4	13%	0,74
	120 à 180 ans	13	17	53%	1,13
	Plus de 180 ans	8	9	28%	0,05
TOTAL		32	32	100%	4,13 (χ^2)

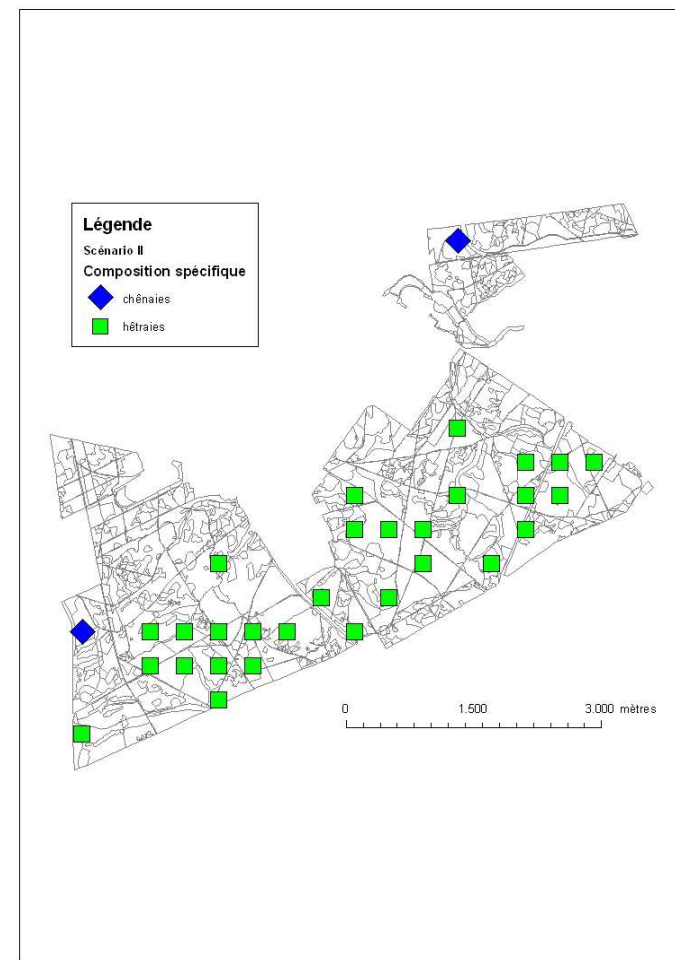


Figure 55. Répartition spatiale des placettes sélectionnées selon le scénario II

Tableau 40. Distribution des placettes tirées selon le scénario III

Composition spécifique	Stade de développement	Nombre d'UE attendu (E)	Nombre d'UE sélectionnées (O)	Proportions	$(E - O)^2 / E$
Chênaies pures et mélangées	60 à 120 ans	2	0	0%	1,78
	Plus de 120 ans	2	1	4%	0,34
Hêtraies pures et mélangées	60 à 120 ans	5	6	23%	0,21
	120 à 180 ans	11	14	54%	1,03
	Plus de 180 ans	7	5	19%	0,46
TOTAL		26	26	100%	3,82 (χ^2)

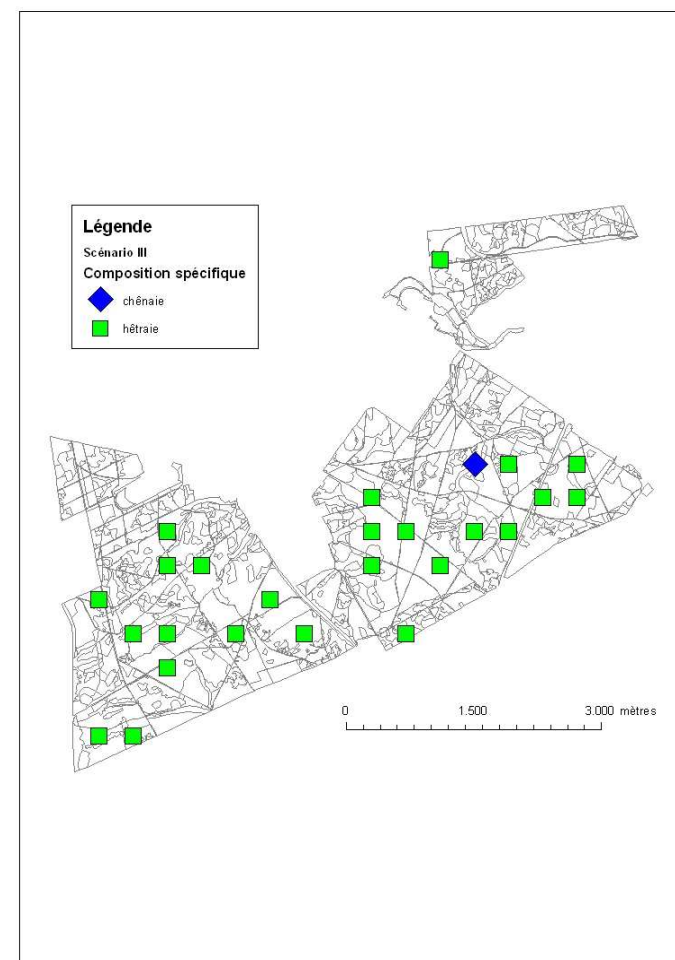


Figure 56. Répartition spatiale des placettes sélectionnées selon le scénario III

Tableau 41. Distribution des placettes tirées selon le scénario IV

Composition spécifique	Stade de développement	Nombre d'UE attendu (E)	Nombre d'UE sélectionnées (O)	Proportions	$(E - O)^2 / E$
Chênaies pures et mélangées	60 à 120 ans	2	2	6%	0,02
	Plus de 120 ans	2	2	6%	0,02
Hêtraies pures et mélangées	60 à 120 ans	6	8	25%	0,57
	120 à 180 ans	13	12	38%	0,10
	Plus de 180 ans	8	8	25%	0,01
TOTAL		32	32	100%	0,71 (χ^2)

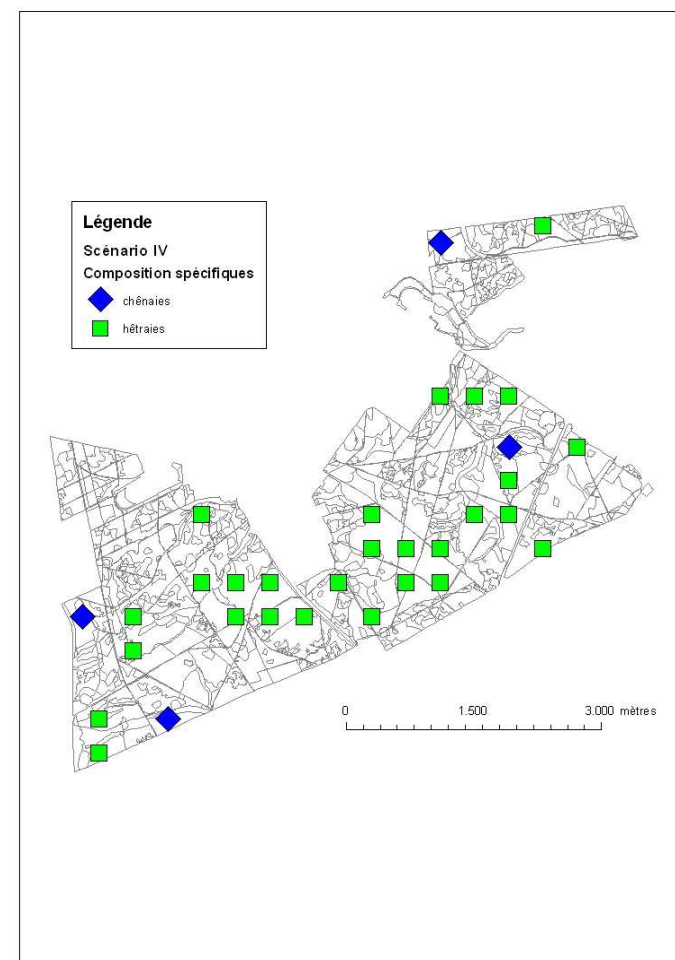


Figure 57. Répartition spatiale des placettes sélectionnées selon le scénario IV

3. Liste des 34 placettes de l'Inventaire Sanitaire

Tableau 42. Liste des 34 placettes de l'Inventaire Sanitaire, avec leurs positions.

Identifiant	Lambert X (m)	Lambert Y (m)	Latitude (degré décimal)	Longitude (degré décimal)
2791	151100	163300	50,780727	4,383083
2877	151300	162100	50,769939	4,385915
2879	151300	161700	50,766343	4,385913
3031	151700	163300	50,780725	4,391591
3033	151700	162900	50,777129	4,391589
3197	152100	162100	50,769936	4,397255
3345	152500	164500	50,791510	4,402942
3349	152500	163700	50,784318	4,402936
3509	152900	163700	50,784316	4,408608
3511	152900	163300	50,780720	4,408605
3595	153100	162500	50,773528	4,411434
3669	153300	163700	50,784314	4,414280
3671	153300	163300	50,780718	4,414277
3831	153700	163300	50,780716	4,419948
3989	154100	163700	50,784309	4,425624
4145	154500	164500	50,791497	4,431306
4147	154500	164100	50,787902	4,431301
4151	154500	163300	50,780710	4,431291
4307	154900	164100	50,787899	4,436974
4309	154900	163700	50,784303	4,436968
4449	155300	167700	50,820257	4,442698
4458	155300	165900	50,804076	4,442672
4467	155300	164100	50,787895	4,442646
4469	155300	163700	50,784299	4,442640
4529	155500	167700	50,820255	4,445536
4618	155700	165900	50,804072	4,448346
4625	155700	164500	50,791487	4,448325
4778	156100	165900	50,804068	4,454021
4781	156100	165300	50,798674	4,454011
4783	156100	164900	50,795079	4,454004
4785	156100	164500	50,791483	4,453997
4928	156500	167900	50,822042	4,459730
4947	156500	164100	50,787883	4,459663
5101	156900	165300	50,798665	4,465358

Tableau 43. Âge et typologie des 34 placettes

Identifiant	Type	Année de plantation du peuplement (TIMAL, 2006)	Âge du peuplement en 2009 (ans)
2791	chênaie	1945	64
2877	hêtraie	1863	146
2879	hêtraie	1863	146
3031	hêtraie	1890	119
3033	hêtraie	1890	119
3197	chênaie	1860	149
3345	hêtraie	1808	201
3349	hêtraie	1817	192
3509	hêtraie	1819	190
3511	hêtraie	1817	192
3595	chênaie	1815	194
3669	hêtraie	1816	193
3671	hêtraie	1816	193
3831	hêtraie	1809	200
3989	hêtraie	1818	191
4145	hêtraie	1853	156
4147	hêtraie	1938	71
4151	hêtraie	1937	72
4307	hêtraie	1840	169
4309	hêtraie	1845	164
4449	chênaie	1945	64
4458	hêtraie	1946	63
4467	hêtraie	1944	65
4469	hêtraie	1832	177
4529	chênaie	1946	63
4618	hêtraie	1946	63
4625	hêtraie	1862	147
4778	hêtraie	1877	132
4781	chênaie	1876	133
4783	hêtraie	1873	136
4785	hêtraie	1862	147
4928	hêtraie	1942	67
4947	hêtraie	1850	159
5101	hêtraie	1848	161

Tableau 44. Liste des 223 arbres analysés en 2009

Placette	Nombre de tiges par placette	Numéro de l'arbre (Inventaire Permanent)	Essence
2791	10	16	Hêtre
		20	Hêtre
		19	Hêtre
		1	Hêtre
		18	Hêtre
		12	Hêtre
		17	Hêtre
		14	Hêtre
		4	Hêtre
		8	Hêtre
2877	10	4	Hêtre
		9	Hêtre
		3	Hêtre
		6	Hêtre
		2	Hêtre
		1	Hêtre
		10	Chêne
		7	Hêtre
		5	Hêtre
		8	Hêtre
2879	1	1	Hêtre
3031	8	5	Hêtre
		6	Hêtre
		3	Hêtre
		9	Hêtre
		1	Hêtre
		2	Hêtre
		8	Hêtre
		4	Hêtre
3033	6	4	Hêtre
		3	Hêtre
		6	Hêtre
		7	Hêtre
		1	Hêtre
		5	Chêne

Placette	Nombre de tiges par placette	Numéro de l'arbre (Inventaire Permanent)	Essence
3197	11	3	Hêtre
		15	Hêtre
		8	Hêtre
		2	Hêtre
		4	Hêtre
		1	Hêtre
		9	Hêtre
		10	Hêtre
		5	Hêtre
		7	Hêtre
3345	8	6	Hêtre
		4	Hêtre
		5	Hêtre
		8	Hêtre
		3	Hêtre
		1	Hêtre
		7	Hêtre
3349	4	2	Hêtre
		4	Hêtre
		1	Hêtre
		3	Hêtre
3509	7	5	Hêtre
		4	Hêtre
		7	Hêtre
		6	Hêtre
		3	Hêtre
		2	Hêtre
		1	Hêtre
3511	7	6	Hêtre
		7	Hêtre
		4	Hêtre
		3	Hêtre
		5	Hêtre
		2	Hêtre
3595	4	19	Chêne
		15	Chêne
		5	Chêne
		20	Hêtre
3669	7	5	Hêtre
		4	Hêtre
		2	Hêtre
		6	Hêtre
		3	Hêtre
		7	Hêtre
		8	Hêtre

Placette	Nombre de tiges par placette	Numéro de l'arbre (Inventaire Permanent)	Essence
3671	1	1	Hêtre
3831	7	3	Hêtre
		1	Hêtre
		2	Hêtre
		5	Hêtre
		4	Hêtre
		6	Hêtre
		7	Hêtre
3989	5	2	Hêtre
		3	Hêtre
		4	Hêtre
		5	Hêtre
		7	Hêtre
4145	8	6	Hêtre
		8	Hêtre
		2	Hêtre
		1	Hêtre
		5	Hêtre
		3	Hêtre
		4	Hêtre
		7	Hêtre
4147	9	8	Hêtre
		22	Chêne
		19	Chêne
		17	Hêtre
		16	Hêtre
		13	Hêtre
		20	Chêne
		21	Hêtre
		18	Hêtre
4151	9	10	Chêne
		1	Hêtre
		13	Chêne
		6	Chêne
		5	Hêtre
		7	Hêtre
		11	Chêne
		2	Chêne
		9	Hêtre
4307	2	2	Hêtre
		1	Hêtre
4309	5	5	Hêtre
		2	Hêtre
		3	Hêtre
		1	Hêtre
		4	Hêtre

Placette	Nombre de tiges par placette	Numéro de l'arbre (Inventaire Permanent)	Essence
4449	5	11	Chêne
		8	Chêne
		7	Chêne
		17	Chêne
		10	Chêne
4458	4	9	Hêtre
		2	Hêtre
		6	Hêtre
		17	Hêtre
4467	7	12	Hêtre
		8	Hêtre
		1	Hêtre
		11	Hêtre
		9	Hêtre
		14	Hêtre
4469	4	6	Hêtre
		2	Hêtre
		1	Hêtre
		3	Hêtre
4529	5	4	Hêtre
		16	Hêtre
		3	Hêtre
		9	Hêtre
		5	Hêtre
		6	Hêtre

Placette	Nombre de tiges par placette	Numéro de l'arbre (Inventaire Permanent)	Essence
4618	12	12	Hêtre
		5	Hêtre
		10	Hêtre
		14	Hêtre
		3	Hêtre
		7	Hêtre
		9	Hêtre
		17	Hêtre
		13	Hêtre
		2	Hêtre
		4	Hêtre
		11	Hêtre
		4625	5
11	Chêne		
4	Hêtre		
18	Hêtre		
17	Chêne		
14	Hêtre		
16	Hêtre		
1	Hêtre		
3	Hêtre		
4778	9	10	Hêtre
		6	Hêtre
		12	Hêtre
		11	Hêtre
		5	Hêtre
		4	Hêtre
		3	Hêtre
		8	Hêtre
2	Hêtre		
4781	1	20	Chêne

Placette	Nombre de tiges par placette	Numéro de l'arbre (Inventaire Permanent)	Essence
4783	9	11	Hêtre
		5	Hêtre
		7	Hêtre
		4	Hêtre
		8	Hêtre
		12	Hêtre
		2	Hêtre
		1	Hêtre
		3	Hêtre
4785	13	4	Hêtre
		8	Hêtre
		9	Hêtre
		11	Hêtre
		5	Hêtre
		10	Hêtre
		3	Hêtre
		2	Hêtre
		7	Hêtre
		6	Hêtre
		12	Hêtre
		13	Hêtre
		1	Hêtre
4928	4	5	Hêtre
		15	Hêtre
		14	Hêtre
		12	Hêtre
4947	6	7	Hêtre
		5	Hêtre
		4	Hêtre
		3	Hêtre
		6	Hêtre
		1	Hêtre
5101	6	7	Hêtre
		4	Hêtre
		6	Hêtre
		2	Hêtre
		5	Hêtre
		3	Hêtre

4. Détermination du nombre d'arbres par placettes

Tableau 45. Description des lots de données ayant servi à la simulation statistique.

Lot de données	Essence	Année	Moyenne du niveau de défoliation (%)	Écart-type du niveau de défoliation (%)
EP1_2005	Épicéa	2005	16	8
EP2_2005	Épicéa	2005	11	6
EP3_2005	Épicéa	2005	21	11
HE5_2005	Hêtre	2005	34	21
HE6_2005	Hêtre	2005	15	8
HE7_2005	Hêtre	2005	6	3
CH8_2005	Chêne	2005	23	13
HE9_2005	Hêtre	2005	14	9
EP1_2007	Épicéa	2005	26	14
EP2_2007	Épicéa	2007	21	13
EP3_2007	Épicéa	2007	27	13

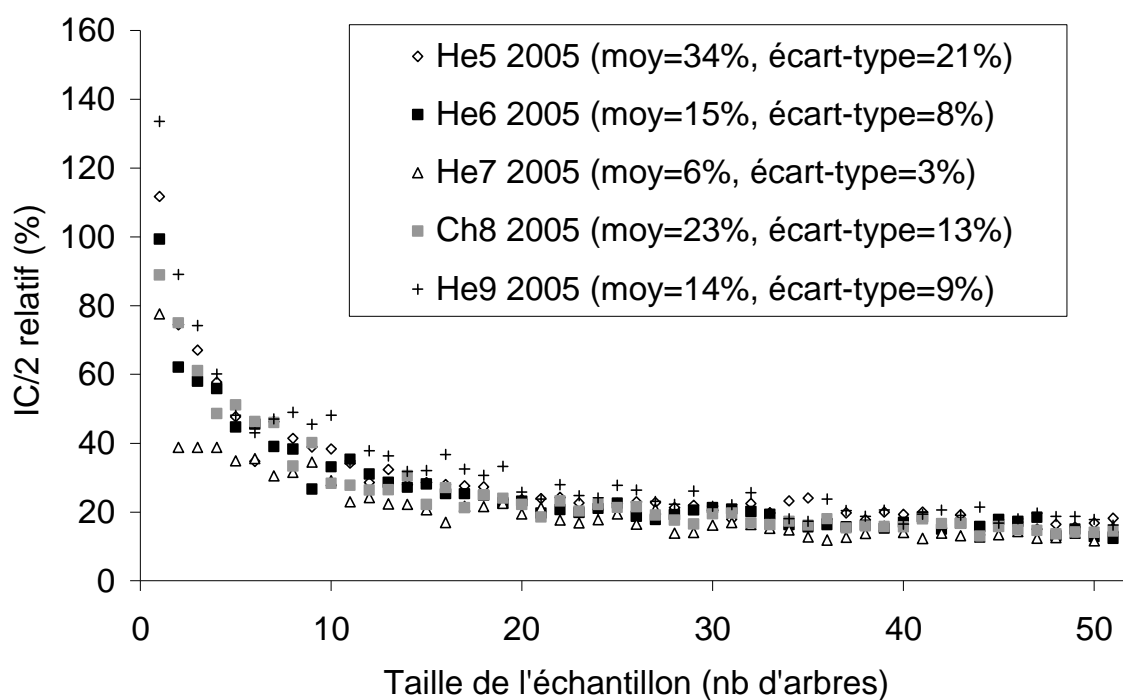


Figure 58. Courbes du demi-intervalle de confiance relatif rapporté au nombre d'arbres mesurés par placette (feuillus)

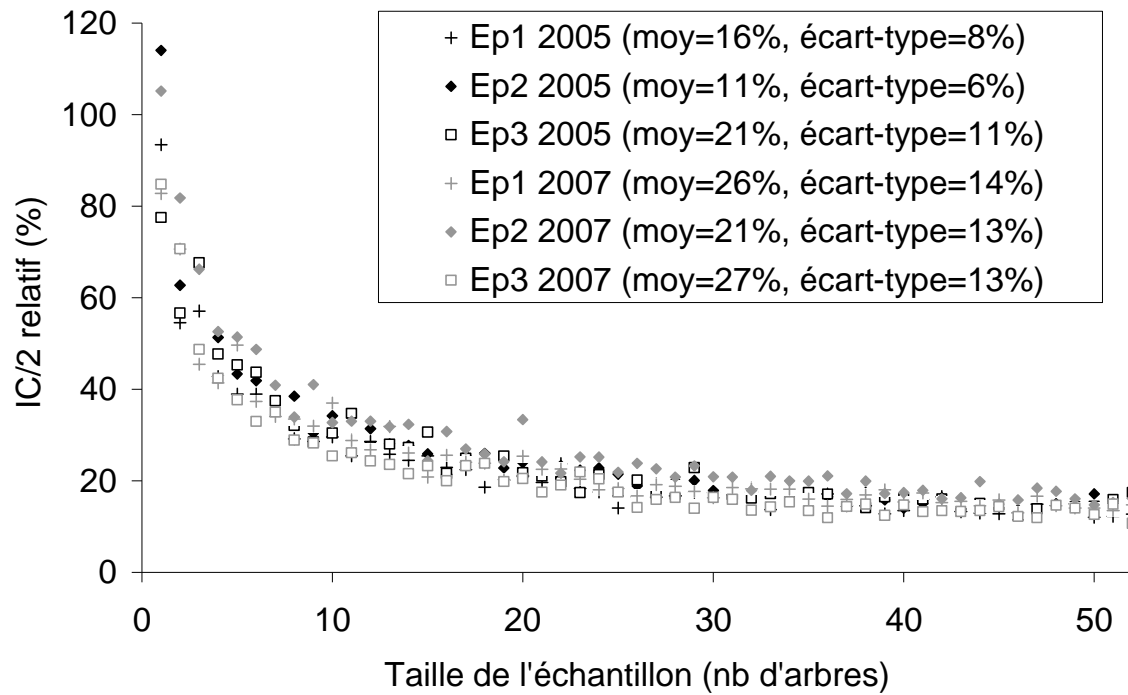


Figure 59. Courbes du demi-intervalle de confiance relatif rapporté au nombre d'arbres mesurés par placette (résineux)