



HAL
open science

Influence of stand structure on understory light distribution. Case of a heterogeneous broadleaved forest on limestones.

Alexandre Piboule

► To cite this version:

Alexandre Piboule. Influence of stand structure on understory light distribution. Case of a heterogeneous broadleaved forest on limestones.. Life Sciences [q-bio]. ENGREF (AgroParisTech), 2005. English. NNT: . pastel-00001666

HAL Id: pastel-00001666

<https://pastel.hal.science/pastel-00001666>

Submitted on 29 Mar 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts

École Doctorale Ressources, Procédés, Produits, Environnement

Thèse présentée pour l'obtention du grade de

Docteur de l'ENGREF

Spécialité : Sciences Forestières

par **Alexandre PIBOULE**

**Influence de la structure du peuplement forestier
sur la distribution de l'éclaircissement sous couvert.
Cas d'une forêt hétérogène feuillue sur plateau calcaire.**

Soutenue publiquement le **14 avril 2005** devant la commission d'examen composée de :

Rapporteurs :	M. Paul BERBIGIER	Directeur de recherches, INRA-EPHYSE, Bordeaux
	M. Christian MESSIER	Professeur, directeur du GREFi, Université du Québec à Montréal
Examineurs :	M ^{me} Catherine COLLET	Chargée de recherches, LERFOB, UMR INRA-ENGREF, Nancy
	M. Thomas CORDONNIER	Docteur Ingénieur, ONF, DTRD, Fontainebleau
	M. Jean-François DHOTE	Chargé de recherches, directeur de thèse, LERFOB, UMR INRA-ENGREF, Nancy
	M. Daniel EPRON	Professeur des universités, Université Henri Poincaré, Nancy I

Thèse réalisée au sein du Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois (LERFOB)
UMR INRA-ENGREF 1092



Remerciements

Je tiens avant tout à remercier Henri Frochot, qui, il y a quelques années, m'a accueilli à bras ouverts dans le monde de la recherche forestière. Sans lui ce travail n'aurait jamais pu voir le jour. En particulier, son optimisme inébranlable, son esprit inventif et ses grandes qualités humaines en font à mes yeux un exemple à suivre. Les très nombreuses discussions que nous avons eues tout au long de ce travail sont pour beaucoup dans le résultat final.

Si Henri fut mon mentor, Catherine Collet fût sans conteste mon guide. Par sa franchise et sa grande rigueur scientifique, elle m'a aidé à de nombreuses reprises à garder le cap. Ses critiques constructives m'ont permis de progresser dans ma démarche scientifique. Je lui suis profondément reconnaissant pour tout cela, ainsi que pour son soutien moral dans les moments difficiles.

Je tiens également à remercier les différentes personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail :

- Claude Millier et Patrice Mengin-Lecreulx qui ont soutenu ce projet et suivi son avancement.
- Jean-François Dhôte, qui a accepté de diriger cette thèse.
- Les membres du comité de thèse : Hervé Sinoquet, Isabelle Vinkler, Jean-Claude Pierrat, Myriam Legay, Pierre Montpied et Pierre Duplat pour leur participation active à l'orientation de ce travail.
- Andreas Brunner, qui nous a permis d'utiliser son modèle de lumière tRAYci, et nous a fourni un appui scientifique et technique de grande qualité à ce sujet.
- Yves Lefèvre, qui nous a aidé lors de l'analyse pédologique du dispositif.
- Claude Varlet-Grancher, pour ses conseils sur la caractérisation de l'éclairement.
- Kamel Soudani qui m'a aidé pour la méthode des photographies hémisphériques.
- Philippe Balandier pour ses conseils concernant les relations entre éclairage et surface terrière.
- François Ningre, Francis Colin, Jean-Marc Ottorini, Noël LeGoff et Michel Ravart pour leurs conseils avisés.

Un grand merci à toutes les personnes qui m'ont fourni un appui technique et / ou aidé à récolter les très nombreuses données nécessaires à ce travail :

- Avant tout Bruno Garnier, qui a passé plusieurs mois avec moi sur le terrain en particulier pour la caractérisation des houppiers.
- Michel Pitsch qui a réalisé et seillé les photographies hémisphériques. De plus Michel Pitsch et Allain Mercanti ont conçu et réalisé le dispositif d'autostabilisation à l'horizontale du système de prise de vue.
- Léon Wehrlen, Denis Stauffer, Michael Szymanski, Guy Maréchal, Florence Grandemange, Waltraud Körner qui ont participé aux mesures.
- Patrick Gross pour son aide lors de la mise au point des systèmes électroniques utilisés pour les photographies hémisphériques.
- Patrick Behr pour le prêt du GPS.

Merci également à Claude Parvé, secrétaire de l'équipe Croissance du LERFOB.

Merci aux stagiaires que j'ai encadré, et qui ont apporté leur pierre à l'ouvrage :

- Nadine Geoffroy et Maïlys Clause pour l'analyse rétrospective des semis.
- Etienne Formey de Saint Louvent, pour l'analyse stationnelle et dendrométrique du peuplement.

- Luc Chausson avec qui nous avons mis au point le système de repérage automatique du Nord sur les photographies hémisphériques.

Merci aux personnels de l'Office National des Forêts qui ont répondu à mon enquête pour la recherche du dispositif, et en particulier à ceux qui m'ont permis de travailler en forêt domaniale du Graoully :

- Le service patrimonial de la DT Lorraine, et en particulier Jérôme Bock.
- Muriel Kazmierczak, du service patrimonial de l'agence de Metz.
- Gérard Liégeois (agence de Metz), agent chargé de la gestion des parcelles où le dispositif est installé.

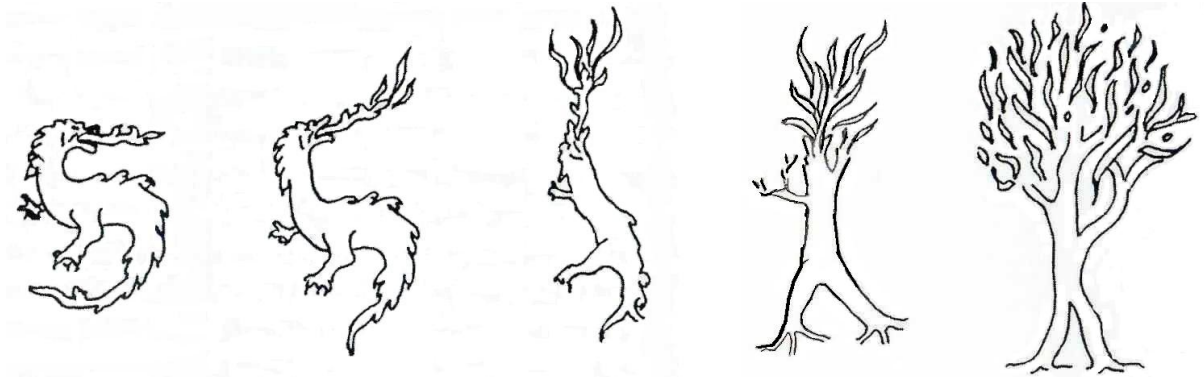
Merci également à l'amicale des chasseurs du Graoully qui nous a généreusement donné accès à la baraque de chasse lors des campagnes de mesures, et qui nous a accueilli chaleureusement malgré la gêne occasionnée par nos travaux.

Enfin merci à ma famille et mes amis qui m'ont encouragé tout au long de ce travail.

Je tiens tout particulièrement à remercier ma merveilleuse épouse, Nadine, pour ses conseils, son soutien et son amour de chaque instant.

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une FCPR, financée par l'Office National des Forêts, qui a également mis à disposition le site d'étude et participé aux frais de fonctionnement. Le LERFOB a, quant à lui, fourni les moyens matériels et techniques pour ce travail.

Avant-propos



Métamorphose du Graouilly

« Jadis, dans la ville de Metz, on racontait qu'à la nuit tombée le Graouilly dévorait les enfants... »

De cette légende, il reste aujourd'hui des noms de rues, de jolies statues dans les églises, dans nos gènes une obscure angoisse...et quelques curiosités forestières.

Au début de notre ère, Saint Clément, le premier évêque de Metz, avait réussi l'exploit de terrasser le Graouilly avant de le précipiter dans la Seille... Il fut donc canonisé pour service rendu à la population – ce qui est la moindre des choses. Mais personne à l'époque ne s'était rendu compte que dans un dernier effort le dragon était parvenu à sortir de la rivière avant d'aller mourir paisiblement dans la forêt lointaine, celle où il aimait tant dévorer les petits enfants.

Répondus ça et là par les prédateurs de monstres, les restes de sa dépouille se sont lentement lignifiés, donnant naissance à de mystérieux arbres qui étonnent les passants, intriguent les scientifiques et donnent encore des frissons aux rêveurs qui les regardent trop longtemps. »

Gérard Liégeois, O.N.F., Agence de Metz.

Table des Matières

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : PRÉSENTATION DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.....	6
A. Contexte général de l'étude.....	6
B. Choix du dispositif	6
C. Site retenu	7
1. Informations générales.....	7
2. Délimitation des placettes	9
D. Stratégie d'échantillonnage.....	10
1. Caractérisation du peuplement.....	10
a. Les zones d'étude.....	10
b. Les zones tampon	10
2. Caractérisation de la régénération.....	12
a. Placeaux de régénération.....	12
b. Analyses rétrospectives.....	14
3. Vérification de l'homogénéité du site.....	14
E. Récolte des données	15
1. Mise en place de points de repères.....	15
2. Mesures sur le peuplement.....	15
a. Caractérisation des troncs	15
b. Caractérisation des houppiers	16
c. Cas des cépées.....	20
3. Répartition du temps de Mesure	21
4. Traitement des données.....	22
CHAPITRE II : CARACTÉRISATION DE L'ÉCLAIREMENT SOUS COUVERT.....	23
A. Définitions.....	23
B. Méthodes de mesure et d'estimation de l'éclairage	26
1. Les méthodes directes de mesure du PPFd	26
2. Les méthodes indirectes d'estimation de l'éclairage	27
3. La méthode des photographies hémisphériques.....	28
a. Prise de vue	28
b. Obtention d'une image numérique.....	29
c. Seuillage.....	29
d. Analyse de la photographie.....	30
e. Argentique ou numérique.....	31
4. Les modèles de lumière.....	31
a. Représentation du couvert.....	31
b. Distribution du rayonnement incident.....	32
c. Interception du rayonnement incident.....	34
C. Caractérisation de l'éclairage sur le dispositif	35
1. Choix d'un modèle de lumière.....	35
2. Mesure directe de l'éclairage à l'aide de capteurs.....	36
a. Échantillonnage.....	36
b. Étalonnage des capteurs.....	37
c. Période de mesure et traitement des données.....	37
3. Estimation de l'éclairage à l'aide de photographies hémisphériques.....	39

a.	Échantillonnage.....	39
b.	Conditions de mesure.....	39
c.	Traitement des données.....	40
d.	Comparaison avec les capteurs de lumière.....	42
4.	Validation partielle de la méthode proposée par <i>Parent et Messier 1996</i>	44
D.	Présentation du modèle de lumière tRAYci.....	46
1.	Caractéristiques du modèle tRAYci.....	46
a.	Représentation des arbres dans tRAYci.....	47
b.	Rayonnement incident dans tRAYci.....	49
c.	Interception du rayonnement dans tRAYci.....	50
2.	Alimentation du modèle pour notre étude.....	51
a.	Données du peuplement.....	51
b.	Choix des paramètres espèce-dépendants.....	53
c.	Calibration du LAD.....	54
3.	Validation des simulations.....	56
4.	Cartographie de l'éclairement sur le dispositif.....	58

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA STRUCTURE DU COUVERT59

A.	Démarche.....	59
B.	Structuration verticale des houppiers.....	59
1.	Distribution verticale des essences.....	60
2.	Recouvrement entre houppiers.....	61
C.	Relations entre caractéristiques du houppier et diamètre à 1,30 m en fonction de l'essence.....	63
1.	Variables étudiées.....	63
2.	Hauteur totale (H_t).....	66
3.	Longueur de houppier (LH).....	69
4.	Extension latérale du houppier (R_{eq}).....	71
5.	Hauteur de plus grande largeur de houppier (H_m).....	73
6.	Volume résultant du houppier.....	74
D.	Caractérisation de l'extension latérale des houppiers.....	74
1.	Démarche.....	74
2.	Coefficient de variation (cv).....	77
3.	Longueur de déplacement relative (L_D).....	78
4.	Coefficient d'irrégularité (C_I).....	79
5.	Coefficient d'extension maximale (C_E).....	79
E.	Bilan.....	80

CHAPITRE IV : RECONSTITUTION DES HOUPPIERS À PARTIR DES CARACTÉRISTIQUES DENDROMÉTRIQUES DU COUVERT82

A.	Démarche.....	82
1.	Problématique.....	82
2.	Détermination des paramètres espèce-dépendants.....	83
3.	Reconstitution des variables de hauteur.....	84
B.	Reconstruction de l'extension latérale du houppier.....	84
1.	Approche isotrope.....	85
2.	Approche anisotrope : reconstruction des houppiers par minimisation du recouvrement.....	86
a.	Objectif.....	86
b.	Principes et hypothèses fondatrices.....	86
c.	Paramètres.....	88
d.	Description de l'algorithme.....	89

3.	Choix du centre de houppier	95
4.	Évaluation de l'algorithme du point de vue géométrique	95
a.	Analyse des critères de forme à l'échelle du peuplement	96
b.	Analyse des critères de forme à l'échelle de l'arbre	97
C.	Comparaison des approches isotrope et anisotrope	97
1.	Démarche	97
2.	Comparaison des recouvrements entre houppiers.....	98
3.	Comparaison des simulations de l'éclairement relatif sous couvert.....	99
a.	Comparaison avec la version mesurée	99
b.	Comparaison avec les capteurs CBE.....	101
D.	Bilan	102

CHAPITRE V : RELATION ENTRE CARACTÉRISTIQUES DENDROMÉTRIQUES DU PEUPEMENT ET ÉCLAIREMENT RELATIF 104

A.	Démarche.....	104
B.	Indices dendrométriques.....	105
1.	Objectif.....	105
2.	Indice dendrométrique n°1 : la surface terrière totale.....	105
3.	Indice dendrométrique n°2 : surface terrière sectorisée (4 secteurs).....	107
4.	Indice dendrométrique n°3 : surface terrière sectorisée (8 secteurs).....	108
5.	Bilan sur les indices dendrométriques	109

DISCUSSION..... 111

A.	Choix du dispositif et données mesurées.....	111
1.	Particularités et pertinence du dispositif choisi.....	111
2.	Problèmes techniques concernant les mesures effectuées	111
B.	Géométrie des houppiers.....	112
1.	Intérêt du diamètre à 1,30 m et relations obtenues	112
2.	Forme des houppiers	113
3.	Prise en compte de l'essence.....	116
C.	Caractérisation de l'éclairement	117
1.	Les photographies hémisphériques	117
2.	Le modèle tRAYci	118
3.	Les indices dendrométriques.....	118
D.	Apports, limites et perspectives de la démarche de reconstruction des houppiers par minimisation des recouvrements.....	119
1.	Intérêt de la méthode.....	119
2.	Améliorations envisagées	120
a.	Prise en compte de la variabilité des caractéristiques du houppier	120
b.	Modification de la géométrie de reconstruction.....	121
c.	Vers une reconstruction plus intégrée des peuplements.....	121

CONCLUSION 123

BIBLIOGRAPHIE 125

ANNEXE 1 : PLAN D'ACCÈS AU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL	137
ANNEXE 2 : DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES	138
ANNEXE 3 : EXTRAIT DE LA NOTI DE LA CARTE GÉOLOGIQUE.....	140
ANNEXE 4 : CARTE IGN DU DISPOSITIF	141
ANNEXE 5 : MESURES RÉALISÉES SUR LA RÉGÉNÉRATION.....	142
ANNEXE 6 : PROTOCOLE DE COMPTAGE DES CERNES. RAPPORT TECHNIQUE DE MAÏLYS CLAUSSE	145
ANNEXE 7 : ANALYSES DE SOL	147

Table des figures

	Titre	Page
CHAPITRE I		
Figure 1	Localisation du site	7
Figure 2	Carte géologique	8
Figure 3	Composition en diamètre et essences du peuplement	8
Figure 4	Chemins d'accès et topographie	9
Figure 5	Photographie aérienne (2001)	10
Figure 6	Limites des placettes, zones et trouées	11
Figure 7	Principe des zones tampon	11
Figure 8	Localisation des placeaux de régénération	13-14
Figure 9	Localisation des fosses pédologiques	13-14
Figure 10	Profil de sol	14
Figure 11	Variabilité pédologique du site	15
Figure 12	Composition en diamètre et essences par placette	15
Figure 13	Maillage de référence et chemins d'accès	16
Figure 14	Définition de la hauteur de base de houppier	17
Figure 15	Méthode d'extrapolation du rayon de houppier	18
Figure 16	Méthode de projection de houppier	19
Figure 17	Cartographie des arbres mesurés et de leurs houppiers	19
Figure 18	Définition de la cépée	20
Tableau I	Répartition du temps de mesure	21
CHAPITRE II		
Figure 19	Différentes composantes de l'éclairement	24
Figure 20	Illustration de l'approche surfacique	32
Figure 21	Illustration de l'approche discrète	32
Figure 22	Illustration de l'approche géométrique	32
Figure 23	Distribution du rayonnement diffus sur l'hémisphère céleste	33
Figure 24	Distribution du rayonnement total sur l'hémisphère céleste	33
Figure 25	Localisation des capteurs CBE	37
Figure 26	Exemple de courbe d'étalonnage d'un capteur CBE	38
Figure 27	Relation journalière entre Pdif et PPFD moyen	38
Figure 28	Localisation des photographies hémisphériques	39
Figure 29	Appareil numérique Nikon CoolPix 5000 et Fisheye FC-E8	40
Figure 30	Système d'autostabilisation à l'horizontale	40
Figure 31	Système de repérage automatique du Nord	40
Figure 32	Système de déclenchement à distance	40
Figure 33	Système complet de prise de vue	40
Figure 34	Courbe de distortion de l'ensemble CoolPix 5000 et Fisheye FC-E8	41
Figure 35	Illustration du problème de la surexposition du ciel	42
Figure 36	Exemples de seuillages	41
Figure 37	Comparaison entre capteurs CBE et photographies hémisphériques	43
Figure 38	Comparaison entre la méthode Parent et Messier 1996 et capteurs CBE	45
Tableau II	Travaux ayant utilisé le modèle tRAYci	46
Figure 39	Forme du houppier dans le modèle tRAYci	46

Figure 40	Paramètres de forme : équation et variations possibles	47
Figure 41	Paramètres d'épaisseur du feuillage	48
Figure 42	Réprésentation discrète du peuplement dans le modèle tRAYci	49
Figure 43	Préparation de la placette de simulation	52
Figure 44	Correction de l'estimation de l'éclairement relatif obtenu par les photographies hémisphériques	55
Figure 45	Calibration du paramètre LAD	56
Figure 46	Validation du modèle tRAYci par les capteurs CBE	57
Figure 47	Carte de l'éclairement relatif sur les zones d'étude des deux placettes	58
Figure 48	Distribution de l'éclairement relatif sur les zones d'étude des deux placettes	58
CHAPITRE III		
Figure 49	Distribution verticale des houppiers	60
Figure 50	Carte de recouvrement des houppiers	61
Figure 51	Recouvrement des houppiers selon la hauteur	62
Figure 52	Effet de la stratification verticale sur le recouvrement entre houppiers	63
Figure 53	Effet d'une stratification verticale au sein d'une cèpée	64
Figure 54	Modèle hyperbolique de la hauteur en fonction du diamètre à 1,30 m	66
Tableau III	Relation hauteur totale - diamètre à 1,30 m (tableau de la regression)	67
Figure 55	Relation hauteur totale - diamètre à 1,30 m (ajustements par essences)	67
Figure 56	Relation hauteur totale - diamètre à 1,30 m (graphique des résidus)	68
Figure 57	Relation hauteur totale - diamètre à 1,30 m (comparaison des essences)	68
Tableau IV	Relation longueur de houppier - diamètre à 1,30 m (tableau de la regression)	69
Figure 58	Relation longueur de houppier - diamètre à 1,30 m (ajustements par essences)	69
Figure 59	Relation longueur de houppier - diamètre à 1,30 m (graphique des résidus)	70
Figure 60	Relation longueur de houppier - diamètre à 1,30 m (comparaison des essences)	70
Tableau V	Relation rayon équivalent de houppier - diamètre à 1,30 m (tableau de la regression)	71
Figure 61	Relation rayon équivalent de houppier - diamètre à 1,30 m (ajustements par essences)	71
Figure 62	Relation rayon équivalent de houppier - diamètre à 1,30 m (graphique des résidus)	72
Figure 63	Relation rayon équivalent de houppier - diamètre à 1,30 m (comparaison des essences)	72
Tableau VI	Moyenne et écart-type de la hauteur de plus grande largeur de houppier, par essence	73
Figure 64	Relation hauteur de plus grande largeur de houppier - diamètre à 1,30 m (par essence)	73
Figure 65	Qualité de l'estimation du volume de houppier	74
Figure 66	Passage de 8 rayons mesurés à 32 rayons systématiques pour le houppier	75
Figure 67	Signification géométrique des critères de forme du houppier utilisés	77
Figure 68	Relation coefficient de variation des rayons du houppier - diamètre à 1,30 m (par essence)	78
Figure 69	Effet de la longueur déplacement sur la longueur des rayons	78
Figure 70	Relation longueur de déplacement du houppier - diamètre à 1,30 m (par essence)	79
Figure 71	Relation coefficient d'irrégularité du houppier - diamètre à 1,30 m (par essence)	79-80
Figure 72	Relation coefficient d'extension maximale du houppier - diamètre à 1,30 m (par essence)	79-80
CHAPITRE IV		
Figure 73	Influence de l'hétérogénéité du peuplement sur la distribution de l'éclairement sous couvert	83
Figure 74	Principe des deux approches de reconstruction des houppiers proposées	85
Figure 75	Différentes étapes de l'algorithme (approche anisotrope)	89
Figure 76	Détermination des niveaux de hauteurs pour le calcul des intersections entre houppiers	90
Figure 77	Relation coefficient de variation des rayons du houppier reconstruit - diamètre à 1,30 m (par essence)	96
Figure 78	Relation longueur de déplacement du houppier reconstruit - diamètre à 1,30 m (par essence)	96-97
Figure 79	Relation coefficient d'irrégularité du houppier reconstruit - diamètre à 1,30 m (par essence)	96-97

Figure 80	Relation coefficient d'extension maximale du houppier reconstruit - diamètre à 1,30 m (par essence)	97
Figure 81	Comparaison des critères de formes entre versions mesurée et reconstruite du houppier	98
Figure 82	Carte de recouvrement des houppiers (versions mesurée, isotrope et anisotrope de base)	98-99
Figure 83	Recouvrement des houppiers selon la hauteur (versions mesurée, isotrope et anisotrope de base)	98-99
Figure 84	Carte de recouvrement des houppiers (versions isotropes et anisotropes, tronc et houppier)	98-99
Figure 85	Recouvrement des houppiers selon la hauteur (versions isotropes et anisotropes, tronc et houppier)	98-99
Figure 86	Comparaison de l'ER% pour les versions isotropes tronc et houppier vis-à-vis de la version mesurée	100-101
Figure 87	Comparaison de l'ER% pour les versions anisotropes tronc et houppier vis-à-vis de la version mesurée	100-101
Figure 88	Carte de l'éclairement relatif (version isotrope tronc)	101
Figure 89	Distribution de l'éclairement relatif (version isotrope tronc)	101
Figure 90	Carte de l'éclairement relatif (version isotrope houppier)	101-102
Figure 91	Distribution de l'éclairement relatif (version isotrope houppier)	101-102
Figure 92	Carte de l'éclairement relatif (version anisotrope tronc)	101-102
Figure 93	Distribution de l'éclairement relatif (version anisotrope tronc)	101-102
Figure 94	Carte de l'éclairement relatif (version anisotrope houppier)	101-102
Figure 95	Distribution de l'éclairement relatif (version anisotrope houppier)	101-102
Figure 96	Comparaison de l'ER% pour les versions isotropes tronc et houppier vis-à-vis des capteurs CBE	101-102
Figure 97	Comparaison de l'ER% pour les versions anisotropes tronc et houppier vis-à-vis des capteurs CBE	102
CHAPITRE V		
Figure 98	Principe de l'indice ID1	106
Figure 99	Relation entre éclairement relatif et surface terrière locale	106-107
Figure 100	Relation entre éclairement relatif et indice ID1	106-107
Figure 101	Distribution de la valeur de l'indice ID1 sur les zones d'étude des deux placettes	106-107
Figure 102	Principe de l'indice ID2	107
Figure 103	Relation entre éclairement relatif et indice ID2	107
Figure 104	Distribution de la valeur de l'indice ID2 sur les zones d'étude des deux placettes	107
Figure 105	Principe de l'indice ID3	108
Figure 106	Relation entre éclairement relatif et indice ID3	108
Figure 107	Distribution de la valeur de l'indice ID3 sur les zones d'étude des deux placettes	108
ANNEXES		
Figure 108	Structure d'un plateau de régénération	142
Figure 109	Le microtome	145

Introduction

La conception de la forêt française a fortement évolué dans les dernières décennies. Pendant une grande partie du vingtième siècle, la gestion forestière répondait à trois objectifs principaux, le plus souvent dissociés dans l'espace :

- Obtenir un fort capital sur pied au sein de peuplements de production, afin de répondre aux besoins de la société en bois d'œuvre et d'industrie. Cette politique s'est traduite par l'utilisation de systèmes rationalisés permettant de planifier la récolte et de garantir une capitalisation et un renouvellement de la ressource.
- Garantir le renouvellement des forêts afin d'assurer la pérennité des surfaces forestières à long terme.
- Maintenir, au sein de forêts de protection (via le service de Restauration des Terrains en Montagne), un état boisé dans les zones présentant des risques naturels importants (avalanches, éboulements, etc.).

Au cours des trente dernières années, la société a reconnu ou attribué à la forêt un nombre croissant de rôles nouveaux. Celle-ci se doit désormais d'être multifonctionnelle, et ses gestionnaires doivent concilier, souvent sur un même territoire, des aspects aussi variés que la production de bois, le rôle de protection, la gestion cynégétique, la prise en compte patrimoniale de la biodiversité, l'accueil des activités de loisir et culturelles (elles aussi très diverses), la fonction paysagère, la sauvegarde de la qualité de l'eau, le stockage de carbone (en réponse aux changements climatiques) et d'autres encore. Cependant, la fonction de production qui a également évolué vers une prise en compte de plus en plus intégrée des débouchés, reste souvent, avec l'activité cynégétique, l'unique source de revenus sur laquelle s'appuie cette gestion multicritère.

Cette évolution conduit le forestier à envisager la diversification des systèmes de gestion, afin de mieux profiter de la dynamique spontanée des milieux naturels et de s'adapter plus finement à chaque contexte socio-économico-environnemental. Cependant, un choix d'aménagement doit reposer sur des critères permettant de qualifier l'état du peuplement à un instant donné et sur des indicateurs de l'évolution future du système, en particulier en ce qui concerne son renouvellement.

En système régulier, il est possible d'évaluer l'état du peuplement, à chaque instant, à partir de variables synthétiques à l'échelle du peuplement qui ont une signification sylvicole bien connue (hauteur dominante, surface terrière, densité). Ces variables, à l'aide de lois empiriques (loi de Eichhorn, loi d'auto-éclaircie) et de normes établies sur des peuplements de référence (tables de production, relations station-production) permettent d'orienter l'évolution du peuplement dans un cadre défini *a priori*.

En système irrégulier, ces variables de peuplement sont peu pertinentes. Les lois et les normes de la futaie régulière ne sont que rarement vérifiées, ou en tout cas leurs significations biologique et sylvicole ne sont pas bien connues. L'hétérogénéité intra-parcelle forte en ce qui concerne la composition spécifique, la structuration verticale du couvert et/ou la distribution spatiale des tiges oblige le gestionnaire à prendre explicitement en compte la variabilité au sein du peuplement. Il faut donc utiliser des variables de dispersion ou des histogrammes de répartition pour les différentes grandeurs caractéristiques (hauteur, diamètre, surface terrière). Selon la question posée, il est même

parfois nécessaire de recourir à la cartographie ou à une analyse spatiale détaillée. Pour certains systèmes irréguliers utilisés depuis longtemps, le forestier dispose d'outils méthodologiques pour contrôler l'état et l'évolution du peuplement. C'est en particulier le cas pour le système du taillis sous futaie (hétérogène par strates) avec l'utilisation d'une révolution pour la coupe du taillis et de seuils de recrutement lors de l'opération de balivage, ou pour la futaie jardinée de montagne dans des contextes forestiers bien définis (hêtraie-sapinière d'altitude par exemple) grâce à l'établissement de typologies de peuplements et à la mesure du flux de recrutement à l'aide d'indicateurs tels que le « passage à la futaie ». Mais les quelques systèmes bien connus empiriquement dans certaines situations précises ne sont pas forcément extrapolables tels quels à toutes les situations, en particulier lorsque l'on considère d'autres essences ou des stations clairement différentes. De plus, ils ne permettent pas obligatoirement de satisfaire aux objectifs fixés dans chaque contexte local. Il y a donc un besoin d'outils et de méthodes permettant de caractériser et de connaître l'évolution de peuplements forestiers hétérogènes (existants ou à venir), à la fois qualitativement et quantitativement. En particulier, le forestier recherche des critères robustes et applicables dans des situations relativement variées, permettant d'analyser et de conduire ces peuplements et de comparer différents scénarios envisagés dans une même situation.

En France, cette évolution progressive de la gestion forestière s'est accélérée depuis la tempête de décembre 1999, en particulier dans des régions très touchées comme la Lorraine. D'une part, une hétérogénéité de fait (sous la forme de trouées) a été introduite par la tempête dans nombre de peuplements gérés en futaie régulière, dont la gestion future devra tenir compte et savoir profiter. D'autre part, Celle-ci a rasé des parcelles voire des massifs complets, conduisant à se poser plus tôt que prévu la question de l'avenir sylvicole à leur donner.

Dans le cadre de cette démarche générale d'une meilleure caractérisation des forêts hétérogènes et de leur évolution, il est particulièrement important d'analyser comment l'état actuel d'un peuplement conditionne son devenir futur. Il faut donc étudier la relation entre la structure actuelle d'un peuplement et sa dynamique spontanée de régénération, afin de pouvoir déterminer les actions à mener pour maintenir en équilibre ou faire évoluer sa structure forestière dans la direction souhaitée, qui dépend des objectifs à court, moyen et long terme.

Une première approche consiste à analyser directement la relation entre structure du peuplement et structure de la régénération comme cela a par exemple été fait dans les travaux de *Catovsky et Bazzaz 2002*, *Figueroa-Rangel et Olvera-Vargas 2000a*, *Lookingbill et Zavala 2000*, *Murphy et al. 1999*, *Shelton et Murphy 1994*. Les études de ce type ont été conduites dans des peuplements d'essences variées (feuillus, résineux et mélanges) et de structures diverses, à l'aide de variables caractérisant le type de couvert de façon moyenne, d'analyses de la variabilité ou plus rarement de statistiques spatiales.

Une seconde approche, plus mécaniste, consiste à s'intéresser à l'effet de la structure du peuplement sur les différents facteurs du milieu qui conditionnent la dynamique de régénération (*Beckage et Clark 2003*, *Brang 1998*, *Catovsky et Bazzaz 2002*, *Collins et Battaglia 2002*, *Cornett et al. 1998*, *Figueroa-Rangel et Olvera-Vargas 2000b*, *Heinemann et al. 2000*, *Kuuluvainen et al. 1993*, *Madsen et Larsen 1997*, *Riegel et al. 1992*, *Siebel et Bouwma 1998*, *Wright et al. 1998*). Les principaux facteurs impliqués sont la disponibilité en eau, en éléments minéraux et organiques, en lumière ainsi que les conditions microclimatiques (tels la température et l'humidité de l'air) et la pression de la faune et des microorganismes. Ces différents facteurs dépendent, d'une part de la station (situation géographique, climat, topographie et sol) qui définit leur niveau potentiel et, d'autre part, de la structure du couvert forestier qui détermine leur niveau effectif en chaque point.

Parmi tous ces facteurs, la disponibilité en lumière a été particulièrement étudiée (*Ackerly et Bazzaz 1995, Canham 1988a, 1989, Collins et Battaglia 2002, Dai 1996, Emborg 1998, Kato et Yamamoto 2000, Madsen et Larsen 1997, Messier et al. 1999, Nicotra et al. 1999, Orwig et Abrams 1995, Poulson et Platt 1989, Siebel et Bouwma 1998, Van der Meer et al. 1998*). Celle-ci présente un certain nombre de propriétés qui en font un excellent indicateur synthétique de la relation entre structure du couvert et dynamique de régénération. Tout d'abord, l'éclairement est relativement aisé à quantifier. Le rayonnement est directement appréhendable par l'homme (dans le domaine visible), et peut être mesuré de façon fiable. D'ailleurs, depuis longtemps, le forestier intègre de façon empirique la notion de compétition entre arbres pour l'accès à la lumière dans la gestion courante. Qui plus est, la géométrie du rayonnement répond à des lois physiques bien connues qui rendent sa modélisation relativement accessible avec une bonne précision. De plus, la disponibilité en lumière présente une très grande variabilité en forêt, du fait de son interception plus ou moins importante par le peuplement et les conditions d'éclairement sous couvert sont directement liées à la structure géométrique du peuplement. L'hétérogénéité d'un peuplement forestier s'exprime donc fortement à travers la variabilité de la disponibilité en lumière. Enfin la lumière est la source d'énergie de la photosynthèse, moteur du développement des plantes et donc de la régénération forestière. La connaissance du niveau d'éclairement permet ainsi d'expliquer une part importante de la dynamique végétale. La variabilité de la disponibilité en lumière induite par l'hétérogénéité du peuplement apparaît donc pertinente pour l'analyse de la régénération.

Pour ce travail, nous nous placerons dans le cadre de la seconde approche, en considérant la disponibilité en lumière comme un indicateur synthétique de l'influence de la structure du couvert sur la dynamique de régénération. Cette thèse consistera en l'analyse de l'influence de la structure du peuplement forestier sur la distribution de l'éclairement sous couvert. Nous n'aborderons pas l'analyse de la régénération à l'aide de ce critère, qui constitue un travail relativement indépendant du fait du découplage entre structure du peuplement et régénération, celui-ci étant rendu possible par l'utilisation de la lumière comme intermédiaire.

Il s'agit donc pour nous de déterminer de quelle façon la structuration d'un peuplement conditionne la distribution de l'éclairement sous couvert. Cette relation peut être abordée de façon analytique, en caractérisant séparément la structure du peuplement et la distribution de l'éclairement, puis en étudiant statistiquement comment elles sont reliées entre elles. Cette approche a été utilisée dans des contextes réguliers pour expliquer l'éclairement moyen à partir d'une caractérisation du peuplement à l'échelle de la parcelle (*Comeau 2000, Hale 2003, Parker et al. 2002, Sonohat et al. 2004*), et dans des forêts présentant un degré d'hétérogénéité plus ou moins marqué pour l'analyse de la distribution spatiale de l'éclairement (*Bebber et al. 2002, Canham et al. 1990, Comeau et Heineman 2003, Montgomery et Chazdon 2001, Parker et al. 2002, Ross et Sulev 2000, Van Pelt et Franklin 2000, Weiss 2000*). Cependant il est également possible de prendre en compte la relation fonctionnelle qui lie la distribution de l'éclairement à la structure du peuplement. Cette seconde approche passe par une modélisation explicite de l'interception du rayonnement par le couvert. Elle se traduit en général par l'utilisation de modèle de lumière (ou modèles de transfert radiatif) qui représentent le peuplement de façon géométrique afin de simuler l'interception du rayonnement incident provenant des différentes directions de l'hémisphère céleste, pour une localisation et une période de temps données. Nous nous inscrirons dans cette démarche, qui du fait de la diversité des modèles proposés et la capacité de certains d'entre eux à prendre en compte des structures forestières complexes, permet d'envisager son application à de nombreux contextes de forêts hétérogènes.

Cependant plus un modèle permet de décrire une géométrie complexe du couvert, plus il nécessite de données pour l'alimenter. L'utilisation des modèles de lumière en peuplement présentant une forte hétérogénéité implique donc une description détaillée du couvert forestier. Cette contrainte

limite fortement les possibilités d'utilisation de ces outils dans des contextes de gestion ou même pour une démarche de recherche appliquée. Pour cette raison, ce travail se fixe comme objectif principal de répondre à la question suivante :

Jusqu'à quel point et comment est-il possible de réduire le jeu de données nécessaire à l'alimentation de modèles de lumière, dans le cadre de leur utilisation en forêt fortement hétérogène, pour la simulation de la distribution de l'éclairement sous couvert ? Plus précisément nous souhaitons avoir une simulation de la distribution de l'éclairement non biaisée à l'échelle spatiale de la parcelle, pour la durée de la saison de végétation. Ce niveau d'analyse correspond en effet à celui considéré en gestion. En particulier nous chercherons à réduire au maximum la caractérisation des houppiers, lourde à mettre œuvre, et plus généralement à se limiter à des données d'inventaire couramment utilisées par le forestier (diamètre, essence et position des arbres).

Nous choisirons donc, parmi les nombreux modèles de lumière proposés dans la littérature, un qui soit adapté à la simulation de la distribution de l'éclairement en forêt hétérogène. Nous l'alimenterons avec un jeu de données complet afin d'obtenir une référence correspondant à la description détaillée du peuplement. Ensuite nous testerons l'effet de la réduction de ce jeu de données sur la qualité de simulation de l'éclairement, pour déterminer quel niveau minimal de description de la structure du peuplement minimal est nécessaire pour obtenir une caractérisation non biaisée de l'éclairement et de sa variabilité à l'échelle de la parcelle sur la saison de végétation.

Étant donné qu'il nous faudra réaliser une description détaillée de la géométrie du peuplement, très coûteuse en temps de mesure, nous nous limiterons à l'analyse d'un unique peuplement. Cependant, sur une faible surface totale, nous chercherons à maximiser la variabilité des conditions d'éclairement et de la structure du couvert, afin de pouvoir prendre en compte de façon poussée les effets de l'hétérogénéité du peuplement.

Au **chapitre I**, nous aborderons en détail la démarche que nous avons adoptée pour choisir un peuplement hétérogène et mettre en place un dispositif qui nous permette de répondre à la problématique énoncée.

Au **chapitre II**, nous présenterons les méthodes de caractérisation de l'éclairement sous couvert. Plus précisément nous ferons une revue des modèles présentés dans la littérature, afin de déterminer lequel paraît le plus adapté à notre objectif. Cette analyse aboutira au choix d'un modèle, tRAYci (*Brunner 1998*), que nous décrirons en détail. Ensuite, nous proposerons un calibrage et une validation de ce modèle, de façon à obtenir une simulation de référence de la distribution de l'éclairement, réalisée avec l'ensemble des données récoltées.

Au **chapitre III**, nous ferons une analyse détaillée de la structure du peuplement choisi à l'échelle du couvert et de l'arbre individuel. Cela nous permettra de poser les bases d'une réduction du jeu de données nécessaire à l'alimentation du modèle de lumière, en particulier par l'établissement de relations statistiques entre les principales caractéristiques du houppier et le diamètre à 1,30 m des arbres.

Au **chapitre IV**, nous proposerons des méthodes de reconstitution du peuplement à partir d'un jeu de données partiel sur les arbres (essence, diamètre à 1,30 m, et position) et des relations établies au chapitre III. Nous évaluerons ces méthodes en terme de réalisme géométrique du peuplement obtenu, mais surtout du point de vue de la qualité des simulations de la distribution de l'éclairement obtenues. Ainsi nous pourrions déterminer le niveau de réduction de la description du peuplement qu'il est possible d'envisager sans compromettre la validité de la simulation des conditions d'éclairement à l'échelle choisie.

Enfin au **chapitre V**, nous tenterons de déterminer s'il est possible de se passer de la modélisation explicite de l'interception du rayonnement par le couvert. Ainsi nous testerons si des indices dendrométriques simples, calculés localement permettent d'obtenir une description non biaisée de la distribution de l'éclairement à l'échelle de la parcelle.

Chapitre I : Présentation du dispositif expérimental

A. Contexte général de l'étude

Le dispositif mis en place avait pour but de fournir un peuplement permettant d'analyser la relation entre structure du couvert et éclairage relatif, par l'utilisation du modèle de lumière tRAYci, conformément aux objectifs énoncés précédemment. Cependant ce dispositif correspond à un choix d'équipe plus étendu que la problématique spécifique de la thèse. Ce dispositif a ainsi également pour vocation à plus long terme d'étudier comment la modélisation de l'éclairage sous couvert peut permettre d'analyser la dynamique de régénération. Ce deuxième aspect sort du cadre de ce travail de thèse. Cependant les contraintes qui ont prévalu au choix du dispositif tiennent compte conjointement des deux problématiques.

Du point de vue de nos objectifs propres, concernant la relation structure-éclairage, nous souhaitions un peuplement présentant plusieurs niveaux d'hétérogénéité, à savoir un mélange d'essences, une structuration verticale, et une hétérogénéité de fermeture du couvert (trouées). L'objectif était ainsi de tester le modèle de lumière et d'évaluer notre approche de reconstruction du couvert dans un contexte complexe. Pour proposer une analyse robuste, il fallait également échantillonner l'ensemble de la gamme possible pour l'éclairage relatif. De plus, de par l'utilisation du modèle et du nombre conséquent de mesures nécessaires pour l'alimenter, nous avions certaines contraintes techniques : minimiser les déplacements, éviter un effet supplémentaire de la topographie et surtout limiter au maximum la surface d'analyse.

Du point de vue des objectifs concernant la régénération, il s'agit d'étudier la croissance en compétition de semis établis. Un intérêt particulier est porté à l'influence de l'éclairage sur le mélange d'essences. Pour détecter d'éventuels seuils, il fallait là encore échantillonner une gamme d'éclairage la plus large possible. De plus, l'étude ayant pour objet la dynamique spontanée de régénération, il fallait éviter qu'il y ait eu des travaux sylvicoles dans le passé proche. Enfin, pour ne pas avoir d'effets parasites, il était nécessaire que la station soit relativement homogène. Il fallait aussi éviter de se placer dans un contexte où un autre facteur que la lumière serait fortement limitant.

B. Choix du dispositif

Nous avons fixé un certain nombre de contraintes pour le choix du dispositif, afin de répondre au mieux à la double problématique posée.

Contraintes sur le peuplement :

- Afin d'envisager de la façon la plus complète possible l'hétérogénéité de la structure du couvert, nous souhaitions un peuplement feuillu à la fois mélangé en essences et présentant aussi une hétérogénéité verticale et horizontale.
- Afin de maximiser la variabilité de l'éclairage, nous souhaitions que le peuplement contienne à la fois des zones fermées et des trouées de petite, moyenne et grande taille (ou

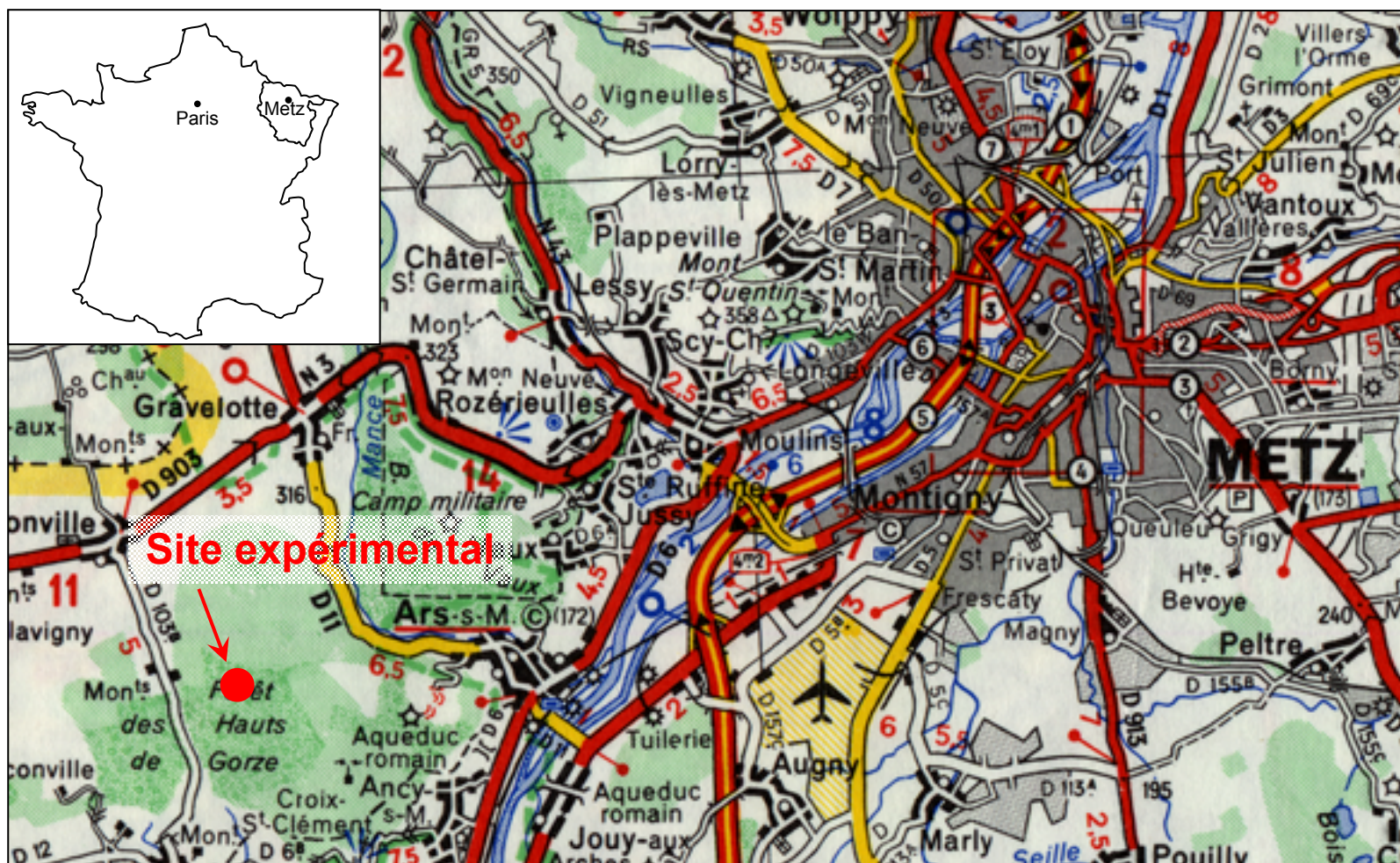


Figure 1 : Carte de localisation du dispositif expérimental (source : Atlas routier ; France ; Michelin).

éventuellement des lisières). En particulier nous souhaitons que les très faibles éclaircissements et le plein découvert soient représentés. La recherche de trouées plutôt que de peuplements plus ou moins denses avait pour but de garantir des gradients d'éclaircissements balayant toute la gamme.

- Afin d'éviter les difficultés d'estimation des conditions de croissance passées, nous souhaitons qu'il n'y ait pas ou peu eu d'éclaircies depuis l'apparition de la régénération.

Contraintes sur la régénération :

- Dans le contexte de forêt hétérogène feuillue, il était souhaitable d'avoir également un mélange d'essences dans la régénération.
- Nous cherchions des régénérations établies où la phase de croissance en compétition avait commencé mais n'était pas terminée.
- Pour étudier la dynamique spontanée de la régénération naturelle, nous souhaitons qu'il n'y ait pas eu de travaux dans la régénération (avec une tolérance pour d'éventuels cloisonnements).

Contraintes sur la station :

- Il fallait une station homogène, en particulier en ce qui concerne le sol.
- Nous souhaitons éviter les situations trop extrêmes : très limitantes (stations très sèches ou très engorgées) ou très favorables, afin d'évaluer dans de bonnes conditions le caractère synthétique de la disponibilité en lumière pour l'analyse de la régénération.
- Pour les mêmes raisons nous souhaitons éviter les zones où la pression du gibier est trop importante.

Contraintes liées à l'utilisation du modèle de lumière :

- Étant donné la grande quantité de mesures nécessaires sur les arbres et leurs houppiers pour alimenter le modèle de lumière choisi (tRAYci), il fallait minimiser la surface totale d'étude, et donc tenter de trouver des trouées de tailles différentes sur une surface minimum, sans pour autant qu'elles soient trop proches les unes des autres afin d'avoir des gradients d'éclaircissement complets.
- Afin de faciliter la modélisation de l'éclaircissement, il était souhaitable de se situer en zone plane ou peu pentue.
- Étant donné le grand nombre de déplacements impliqués par les nombreuses mesures nécessaires, il était souhaitable de minimiser la distance entre le dispositif et le centre de recherche.

C. Site retenu

1. Informations générales

Le site se situe en Moselle (57), sur la commune d'Ars-sur-Moselle, près de Metz (voir **figure 1**). Un plan d'accès est fourni en **annexe 1**. Ses coordonnées sont 49°04'40N pour la latitude, 6°01'02E pour la longitude et environ 300 m au dessus du niveau de la mer pour l'altitude. Cela correspond environ, en système Lambert II étendu, aux coordonnées X = 869000 m et Y = 2459600 m. Le dispositif est situé sur le plateau calcaire de la côte de Moselle. Les données météorologiques de la station proche de Metz-Augny (altitude 189,9 m) indiquent une température moyenne annuelle de 10,1°C et une hauteur annuelle de précipitations de 745 mm (données complètes en **annexe 2**). La carte géologique (**figure 2**, extrait de la notice géologique en **annexe 3**) indique une roche mère de calcaire à oolithes (J1c) relativement homogène sur le site.

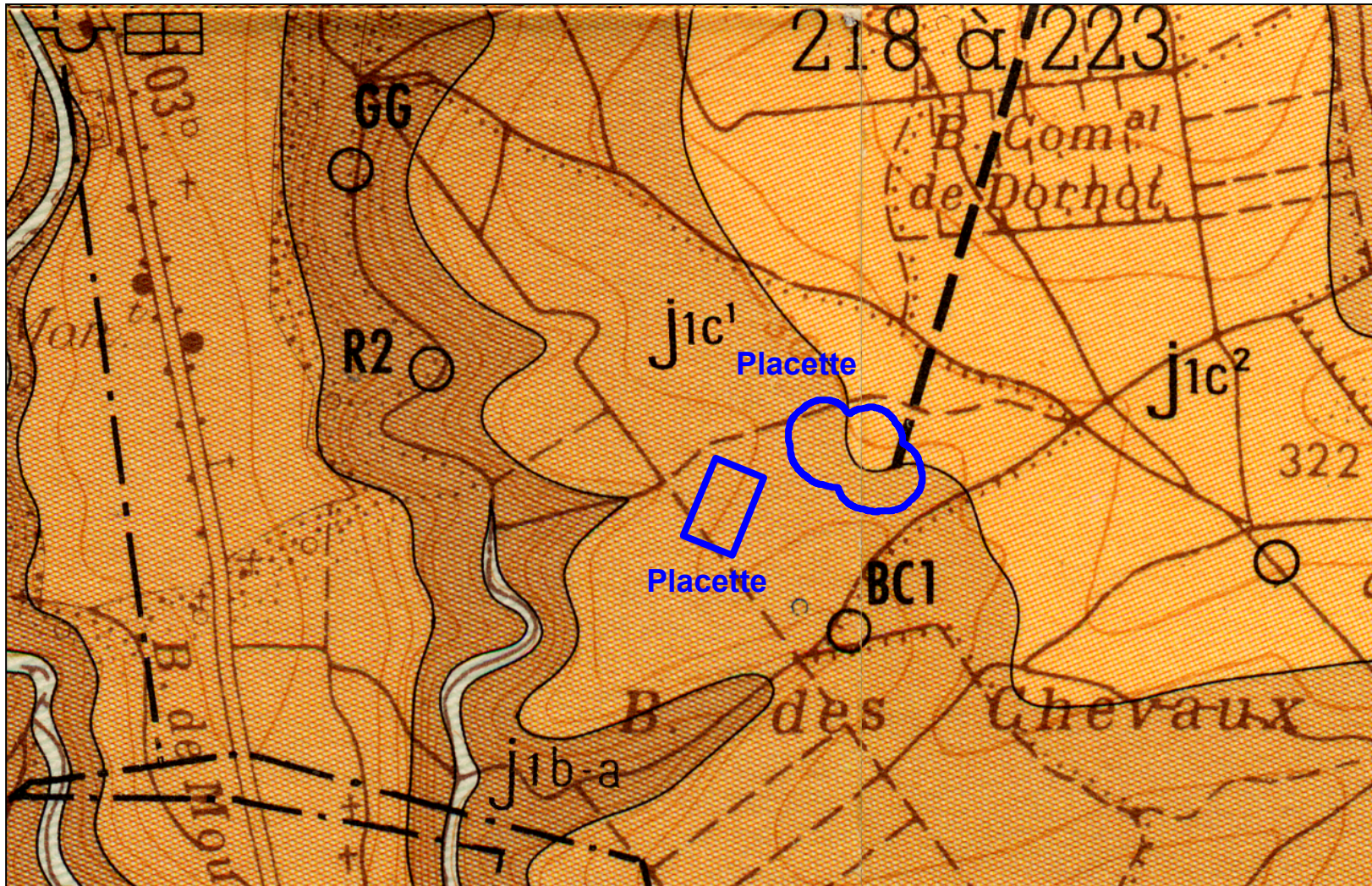


Figure 2 : Extrait de la carte géologique de Chambley (source : Service de la carte Géologique de la France, Ministère de l'industrie).

Le peuplement est un ancien taillis sous futaie sur plateau calcaire, en forêt domaniale du Graoully (parcelles 37 et 38). L'ancienne gestion en taillis sous futaie a conduit à une assez grande variabilité en hauteur et en diamètre des arbres. Dans la typologie des peuplements feuillus des plateaux calcaires de Lorraine (*Bachelet et Lanter 2004*), ce peuplement (pour les deux zones) correspond au type 21, « à Bois Moyens avec Petits Bois », avec une classe 5 pour le capital sur pied (surface terrière supérieure à 25 m²/ha). Les essences représentées sont nombreuses : principalement hêtre, chêne, érable sycomore et érable plane pour les réserves, charme, érable champêtre, tilleul, alisier torminal et alisier blanc pour le taillis. La **figure 3** montre la répartition en diamètre des différentes essences. Des trouées de tailles variables ont été créées par une tempête en 1989. La tempête de 1999 a peu affecté la zone. Le peuplement n'a subi que quelques très faibles prélèvements depuis 1989. Aucun travaux n'a été réalisé dans la régénération – principalement à base de hêtre, d'érable sycomore et d'érable plane ainsi que des semis plus dispersés des autres essences – qui s'est développée dans les trouées depuis 1989.

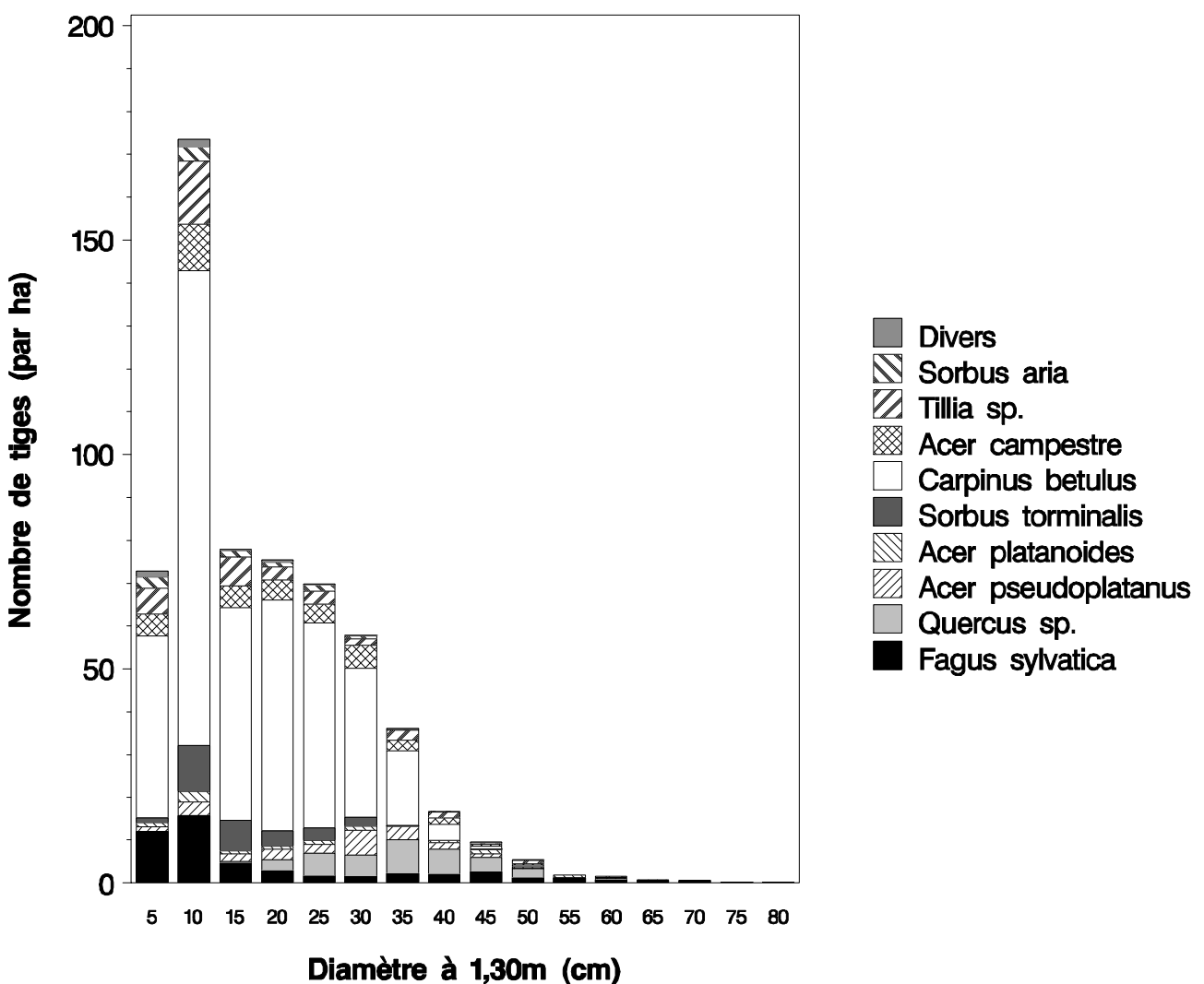


Figure 3 : Histogramme des diamètres, par essence des arbres du dispositif. Réalisée à partir des données mesurées dans la thèse.

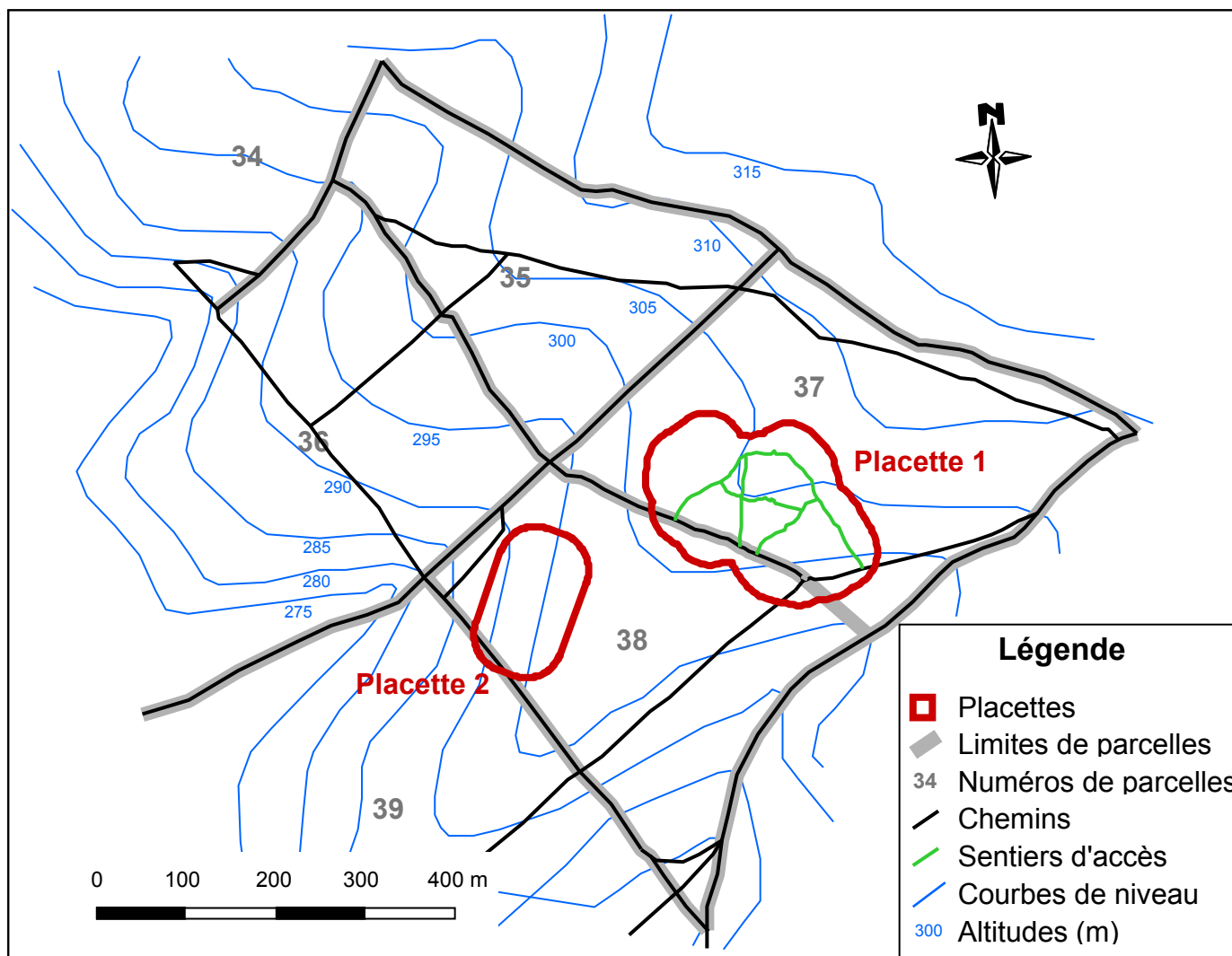


Figure 4 : Contour des placettes, courbes de niveaux, limites de parcelles et chemins d'accès.

2. Délimitation des placettes

Les contraintes fixées pour régénération et le peuplement étaient bien respectées sur les deux parcelles choisies. Nous avons choisi la position exacte des placettes d'étude de façon à satisfaire les contraintes issues de l'utilisation du modèle de lumière, à savoir une topographie globalement plane et une minimisation de la surface, tout en maximisant la variabilité des conditions d'éclairément.

Pour cela, nous avons mis en place un SIG (Système d'Information Géographique, à l'aide du logiciel Géoconcept). Tous les chemins et toutes les limites des parcelles contenant le dispositif et des parcelles avoisinantes ont été localisés par parcours linéaire au GPS (Global Positioning System) et implantés dans le SIG (**figure 4**). Au sein du SIG ont également été importées les photographies aériennes ortho rectifiées représentant le site pour les années 1989 (infrarouge couleur issues de l'IGN, Institut National de Géographie), 1994 (visible couleur, IGN) et 2001 (infrarouge couleur issue de l'IFN, Inventaire Forestier National, **figure 5**). Il faut noter que les chemins localisés étaient correctement positionnés vis-à-vis de la photographie aérienne 2001, qui est la seule à avoir été ortho rectifiée et numérisée directement par l'IFN (et donc avec une meilleure précision, que les autres que nous avons fait ortho rectifier par la société Aéroscan à partir des tirages papier). Nous avons également importé la carte IGN correspondante (**annexe 4**), à partir de laquelle nous avons digitalisé les courbes de niveau et construit un MNT (Modèle Numérique de Terrain, définissant l'altitude en tout point). La carte géologique a également été importée dans le SIG.

A partir de la photographie aérienne de 2001, nous avons délimité, sous SIG, les contours apparents de toutes les trouées visibles sur les deux parcelles. A partir de cela et de la topographie indiquée par les courbes de niveau, nous avons délimité deux parcelles permettant de regrouper, sur une surface minimale, des trouées de tailles différentes en topographie relativement plane. Il y avait cependant une légère pente vers le Sud-Ouest, plus marquée en placette 2 (**figure 4**). Nous avons validé le choix par des visites sur le terrain. Les trouées de la placette 1 ont également été délimitées au GPS sur le terrain pour s'assurer de la concordance des trouées sur le terrain et dans le SIG.

La placette 1 (au Nord) contient des trouées de petite surface, jusqu'à 20 ares. La placette 2 (au Sud) inclut une partie d'une grande trouée de plus de 50 ares et un peuplement fermé qui constitue l'une des lisières de cette trouée. Il n'a pas été possible de trouver, dans les mêmes conditions, de trouées de taille intermédiaire, ce qui aurait pourtant permis de mieux représenter les éclairéments moyens. Ces éclairéments seront donc uniquement représentés en bordure de la grande trouée en placette 2. Les trouées de la placette 1 sont relativement espacées les unes des autres, ménageant entre elles des surfaces conséquentes de peuplements complètement fermés. Dans la placette 2, le peuplement considéré, en lisière de la grande trouée, est également complètement fermé. De même la placette 2 a été placée suffisamment loin de la placette 1 pour que celle-ci ne subisse pas l'influence de la grande trouée. Pour cette raison il n'a pas été possible de faire une seule placette regroupant toutes les trouées. Cependant les deux placettes sont suffisamment proches pour que les conditions de station soient semblables. La distance entre les centres des deux placettes est d'environ 270 m.

Un réseau de sentiers d'accès a été délimité sur le terrain, sur la placette 1, afin d'accéder aux différentes trouées tout en maîtrisant le piétinement (**figure 4**). Ces sentiers ont été localisés au GPS et implantés sous SIG. La forme et la petite taille de la placette 2 ont rendu inutile l'implantation de sentiers.

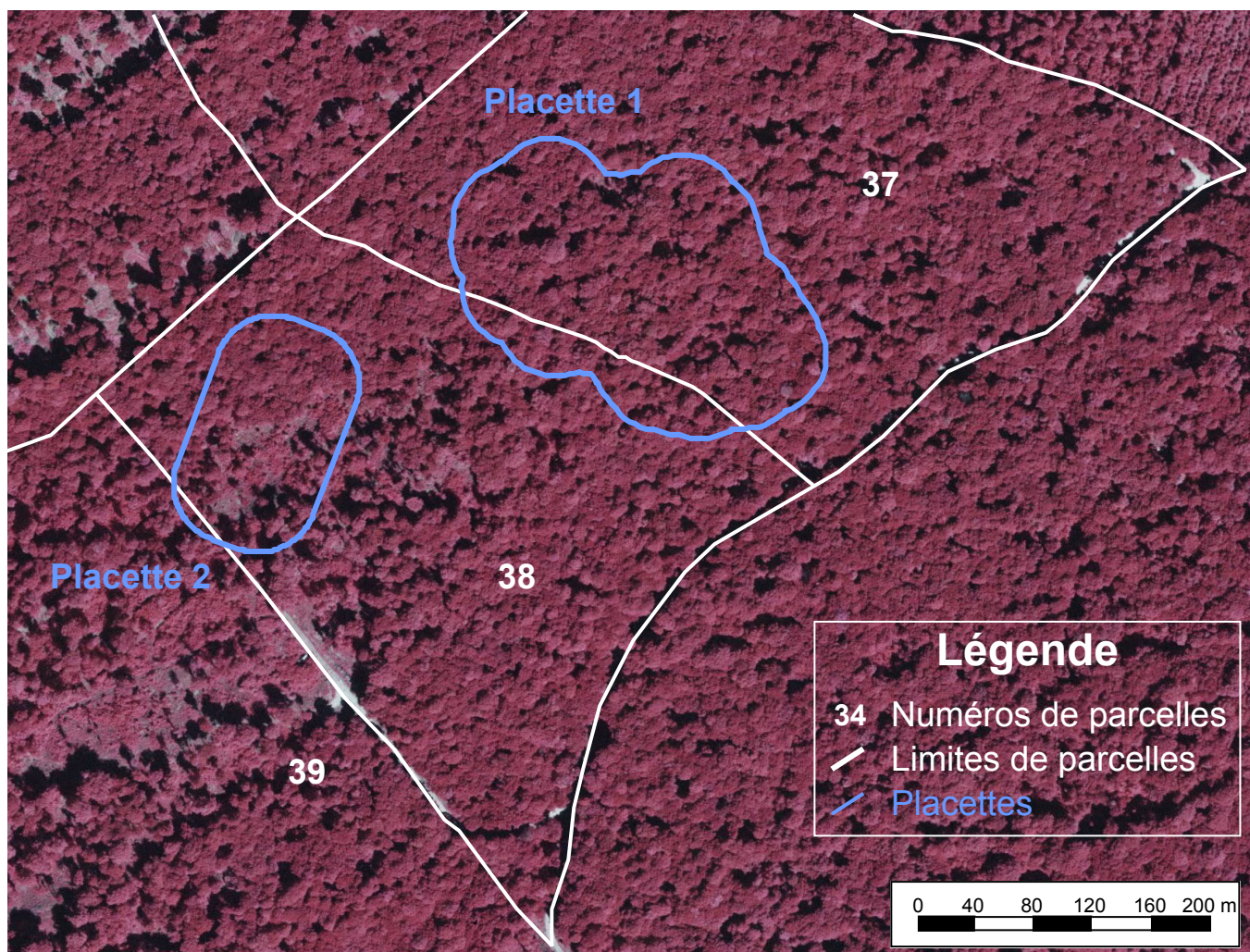


Figure 5 : Photographie aérienne en émulsion infrarouge couleur, 2001 (source Inventaire Forestier National). Les houppiers apparaissent en teintes rouges. Les trouées sont en général repérables par des zones sombres. Les limites des parcelles et des placettes ont été surimposées.

D. Stratégie d'échantillonnage

1. Caractérisation du peuplement

a. *Les zones d'étude*

Pour chaque placette nous avons défini une zone d'étude centrale, de façon à ce qu'elle contienne au sein d'une surface minimale, les trouées repérées et une certaine épaisseur du peuplement attenant, ainsi que des zones de peuplement fermé conséquentes. C'est dans les zones d'étude que seront réalisées les analyses. Pour la placette 1, la zone d'étude contient principalement 6 trouées identifiées (**figure 6**) issues de la tempête de 1989 : trois trouées d'une surface inférieure à 5 ares, deux trouées d'une surface comprise entre 5 et 8 ares et une d'un peu moins de 20 ares (en utilisant pour chaque trouée le contour délimité par les troncs des arbres lisières). Cette dernière trouée inclut quelques arbres isolés de l'étage dominant. Entre les trouées identifiées, la surface est occupée par le peuplement fermé (représentant environ 50% de la surface de la zone d'étude) et par deux autres trouées de 1,5 et 4,5 ares, cette dernière étant issue de la tempête de 1999. La zone d'étude de la placette 2 est composée pour moitié d'un peuplement fermé et pour moitié d'une partie d'une grande trouée de plus de 50 ares. La bordure du peuplement divise la placette selon un axe Ouest-Sud-Ouest / Est-Nord-Est.

Dans les zones d'étude tous les arbres d'un diamètre à 1,30 m supérieur à 5 cm ont été mesurés : caractérisation des troncs (position, essence, diamètre à 1,30 m) et caractérisation des houppiers (position, hauteur totale, hauteur de base de houppier, hauteur de plus grande largeur de houppier et contour de la projection au sol).

Il faut noter que le modèle tRAYci de simulation de l'éclairement, que nous avons utilisé, est alimenté par la description géométrique des arbres individuellement et non par la celle des trouées. Ainsi nous avons utilisé le concept de trouée uniquement pour choisir les zones d'étude et nous repérer. Nous avons ci-dessus délimité les trouées par le contour des troncs de bordure. Cette définition est arbitraire, difficile à appliquer de façon systématique (choix des arbres contour) et n'est pas forcément adaptée à l'étude de l'éclairement. Cependant ce choix n'a pas de conséquence scientifique pour la thèse, puisque le concept de trouée ne sera pas utilisé dans les analyses, si ce n'est pour le repérage.

b. *Les zones tampon*

La caractérisation du peuplement sera principalement utilisée pour simuler l'éclairement dans les zones d'étude. L'éclairement en un point est conditionné par les obstacles à la lumière (le couvert en l'occurrence) présents dans toutes les directions de l'hémisphère céleste. L'influence d'un obstacle d'une taille donnée est d'autant plus grande qu'il est proche du point de simulation, par simple effet de projection. Autrement dit, un arbre situé à 5 m d'un point aura beaucoup plus d'influence sur la valeur de l'éclairement en ce point que s'il était situé à 20 m car, selon sa position, sa projection sur l'hémisphère céleste sera différente. D'autre part, plus l'éloignement augmente, plus le nombre d'arbres impliqués dans l'interception du rayonnement provenant d'une même direction est grand. Ainsi près des points de simulation de l'éclairement, il y a relativement peu d'arbres mais il est nécessaire de décrire leur géométrie avec précision car ils ont un impact important sur l'interception de l'éclairement. Plus la distance depuis les points de simulation de l'éclairement augmente, plus le nombre d'arbres à prendre en compte est grand, mais plus la

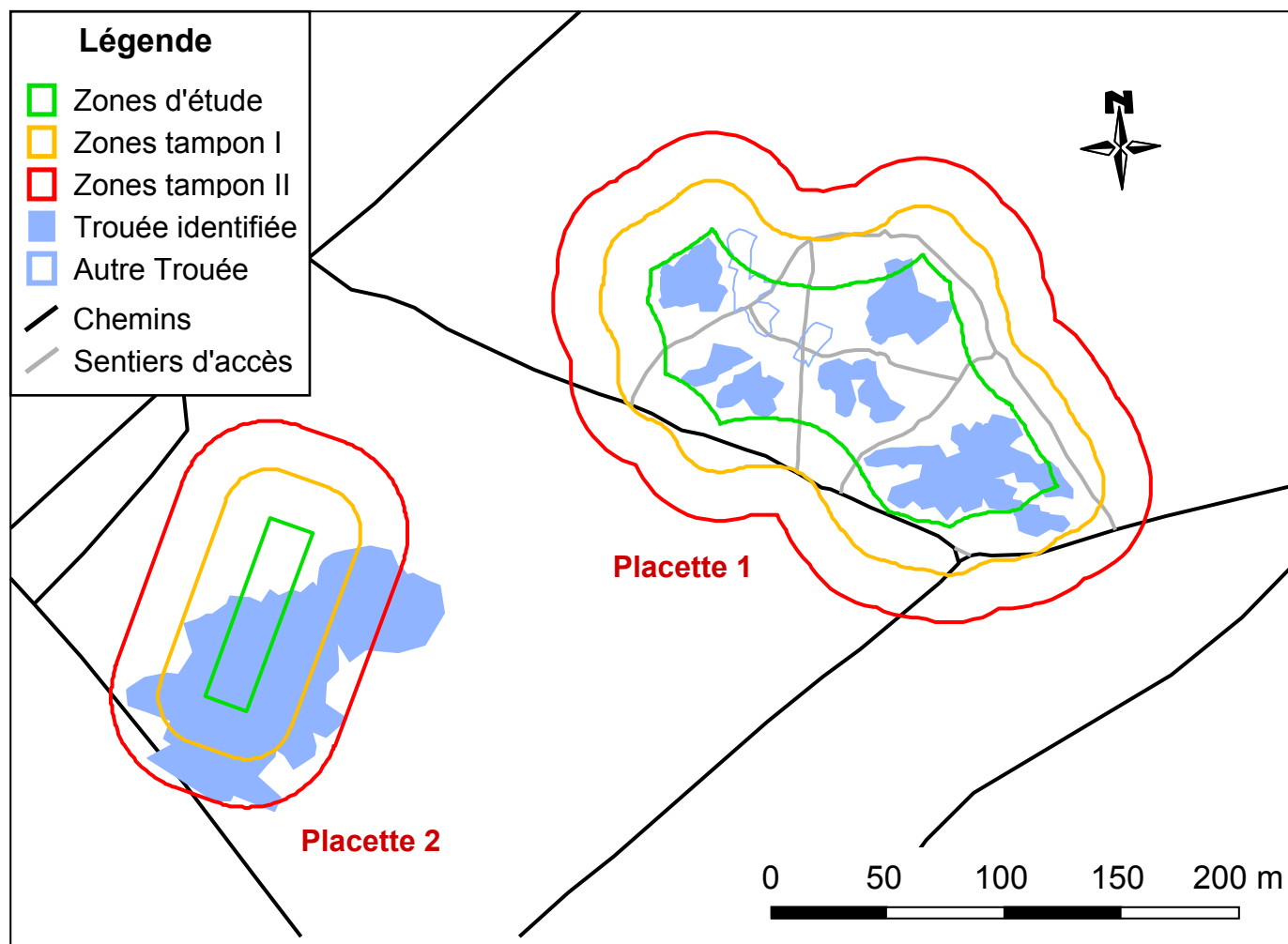


Figure 6 : Contour des placettes et des différentes zones de mesure. Les trouées des zones d'étude sont matérialisées.

précision requise pour la description de chaque arbre est faible. Pour pouvoir simuler l'éclairement sur l'ensemble des zones d'études – y compris les points périphériques – nous avons donc mis en place un premier niveau de zones tampon (zones tampon I) d'une épaisseur de 20 m, où les troncs et les houppiers sont mesurés de la même façon que dans les zones d'étude, mais où l'éclairement n'est pas simulé. Au-delà d'une certaine distance, la précision nécessaire pour la description des arbres diminue, nous avons donc défini un second niveau de zones tampon (zones tampon II), également d'une épaisseur de 20 m, où le couvert sera décrit plus sommairement : seule la caractérisation des troncs a été réalisée. Les données de caractérisation des houppiers dans les zones tampon II seront reconstituées à partir des données obtenues sur les arbres complètement mesurés, dans les zones d'étude et tampon I. Chaque placette est donc constituée d'une zone d'étude centrale, entourée d'une zone tampon I, elle-même entourée d'une zone tampon II (**figure 6**). Autour des deux placettes, un peuplement fermé virtuel sera implanté – à partir des données obtenues dans les zones d'étude et tampon I – afin de gérer les effets des arbres éloignés sur l'éclairement des zones d'étude. A cette distance, seules les grandes trouées peuvent avoir une influence significative. La photographie aérienne de 2001 sera donc utilisée pour recréer, dans le peuplement virtuel, les grandes trouées qui existent dans le peuplement réel.

La surface totale des placettes 1 et 2 est respectivement de 3,58 et 1,44 ha. Si nous enlevons les zones tampon II, nous obtenons respectivement 2,22 et 0,67 ha. Les zones d'études centrales des placettes 1 et 2 ont des surfaces respectives de 1,11 et 0,15 ha.

L'épaisseur choisie pour les zones tampon – soit 20 m, ce qui correspond approximativement à la hauteur moyenne du peuplement – permet de limiter la quantité de mesures à réaliser, tout en ayant une bonne précision dans la simulation de l'éclairement. La **figure 7** permet de le vérifier.

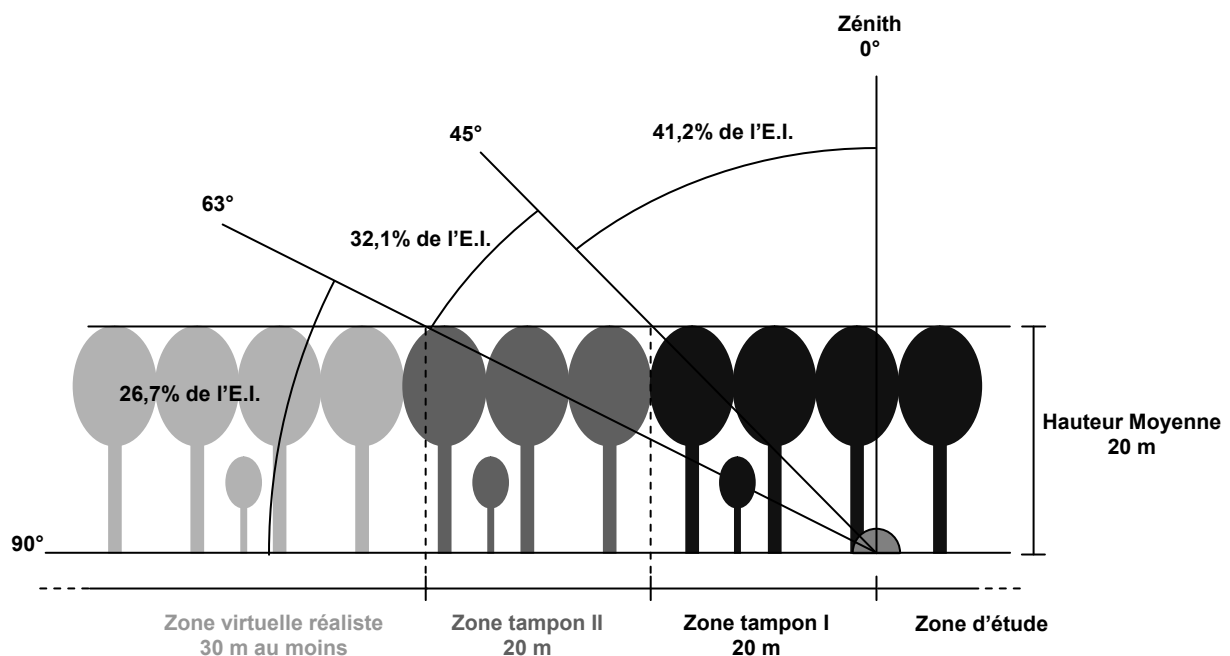


Figure 7 : Relation entre la taille des zones tampon successives et l'éclairement incident (E.I.), provenant des différentes directions de l'hémisphère céleste, délimitées par l'angle depuis le zénith. Le peuplement est représenté de façon schématique afin de visualiser l'impact du peuplement sur l'interception de l'éclairement incident. Les valeurs d'éclairement incident ont été calculées en utilisant le même algorithme que le modèle tRAYci, sur la période 1^{er} mai – 31 octobre, avec la latitude du site, une distribution SOC ($b = 1,23$), une proportion de diffus $P_{diff} = 0,5$ et une correction cosinus désactivée (pour plus d'information sur ces paramètres on pourra se référer à la description du modèle tRAYci au chapitre II).

Considérons l'éclairement incident provenant de l'hémisphère céleste en fonction de l'angle zénithal, c'est-à-dire l'angle depuis le zénith. En partant d'un point de simulation de l'éclairement situé en limite de la zone d'étude (situation la moins favorable), la hauteur moyenne du peuplement (20 m) correspond, à 20 m de distance (c'est-à-dire à la limite de la zone tampon I), à un angle de 45° depuis le zénith. De même la hauteur moyenne du peuplement correspond à 40 m de distance – c'est-à-dire à la limite de la zone tampon II – à un angle de 63° environ depuis le zénith. Les deux portions de l'hémisphère céleste ainsi définies fournissent respectivement 41,2 % et 32,1 % de l'éclairement incident total. Nous constatons ainsi que les arbres complètement mesurés déterminent à eux seuls 41,2 % de l'éclairement. Mais ces arbres, s'ils existent, prélèvent également une bonne partie des 32,1 % suivant. Dans le cas le moins favorable (pas d'arbre en zone tampon I), les 32,1% de l'éclairement, provenant des angles 45°-63°, n'impliquent que des arbres de la zone tampon II. Même si ces arbres sont décrits plus sommairement, ils sont également beaucoup plus nombreux et interceptent individuellement une part beaucoup plus faible de l'éclairement. Au total les arbres mesurés totalement ou partiellement permettent donc de gérer environ 73,3 % de l'éclairement relatif. Les 26,7 % restant sont interceptés par le peuplement virtuel implanté autour des placettes. Étant donné le nombre d'arbres impliqués et la distance depuis la zone d'étude, le niveau de détail de représentation du couvert (peuplement totalement reconstitué, avec des trouées recrées à partir de la photographie aérienne) semble largement suffisant pour permettre de gérer cette faible part de d'éclairement restant. Il faut noter que quelques arbres sur-dominants (généralement des hêtres) excèdent nettement la hauteur dominante (jusqu'à 25-27 m). Ils ont donc une influence lointaine plus forte qu'indiquée précédemment. Pour pallier ce problème, les rares arbres (trois ou quatre en tout) sur-dominants proches des bords des zones tampon I (jusqu'à 5-10 m dans la zone tampon II) ont également été mesurés complètement (comme en zone tampon I).

2. Caractérisation de la régénération

Conformément à la seconde partie de la problématique du dispositif, il s'agissait d'établir un échantillonnage permettant d'étudier la dynamique de la régénération en fonction de l'éclairement. Sur l'ensemble du dispositif la régénération s'est développée au sein des trouées créées par la tempête de 1989. Afin de pouvoir analyser le résultat des interactions au sein de la strate de régénération en fonction de l'éclairement, nous avons fixé comme échelle d'analyse le collectif de régénération. L'implantation de placeaux de régénération permettant l'analyse de ces collectifs (composition, densité et relations de dominance en hauteur et diamètre des semis) constitue l'échantillonnage principal de la partie régénération. Ce premier échantillonnage a été complété par un second (destructif) plus restreint permettant une analyse rétrospective détaillée de la croissance des deux espèces prédominantes de la régénération (hêtre et érable sycomore).

Deux échantillonnages indépendants ont été mis en place dans les zones d'étude des deux placettes :

- Un réseau de placeaux d'analyse non destructive de la régénération, à l'échelle de petits collectifs.
- Le prélèvement de semis individuels de hêtre et d'érable sycomore, pour l'analyse rétrospective de leur croissance et l'estimation de leur âge.

a. Placeaux de régénération

Nous avons cherché à échantillonner des situations de régénération sur une gamme d'éclairement la plus étendue possible. Pour ce faire nous avons utilisé une double approche de positionnement de placeaux d'analyse de la régénération :

- Un réseau de transects dans les trouées identifiées sur les zones d'étude des deux placettes, afin de bien analyser les gradients d'éclairement.
- Une maille systématique mise en place sur l'intégralité de la zone d'étude de la placette 1, afin de bien échantillonner les conditions hors transects, en particulier sous couvert fermé.

Les placeaux sont des carrés de 2 m de coté. Une description détaillée des placeaux de régénération est donnée en **annexe 5**.

Dans les deux cas nous avons décidé de réserver, a priori, entre un quart et un tiers des placeaux à la validation des analyses réalisées sur le reste des données. Il y a donc des placeaux d'analyse, dont l'objet sera d'établir les relations statistiques, et des placeaux de validation pour vérifier la robustesse des relations établies.

Mise en place des transects

Afin de bien échantillonner les gradients d'éclairement nous avons choisi d'avoir des placeaux assez rapprochés sur les transects et un écart de 4 m entre les centres de deux placeaux successifs d'un transect, soit 2 m de bord à bord.

En placette 2, quatre transects parallèles (dont 1 de validation) vont du peuplement fermé jusqu'au centre de la grande trouée, s'étendant sur toute la longueur de la surface d'étude. Ces transects ont été établis selon l'axe Sud-Sud-Ouest / Nord-Nord-Est (azimuts 225 gr et 25 gr), c'est-à-dire perpendiculairement à la lisière du peuplement fermé, afin d'obtenir un fort gradient des conditions d'éclairement.

En placette 1, les transects ont été disposés dans les six trouées identifiées. Pour chaque trouée, trois transects ont été mis en place :

- Un premier selon l'axe Sud-Sud-Ouest / Nord-Nord-Est (azimuts 225 gr et 25 gr), c'est-à-dire dans la même direction qu'en placette 2,
- Un second, perpendiculaire au premier, selon l'axe Ouest-Nord-Ouest / Est-Sud-Est (azimuts 325 gr et 125 gr),
- Un troisième dans l'une des deux diagonales (75-275 gr ou 175-375 gr), choisie au hasard.

Les deux premiers transects sont des transects d'analyse. Le troisième est un transect de validation. Les transects ont été prolongés pour chaque trouée au-delà des lisières afin d'obtenir les faibles éclaircissements pour chaque gradient. Ces prolongements étaient accentués du côté Nord des trouées, c'est-à-dire en exposition Sud, où la portée d'influence de la trouée est plus importante. Nous tentions également de positionner le point d'intersection des transects d'une même trouée, près du barycentre de la trouée, afin de maximiser les chances d'obtenir les éclaircissements maximums.

Au total nous avons mis en place 184 placeaux (dont 59 de validation) pour les transects de la placette 1 et 80 (dont 20 de validation) pour ceux de la placette 2. Soit un total de 264 placeaux.

Mise en place de la maille systématique

La maille systématique n'a été mise en place que dans la placette 1. En effet en placette 2, les transects occupent déjà presque la totalité de la zone d'étude.

La maille totale est en fait composée de deux mailles en quinconce :

- Une maille complète, de 20 m de coté, composée des placeaux d'analyse ; elle comporte 66 placeaux. Elle a été construite en opérant un décalage de 5 m selon les axes horizontaux et

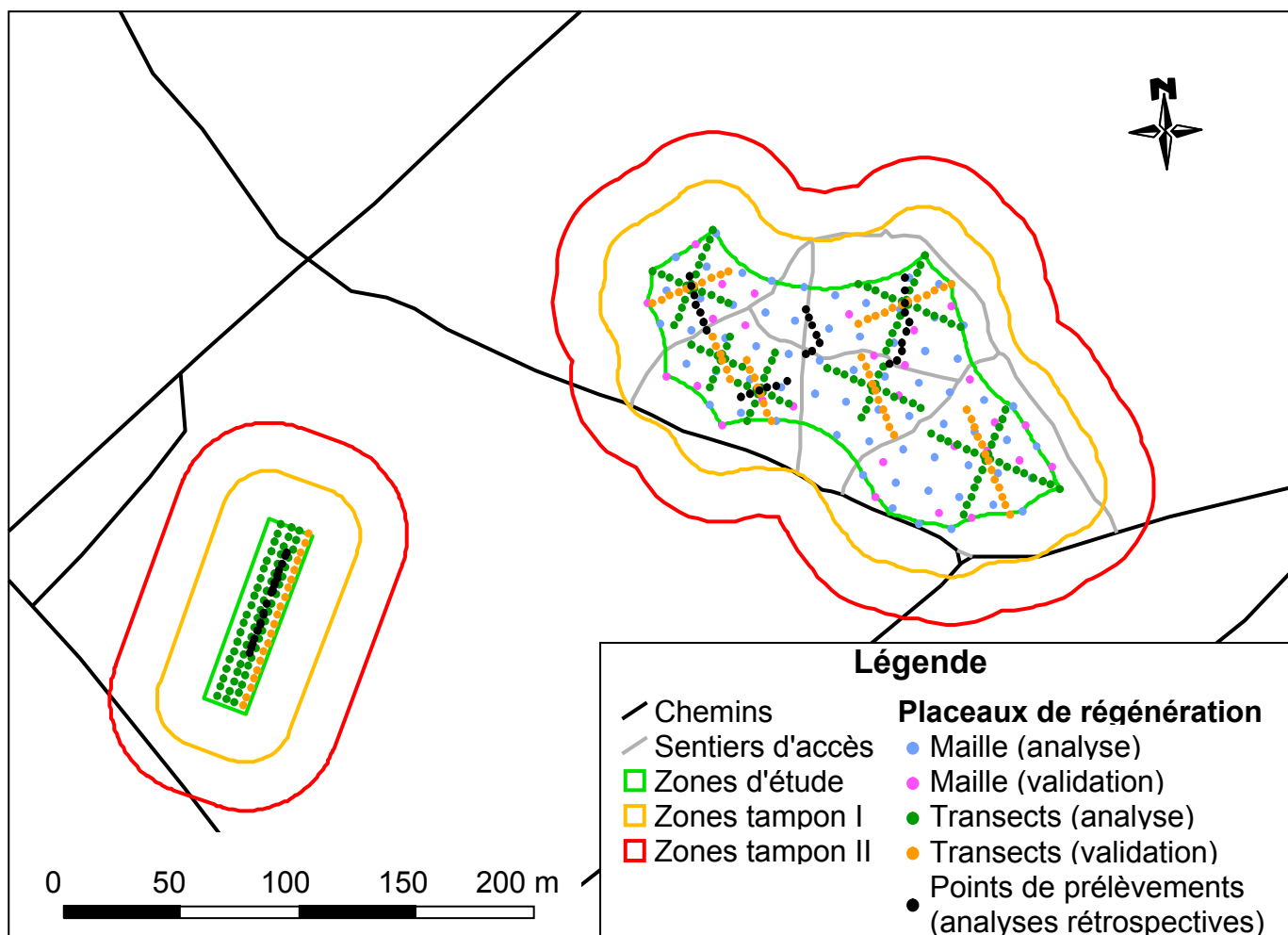


Figure 8 : Position des placeaux de mesure de la régénération et des points de prélèvements de semis pour les analyses rétrospectives.

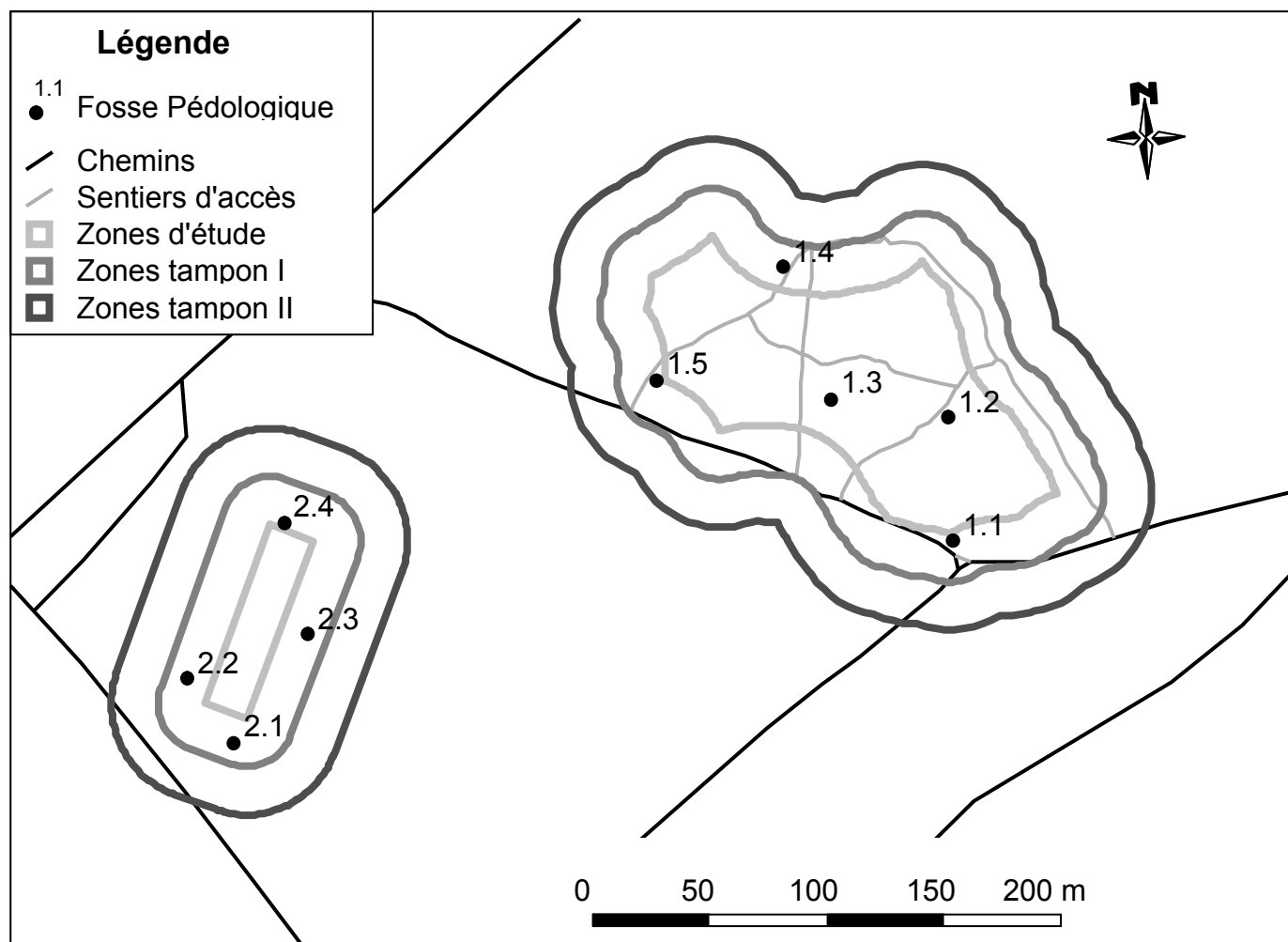


Figure 9 : Position des fosses pédologiques réalisées.

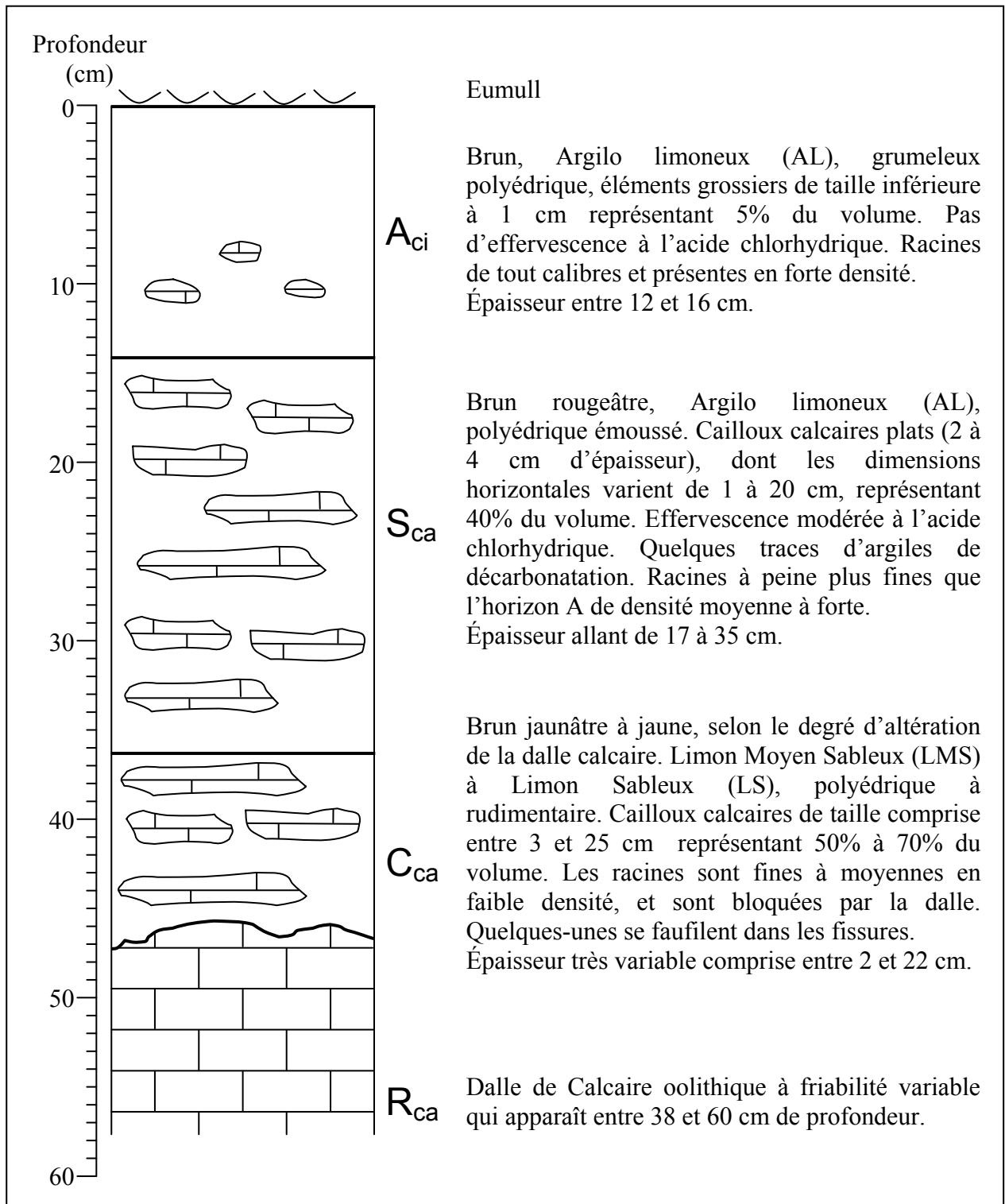


Figure 10 : Profil pédologique du sol sur le dispositif, réalisé d'après les fosses pédologiques (réalisé à partir de Formey de Saint Louvent 2003)

verticaux du maillage de référence afin d'éviter que les placeaux soient près des piquets de références (qui ont subi plus de piétinement lors de la mise en place).

- Une seconde maille, complémentaire en quinconce de la précédente, sera utilisée pour la validation. Sur cette maille, 28 placeaux ont été placés sur des emplacements tirés au hasard sur la maille. Là encore, les placeaux sont distants du maillage de référence.

Pour tous les placeaux (transects ou maille), lorsqu'un obstacle (tronc d'arbre, souche, tas de bois) occupait une proportion importante de la surface du placeau, celui-ci était déplacé au plus près de façon à exclure l'obstacle.

Chaque placeau a été localisé par rapport au maillage de référence et incorporé au SIG. La **figure 8** indique la position des différents placeaux.

b. Analyses rétrospectives

En placette 1 : des points de prélèvements (**figure 8**) ont été matérialisés (piquets de 50 cm peints en vert), numérotés et localisés. Ces points de prélèvements étaient situés sur des transects positionnés dans l'espace laissé libre par les transects des placeaux d'analyse de la régénération (diagonale non choisie pour les transects de validation), ainsi que dans la petite trouée non identifiée, de 1,5 ares, évoquée précédemment. Pour chaque point étaient prélevés les deux semis dominants de hêtre et/ou d'érable sycomore (selon la composition des trouées), dans un rayon de 1,50 m. Nous avons prélevé 46 hêtres et 28 érables sycomores en placette 1.

En placette 2 : les points de prélèvement étaient situés sur un transect passant entre les deux transects centraux des placeaux de régénération. Cette fois les semis dominants étaient prélevés un par un et dans les 50 cm autour du transect de prélèvement, pour éviter de trop perturber les placeaux proches. Nous avons prélevé 11 hêtres et 11 érables sycomores en placette 2.

3. Vérification de l'homogénéité du site

Neuf fosses pédologiques ont été réalisées – cinq en placette 1 et quatre en placette 2 – afin de caractériser le sol et sa variabilité sur le dispositif. La **figure 9** indique la position des différentes fosses, la **figure 10** présente un profil synthétique du sol rencontré et la **figure 11** montre la variabilité existant entre les différentes fosses. Des analyses de sol ont également été réalisées pour les trois horizons de deux des fosses (**annexe 7**). Ces données indiquent un Calcisol (sol brun calcique) homogène sur le dispositif d'une profondeur (jusqu'à la dalle calcaire) de 38 à 60 cm. Ces variations de profondeur ne présentent pas de structure spatiale particulière à l'échelle du site. La réserve utile correspondante, estimée en tenant compte de la porosité des cailloux que nous avons mesurée sur des échantillons prélevés dans les fosses, varie entre 50,6 et 67,5 mm, avec une moyenne de 55,7 mm.

Une analyse floristique a également été réalisée *Formey de Saint Louvent 2003* à partir des inventaires réalisés sur les placeaux de régénération. Elle n'a pas révélé de facteur d'hétérogénéité stationnelle particulier.

En ce qui concerne le peuplement, la **figure 12** permet de comparer les distributions en classes de diamètre des essences sur les deux placettes. Les deux placettes ont des peuplements très semblables. Cependant il existe quelques différences. Le hêtre est plus présent en placette 1, tant pour les faibles diamètres (classes 5 et 10 cm) que pour les gros diamètres (classes 60 cm et plus en

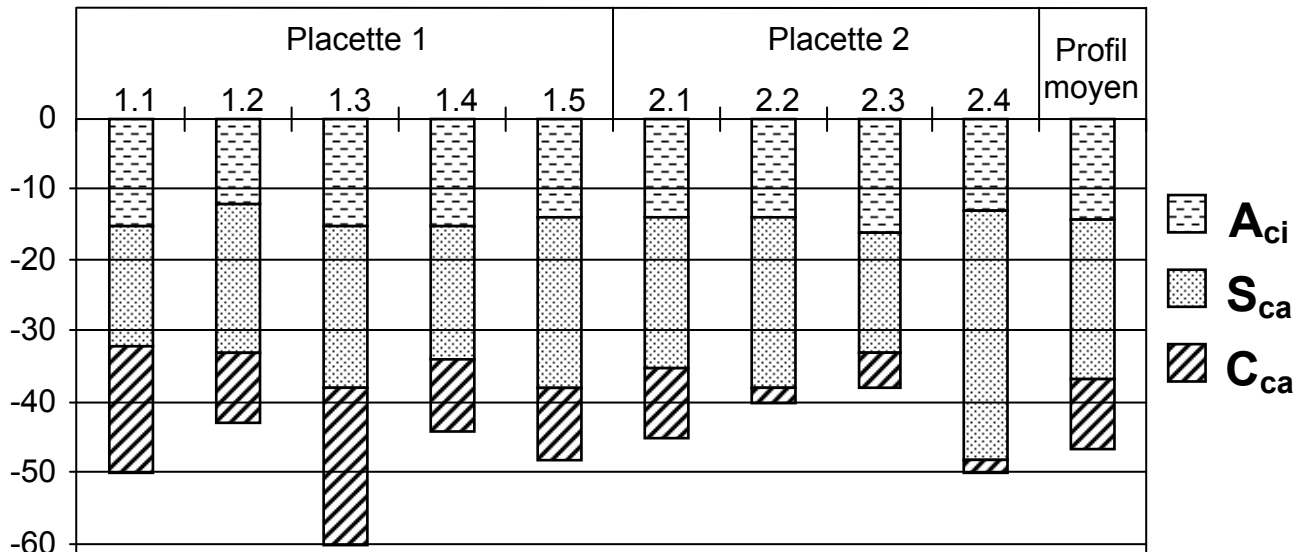


Figure 11 : Variabilité de l'épaisseur des différents horizons (A_{ci} , S_{ca} , C_{ca}) dans les différentes fosses.

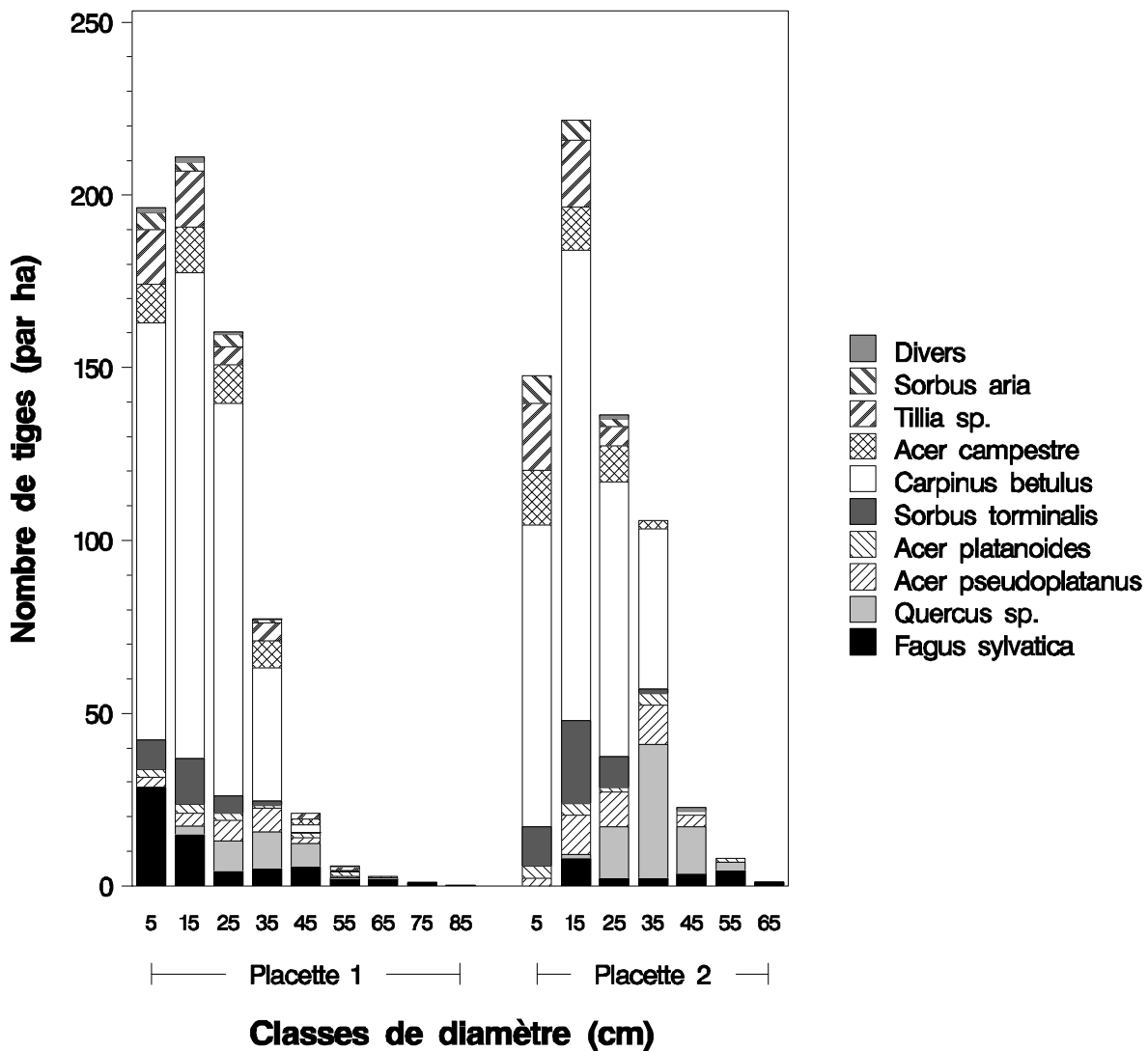


Figure 12 : Histogramme des diamètres, par essence des arbres du dispositif. Réalisée à partir des données mesurées dans la thèse. Les placettes 1 et 2 ont été séparées.

particulier). A l'inverse le chêne est nettement plus présent en placette 2, avec un diamètre moyen plus élevé. Enfin le nombre de tiges de faible diamètre, correspondant aux petits brins de taillis, est nettement plus important en placette 1. La structure semble donc un peu plus régulière en placette 2.

E. Récolte des données

Les mesures réalisées sur la régénération sont décrites en **annexe 5**.

1. Mise en place de points de repères

Étant donné que toutes les données devaient être spatialisées (en particulier pour le modèle de lumière), il a été nécessaire d'implanter un maillage de référence sur chacune des deux placettes (**figure 13**). Il est constitué de piquets disposés sur une maille carrée de 20 m de coté. Chaque piquet fait environ 1,20 m de haut une fois enfoncé et a été peint en blanc.

Ces piquets sont la référence de positionnement de tous les autres éléments du dispositif. Trois piquets pour la placette 1 et un pour la placette 2 ont été localisés au GPS¹ en continu durant une journée entière chacun (afin d'obtenir une précision inférieure au mètre), afin de positionner le maillage de référence correctement par rapport aux photographies aériennes sous SIG. Les autres piquets ont été localisés de proche en proche en mesurant un azimuth (au théodolite²) et une distance depuis chaque piquet voisin (au télémètre laser DISTO³, ou ultrason⁴ dans les cas les plus problématiques). Ces données ont été converties en coordonnées dans le repère Lambert II étendu, en tenant compte de la déclinaison, et importées sous SIG. Quatre autres points GPS (deux par placette) ont ensuite été réalisés de la même manière aux extrémités des deux placettes, afin de vérifier la qualité de la localisation. Une erreur systématique de trois grades, probablement due à un décalage de la boussole du théodolite, a été constatée et corrigée. La dérive en distance était régulièrement répartie et relativement faible : de l'ordre de 1,50 m pour 100 m. Elle a été ignorée, considérant qu'elle n'avait qu'une influence négligeable à l'échelle locale.

2. Mesures sur le peuplement

Comme nous l'avons vu précédemment, en zone d'étude et zone tampon I toutes les mesures nécessaires au modèle ont été réalisées : caractérisation des troncs et des houppiers. Par contre en zone tampon II, seuls les troncs ont été caractérisés (les houppiers seront reconstitués).

a. Caractérisation des troncs

Chaque tronc d'un diamètre à 1,30 m supérieur à 5 cm a été numéroté. Dans le cas des cépées, un unique numéro a été attribué à la cépée, chaque brin étant identifiée par une lettre (exemple 294a, 294b et 294c).

Tous les arbres numérotés (y compris chaque brin de chaque cépée) ont ensuite été localisés par rapport aux piquets du maillage de référence, sous la forme d'un azimuth en grades et d'une distance

¹ De marque Trimble Navigation Limited.

² De marque Wild.

³ De marque LEICA Geosystems.

⁴ De marque Haglöf Sweden AD.

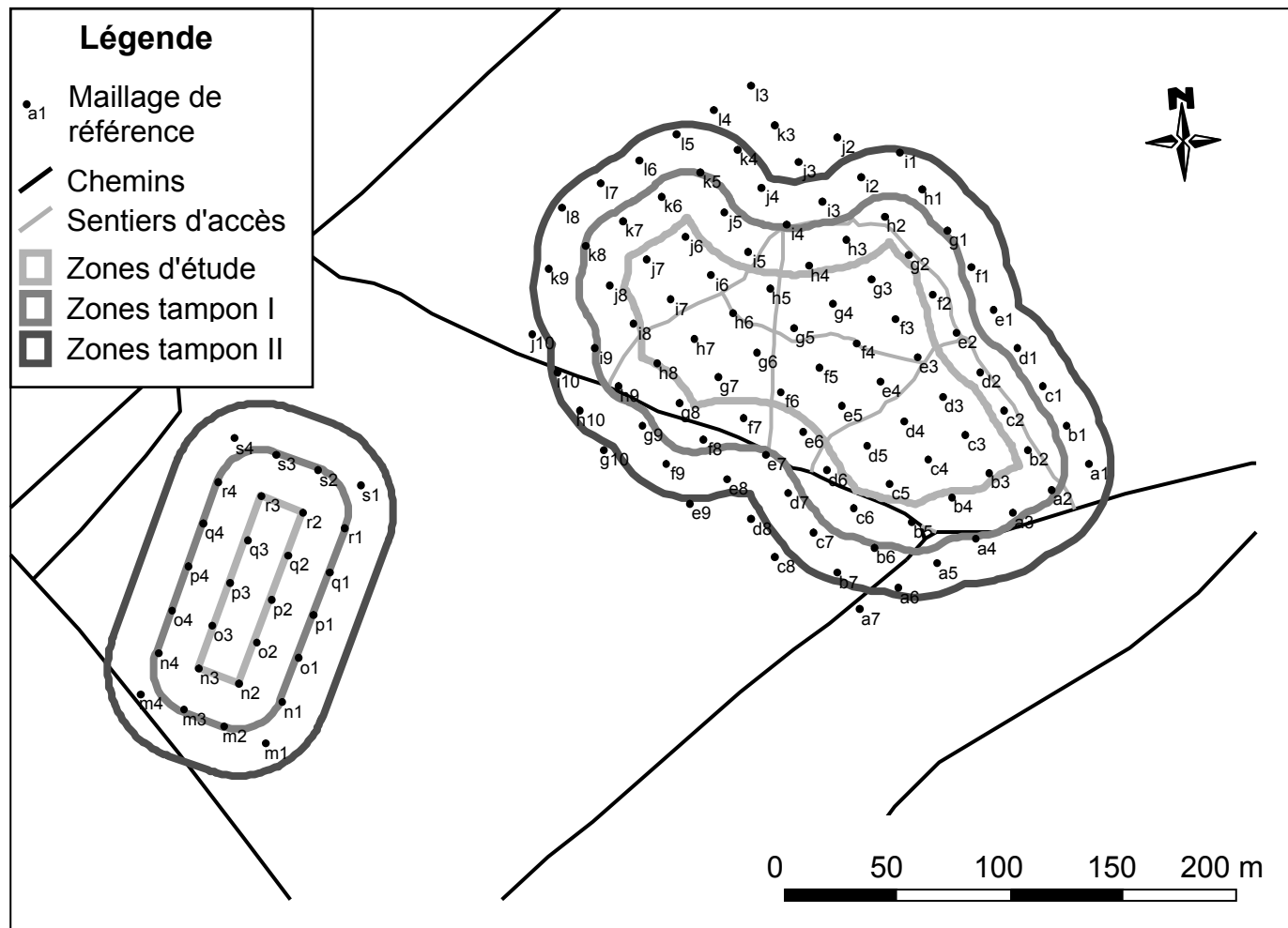


Figure 13 : Maillage de référence sur le dispositif.

en mètres. Ces données ont ensuite été converties en coordonnées Lambert II étendues. Du point de vue pratique, un théodolite était mis en station sur un piquet de référence et l'azimut de chaque arbre était relevé. La distance entre le piquet et le centre du tronc de l'arbre était relevée à l'aide d'un télémètre laser ou ultrason quand le laser ne pouvait être utilisé (obstacle sur le trajet optique). De plus la circonférence de chaque tige a été mesurée en millimètres (au mètre ruban) et son essence relevée. Les conversions en coordonnées ont été faites grâce à des filtres d'importation, sous le module *regelight* (Piboule 2002) de la plateforme de modélisation forestière Capsis 4, en tenant compte de la déclinaison du moment (et de l'erreur de 3 grades évoquée pour la localisation des piquets de référence). Une coordonnée Z a également été attribuée à chaque tige à partir des données d'altitude du SIG, afin de tenir compte des variations d'altitude du site, pourtant très peu marquées.

Des plans ont été tracés à partir du SIG, et la position relative des arbres entre eux et par rapport aux piquets de référence a été vérifiée visuellement sur le terrain. Toute erreur importante de positionnement (écart supérieur à 2 m environ) a ainsi été corrigée.

Les essences relevées sont :

- Le hêtre, *Fagus sylvatica* L.
- Le chêne, *Quercus petraea* (Mattus.) Liebl. et *Quercus robur* L.
- Le charme, *Carpinus betulus* L.
- L'érable sycomore, *Acer pseudoplatanus* L.
- L'érable plane, *Acer platanoides* L.
- L'érable champêtre, *Acer campestre* L.
- L'alisier torminal, *Sorbus torminalis* (L.) Crantz
- L'alisier blanc, *Sorbus aria* (L.) Crantz
- Le tilleul, *Tilia cordata* Mill. et *Tilia platyphyllos* Scop.
- Le merisier (divers), *Prunus avium* L.
- L'orme (divers), *Ulmus minor* Mill.
- Le frêne (divers), *Fraxinus excelsior* L.
- Le cornouiller (divers), *Cornus mas* L.
- L'aubépine (divers), *Crataegus laevigata* (Poir.) DC. et *Crataegus monogyna* Jacq.
- Le noisetier (divers), *Corylus avellana* L.

Les chênes, ainsi que les tilleuls n'ont pas été distingués entre eux. Nous parlerons donc dans la suite du chêne et du tilleul en tant qu'essences génériques.

Seuls quelques exemplaires des six dernières espèces citées sont présents sur le terrain (22 tiges en tout) : elles ont été regroupées sous la dénomination « divers » pour les simulations et analyses.

Nous avons ainsi mesuré respectivement 2834 et 570 tiges (cépées comprises) pour les placettes 1 et 2.

b. Caractérisation des houppiers

Pour chaque arbre isolé ou cépée des zones d'étude et des zones tampon I, nous avons caractérisé le houppier par la hauteur totale de l'arbre, la hauteur de base de houppier, la hauteur de plus grande largeur de houppier et huit rayons de houppiers.

Les hauteurs ont été mesurées (lors de la saison de végétation 2003, les arbres étant feuillés) à l'aide d'un hypsomètre électronique (Vertex III⁵).

La hauteur totale est définie comme la hauteur du bourgeon terminal de l'arbre, prise depuis une direction permettant de minimiser les erreurs de parallaxe (erreurs systématiques qui se produisent dans le cas où la branche portant le point à mesurer se rapproche ou s'éloigne de l'opérateur).

La hauteur de base de houppier est définie comme la hauteur de base du feuillage du houppier vivant, considéré comme un volume homogène et continu. Ainsi une branche basse isolée participant de façon négligeable au volume total du houppier n'est pas prise en compte. La **figure 14** illustre cette définition.

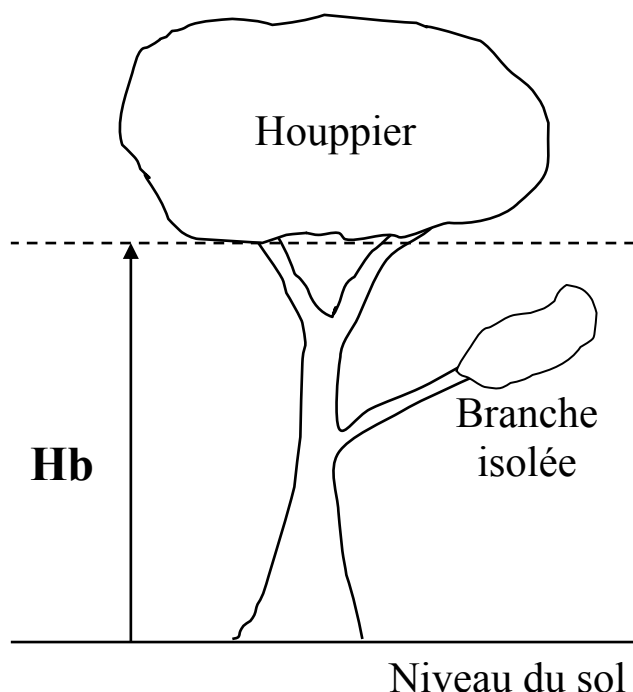


Figure 14 : Définition de la hauteur de base de houppier H_b dans le cadre de la thèse.

La hauteur de plus grande largeur de houppiers correspond sur le terrain à la hauteur moyenne pour laquelle le houppier est le plus étendu horizontalement. Cette mesure n'est pas d'une très grande précision à l'échelle de l'arbre (de l'ordre d'un ou deux mètres).

Pour la mesure des rayons de houppiers (réalisée lors de l'hiver 2002-2003, les arbres étant non feuillés) de chaque arbre isolé ou cépée, nous avons procédé comme suit :

1. Nous avons choisi un « centre de houppier » défini comme le point au sol situé à la verticale du point de convergence des branches structurantes du houppier. Lorsque le tronc (ou une des tiges d'une cépée) était proche de ce point (moins d'un mètre), nous le prenions comme centre de houppier.
2. Nous placions huit jalonnettes à la verticale de points caractéristiques du bord du houppier.
3. Nous mesurions pour chaque jalonnette la distance (au télémètre) et l'azimut (à la boussole forestière⁶) des jalonnettes au centre de houppier.

⁵ De marque Haglöf Sweden AD.

Les points caractéristiques étaient positionnés de façon à ce que le contour de la projection du houppier dans le modèle tRAYci soit le plus proche possible du contour réel de la projection sur le terrain. Pour ce faire les points caractéristiques étaient choisis aux points les plus saillants et les plus rentrants de la projection. Une contrainte supplémentaire (imposée par le modèle tRAYci) était qu'aucun angle entre deux rayons successifs ne dépasse 100 grades. Enfin lorsqu'il était nécessaire de faire des choix entre plusieurs points importants nous essayions de minimiser l'erreur sur la projection du houppier. Durant le placement des points caractéristiques nous gardions à l'esprit la forme utilisée dans le modèle tRAYci pour modéliser le houppier (voir chapitre II). En effet deux rayons successifs sont reliés par l'arc d'une ellipse dont le demi axe principal est le plus grand des deux rayons et qui passe par le second rayon (**figure 15**). Concrètement, ne pas ajouter de rayon entre deux rayons successifs de même longueur, revient à considérer que le rayon est constant sur la portion concernée. Si les longueurs des deux rayons successifs ne sont pas identiques, il faut simplement remplacer un arc de cercle par un arc d'ellipse. Les points caractéristiques ne forment donc pas un polygone (où ils seraient reliés par des lignes droites), mais les points d'accroche d'arcs elliptiques. Cette méthode, imposée par l'utilisation du modèle tRAYci, nécessite un peu de réflexion mais présente l'avantage de pouvoir caractériser les houppiers avec relativement peu de rayons, particulièrement lorsqu'ils présentent des grandes parties à rayon constant.

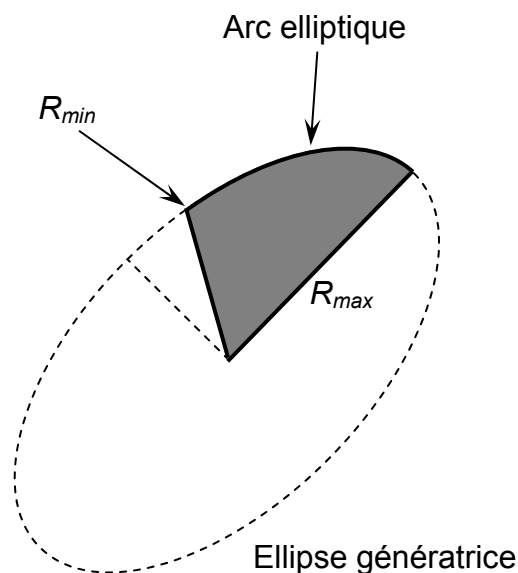


Figure 15 : Méthode d'extrapolation du rayon de houppier entre deux rayons mesurés successifs. Une ellipse génératrice est définie comme l'ellipse dont le demi axe principal est le plus grand des deux rayons mesurés (R_{max}) et qui passe par l'extrémité du second rayon (R_{min}).

Pour le placement des jalonnettes, nous avons effectué des essais avec le « miroir des cimes ». C'est un instrument classiquement utilisé pour les projections de houppiers, composé d'un miroir à 45 degrés et d'un fil à plomb. Il permet de se placer à la verticale d'un point du houppier, visualisé dans le miroir. Malheureusement ces essais furent infructueux. En effet, la stratification verticale du peuplement, due à la structure en taillis sous futaie, rendait l'utilisation de l'appareil assez hasardeuse et beaucoup trop longue, du fait de la difficulté à repérer de façon non équivoque les points à mesurer dans le miroir, lorsque les houppiers étaient superposés. Nous avons donc placé les

⁶ De marque Suunto.

jalonnages visuellement à la verticale des points caractéristiques du houppier. Pour cela nous avons dû prendre quelques précautions. En effet il est très difficile (sans instrument) pour un opérateur de se positionner correctement à la verticale d'un point situé dans un plan horizontal. Par contre il est relativement aisé de se positionner à la verticale d'un point situé sur une droite. Pour ce faire il faut regarder dans une direction perpendiculaire à cette droite, en gardant le corps bien droit, les deux mains jointes, bras tendus. Il est alors relativement aisé de pencher la tête vers l'arrière tout en regardant toujours dans le même plan vertical. Ainsi en se déplaçant latéralement nous pouvons faire coïncider ce plan vertical avec le point visé sur la droite. En utilisant cette méthode alternativement dans deux directions perpendiculaires – radiale (**figure 16.a**) dans l'axe observateur vers centre de houppier, et tangentielle (**figure 16.b**), dans l'axe perpendiculaire – il est possible de se positionner à la verticale du point choisi.

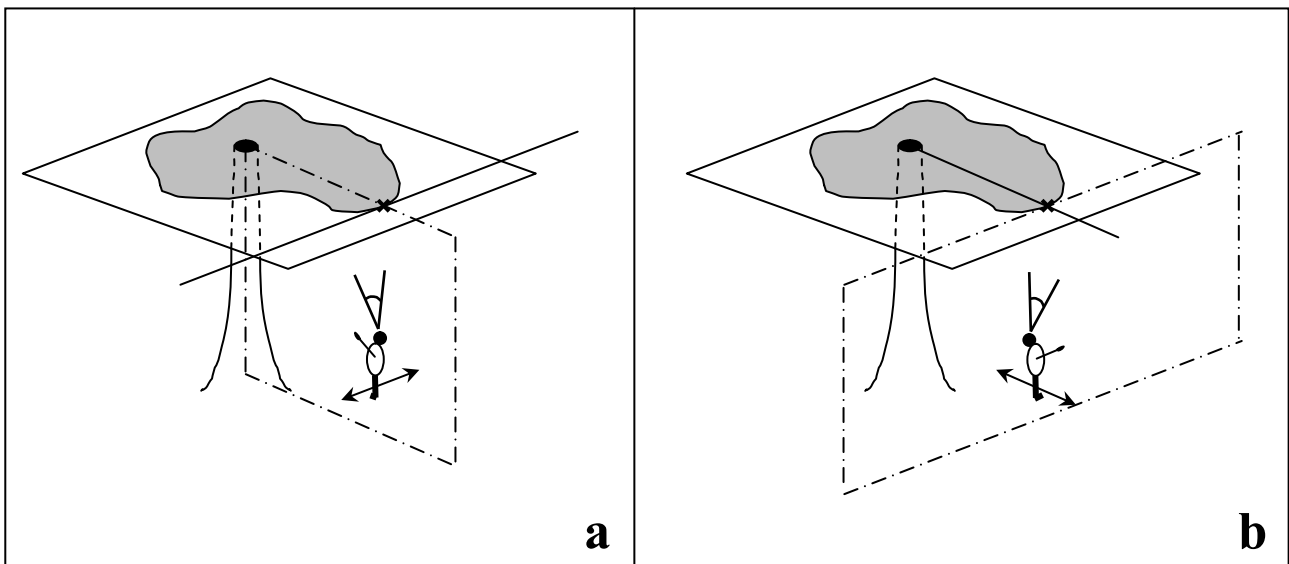


Figure 16 : Plan de projection radial (a) et tangentiel (b) utilisés lors de la mesure d'un rayon de houppier. La surface en gris représente une coupe horizontale du houppier à la hauteur de plus grande largeur de houppier. La croix est le point du houppier à projeter au sol. Le plan en -.-.- représente le plan de projection, contenant l'axe de la colonne vertébrale de l'opérateur et le point à projeter. Les doubles flèches en trait plein représentent les mouvements possibles de l'opérateur pour ajuster le plan de projection afin que celui-ci contienne effectivement le point à projeter.

Nous avons comparé cette méthode visuelle à la méthode utilisant le miroir des cimes sur quelques arbres suffisamment isolés (pour pouvoir appliquer cette dernière), et nous avons constaté une erreur non biaisée de 10 à 30 cm au maximum sur la mesure d'un rayon, pour des arbres dont certains rayons atteignaient 10 m. De plus pour éviter d'autres sources d'erreur, toutes les projections ont été réalisées par le même opérateur.

Au total les projections de 1182 et 177 houppiers ont été réalisées respectivement pour les placettes 1 et 2. La **figure 17** illustre les données mesurées pour caractériser les tiges et les houppiers.

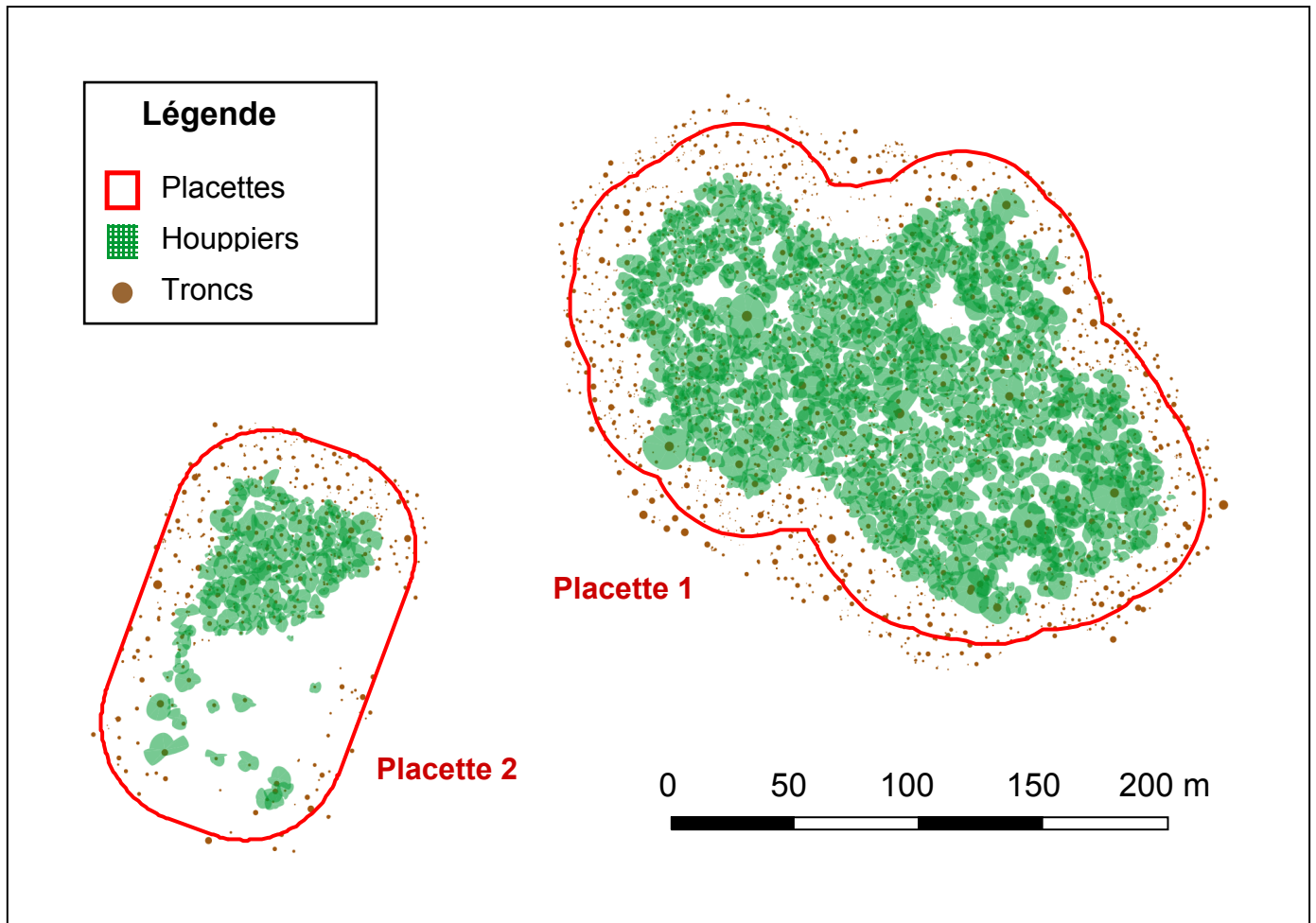


Figure 17 : Carte des données mesurées. La taille des troncs est exagérée (multipliée par un facteur 4). Les houppiers sont représentés par leur projection maximale, avec une transparence permettant de visualiser les chevauchements en projection au sol. La forme des houppiers utilise la représentation du modèle tRAYci (rayons successifs reliés par des arcs elliptiques). Cette carte a été obtenue grâce à une visualisation de la plateforme Capsis 4.

c. Cas des cépées

Du fait de l'ancienne structure de taillis sous futaie, nombre de tiges (en particulier de charme et tilleul) sont structurées en cépées, au sens forestier : groupe de tiges issues d'une même souche. Toutes les tiges (d'un diamètre suffisant) ont été caractérisées qu'elles appartiennent ou non à des cépées. Cependant, afin d'économiser une grande quantité de temps de mesure, nous avons décidé de ne mesurer qu'un houppier par cépée. Ce choix se justifie par le fait que dans la majorité des cas les houppiers des différentes tiges d'une même cépée sont complètement jointifs, voire mêlés. Cependant pour tenir compte des cas particuliers où certaines tiges d'une cépée ont un houppier isolé, nous avons redéfini la cépée comme suit : ensemble de tiges de même essence, généralement (mais pas obligatoirement) issues d'une même souche et partageant un houppier homogène et continu. Ainsi une tige d'une cépée (au sens forestier) est exclue de la cépée et considérée comme un arbre individuel si son houppier est très distinctement isolé du houppier formé par les autres tiges de la cépée (**figure 18.a**). Réciproquement une tige proche d'une cépée (au sens forestier) peut lui être rattachée si :

1. Elle est de même essence.
2. Elle participe de façon homogène et continue au houppier de celle-ci sans que nous puissions définir de façon claire la limite entre le houppier propre de la tige et celui de la cépée de rattachement (**figure 18.b**). Cette seconde possibilité n'a été utilisée que dans quelques rares cas très prononcés.

Dans la suite de la thèse le mot cépée se rapportera toujours à la définition donnée ci-dessus. Il faut cependant noter que dans la majorité des cas sur le terrain les deux définitions aboutissent au même résultat.

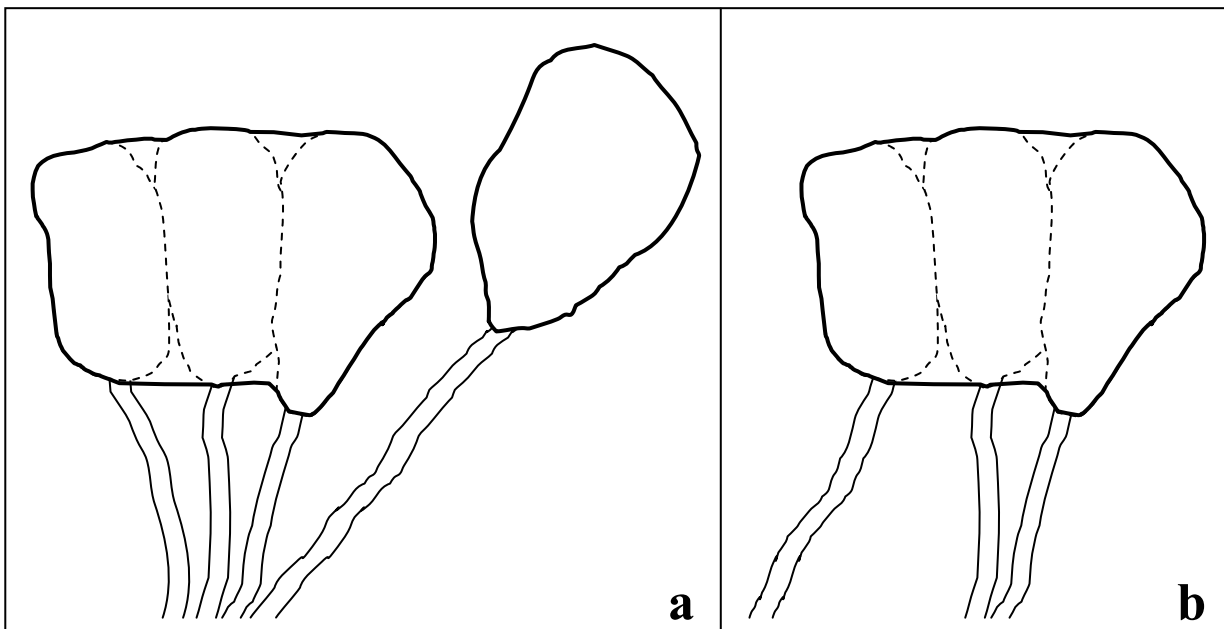


Figure 18 : Définition de la cépée dans le cadre de la thèse. Les houppiers mesurés sont représentés en trait plein et les houppiers réels de chaque brin en pointillés. En **a**, un brin d'une cépée au sens forestier est exclu car son houppier est clairement isolé. En **b**, un brin extérieur est rattaché à la cépée car son houppier est complètement jointif.

3. Répartition du temps de Mesure

Le **tableau I** donne la répartition du temps qui a été nécessaire pour les différentes mesures effectuées.

Type de mesure	Type	Jours	Effectifs	Temps en hommes-jours	Pourcentage
Maillage de référence					10%
Mise en place	Terrain	10	3	30	9%
Localisation GPS	Terrain	2	1	2	1%
Mesure des arbres adultes					57%
Numérotation	Terrain	4	2	8	2%
Localisation	Terrain	12	3	36	11%
Hauteurs	Terrain	17	2	34	10%
Projection des houppiers	Terrain	55	2	110	33%
Placeaux de régénération					18%
Mise en place	Terrain	10	2	20	6%
Mesure	Terrain	10	4	40	12%
Analyses rétrospectives					10%
Prélèvements	Terrain	2	2	4	1%
Unités de croissance	Labo	15	1	15	5%
Comptage des cernes	Labo	15	1	15	5%
Opérations diverses					5%
Repérages	Terrain	3	2	6	2%
Chemins d'accès (mise en place)	Terrain	1	2	2	1%
Localisation des chemins (GPS)	Terrain	2	1	2	1%
Étude pédologique	Terrain	3	2	6	2%
Total		161	30	330	100%

Tableau I : Répartition du temps de mesure pour le dispositif du Graouilly (mise en place, mesure des arbres adultes et mesures de régénération, hors mesures de lumière).

Nous constatons que la mesure des caractéristiques des houppiers est une opération très coûteuse en temps de terrain. En particulier les projections de houppier ont représenté 33 % du temps de mesure à elles seules. Ce chiffre s'élève à près de 47 % si nous ne tenons pas compte des mesures concernant la régénération. Cela confirme l'intérêt qu'il y aurait à pouvoir alimenter les modèles de lumière tels que tRAYci avec un jeu de données réduit.

Le gain de temps le plus considérable serait obtenu en supprimant (ou en réduisant) la mesure des projections de houppiers. La simplification des mesures de hauteur d'une part ou de la localisation des arbres d'autre part apporterait conduiraient également à un gain significatif. Il faut noter que la mise en place du dispositif consomme également un temps non négligeable.

4. Traitement des données

La quantité de données mesurées étant importante, nous avons mis en place une chaîne de traitement nous permettant de réduire au maximum et de détecter au mieux les erreurs. Le cœur de cette chaîne est le module *regelight* (Piboule 2002), que nous avons développé sous la plateforme logicielle sylvicole Capsis 4 (De Coligny, De Coligny et al. 2002). Développée en Java (langage de programmation objet), cette plateforme accueille un bon nombre de modules de modélisation forestière qui s'appuient sur une base logicielle. Cette base fournit des structures de données génériques, des processus d'intervention et d'évolution, des visualisations et des bibliothèques sur des problèmes spécifiques. Cette plateforme regroupe donc une communauté de modélisateurs qui partagent leur code source. Elle permet également, grâce aux structures de données génériques de comparer les sorties de différents modèles.

Le module *regelight* que nous avons développé nous a servi de laboratoire virtuel. Ainsi nous y avons centralisé le traitement des données et l'interfaçage avec les différents logiciels que nous avons utilisés.

Sur le terrain toutes les mesures étaient directement relevées à l'aide d'un organisateur de terrain Psion Workabout. Cela permettait de supprimer l'étape de saisie informatique des données à partir de fiches de terrain, économisant du temps et supprimant ainsi un niveau d'erreur. Les fichiers de l'organisateur de terrain étaient ensuite directement transférés sur PC et importés sous *regelight*. Les fichiers de données originaux n'étaient ainsi pas modifiés.

Les données étaient vérifiées à l'importation (détections des valeurs aberrantes). Le module *regelight* nous a permis également de facilement regrouper des mesures effectuées lors de passages successifs (localisation des arbres, mesures de hauteur, mesures de projections de houppier, etc.). Les localisations en azimut et distance étaient également converties en coordonnées relatives.

Les points GPS étaient importés sur PC grâce au logiciel PathFinder Office⁷, puis transféré sous le SIG (voir partie C.2 de ce chapitre). Du SIG, nous exportons les points de référence vers *regelight* pour localiser les arbres en coordonnées Lambert II étendues. Nous avons également importé sous *regelight* les données permettant d'attribuer à chaque arbre une altitude. Au final nous obtenions sous *regelight* une structure de données complète incluant toutes les mesures et certaines données du SIG.

Nous avons créé un certain nombre de filtres d'importation et d'exportation permettant de transférer des données entre *regelight*, le SIG mais aussi le logiciel d'analyse statistique SAS (*SAS Institute Inc. 2000*), le modèle de lumière tRAYci (*Brunner 1998*) et de générer des fichiers de données, des images du peuplement, etc.

D'autre part les erreurs détectées dans les données – erreurs de localisation, de numérotation, de mesure ou de saisie – ont été vérifiées si nécessaire sur le terrain et corrigées. L'historique de toutes les corrections successives a été scrupuleusement consigné.

⁷ De marque Trimble Navigation Limited.

Chapitre II : Caractérisation de l'éclairement sous couvert

A. Définitions

L'objet de la thèse est de caractériser l'éclairement sous couvert, en fonction de la structure du peuplement, dans un contexte d'étude de la régénération naturelle et de sa dynamique. Pour cela, il est nécessaire de définir clairement ce que nous appelons « éclairement sous couvert ». Pour ce faire nous nous sommes appuyés sur plusieurs synthèses traitant de la lumière en forêt, principalement *Chartier et al. 1992, 1993a, Guyot 1997, Lieffers et al. 1998, Roussel 1972, Schmerber 1997, Varlet-Grancher et al. 1989*, et quelques ouvrages plus généraux : *Monteith 1973, Ross 1981*.

La lumière est composée de radiations électromagnétiques qui se situent essentiellement entre 300 et 3000 nm. Cette gamme correspond au rayonnement global, classiquement mesuré dans les stations météorologiques. Le domaine de la lumière visible se situe entre 380 nm (bleu) et 800 nm (rouge) de longueur d'onde, celui de l'ultraviolet en dessous de 380 nm et celui de l'infrarouge au dessus de 800 nm. La gamme de longueur d'onde impliquée dans la photosynthèse – entre 400 et 700 nm – constitue le rayonnement utile à photosynthèse ou PAR (photosynthetically active radiation, *McCree 1972, 1973, Varlet-Grancher et al. 1981*). C'est en effet dans cette gamme que les feuilles des plantes réalisent la photosynthèse. D'autres gammes de longueur d'onde sont impliquées dans d'autres processus biologiques. Par exemple le rapport rouge clair (655-665 nm) sur rouge sombre (725-735 nm) nommé R:FR en anglais (red:far red) et les longueurs d'ondes dans le bleu et les ultraviolets (300-500 nm) sont impliqués dans la photomorphogénèse (*Ballaré et al. 1995, Barnes et al. 1996, Roussel 1987, Schmitt et Wulff 1993, Smith 1982*). Cependant, il faut noter que sous couvert végétal la quantité de rayonnement transmis dans ces longueurs d'ondes et dans le PAR ne sont pas complètement indépendantes. En particulier, pour une analyse de la relation entre PAR et rapport R:FR sous couvert, il est possible de se référer à *Capers et Chazdon 2004*. Par ailleurs, l'ensemble du rayonnement global et plus particulièrement les infrarouges, interviennent dans le bilan énergétique et doivent être pris en compte lorsque l'on s'intéresse à l'effet thermique de la lumière (*Guyot 1997*). Pour plus d'informations sur la qualité de la lumière et ses conséquences, il est possible de se référer en particulier à *Endler 1993, Grant 1997, Varlet-Grancher et al. 1993*.

Pour l'étude de la dynamique de régénération dans son ensemble, le PAR semble la gamme la mieux adaptée du fait qu'elle dirige la photosynthèse et est donc fortement impliquée dans la production de biomasse. C'est d'ailleurs la gamme la plus utilisée dans la littérature pour l'analyse de la régénération. C'est dans cette gamme que nous ferons les mesures et les estimations de l'éclairement, en nous fondant sur l'hypothèse que la quantité de lumière dans le PAR permet à elle seule d'expliquer l'essentiel de la dynamique de régénération forestière et de sa variabilité.

La quantité de lumière peut être définie de façon énergétique par une densité de flux énergétique (en $W.m^{-2}$) ou bien quantique par une densité de flux de photons (en $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$). La photosynthèse étant un phénomène photonique, la seconde définition est plus adaptée à son étude (*McCree 1973*), alors que la définition énergétique est utilisée lorsqu'il s'agit de réaliser un bilan radiatif. Le PPFD

(Photosynthetic photon flux density) est défini comme la densité de flux de photons dans le domaine du PAR. Dans le cadre de ce travail, la lumière sera étudiée sous la forme du PPF. Dans le cadre de ce travail, la lumière sera étudiée sous la forme du PPF.

Le PPF varie fortement en fonction du moment de la journée, du jour de l'année et des conditions atmosphériques et climatiques. Afin de pouvoir comparer différentes situations, il est donc nécessaire de passer de valeurs instantanées du PPF à un critère plus synthétique. Nous travaillerons avec un indice très utilisé dans la littérature, l'éclairement relatif (ER%), défini comme le rapport entre le PPF au point considéré sous couvert et le PPF incident au dessus du couvert, exprimé en pourcentage. Dans la littérature anglo-saxonne, l'éclairement relatif est nommé PACL (percentage of above canopy light) ou plus généralement RLI (relative light intensity). L'éclairement relatif se calcule en un point pour une période donnée, en général la saison de végétation. Plus la période est grande, plus l'éclairement relatif a une valeur synthétique des conditions moyennes d'éclairement au point considéré. Cependant une étude de ses variations journalières permet d'analyser finement la réponse de la photosynthèse à l'éclairement instantané. En particulier, un certain nombre d'études se sont intéressées à l'effet des « taches de lumière » (sunflecks en anglais, *Chadzon et Percy 1991, Grant 1997, Küppers et al. 1996, Ross et al. 1998, Ustin et al. 1984, Watling et al. 1997*). Celles-ci correspondent à l'hétérogénéité à petite échelle de la répartition de l'éclairement. Il s'agit en particulier de la forte mise en lumière de petites surfaces sur des durées assez courtes, provoquée par le passage direct des rayons du soleil à travers de petites ouvertures du feuillage. Dans ce travail nous n'analyserons pas ces phénomènes à fine échelle spatiale et temporelle. Nous intégrerons les variations de l'éclairement sur des périodes de temps supérieures à la journée. Nous ne considérerons pas non plus les variations intra-saisonnières de l'éclairement. Nous nous intéresserons à la quantité moyenne de lumière parvenant en un point, c'est-à-dire l'éclairement relatif, pour une période donnée (plusieurs semaines). Nous considérons cette période comme représentative de la saison de végétation dans son ensemble.

L'éclairement relatif total (ER_{Total}) est classiquement décomposé en trois parts distinctes (**figure 19**) :

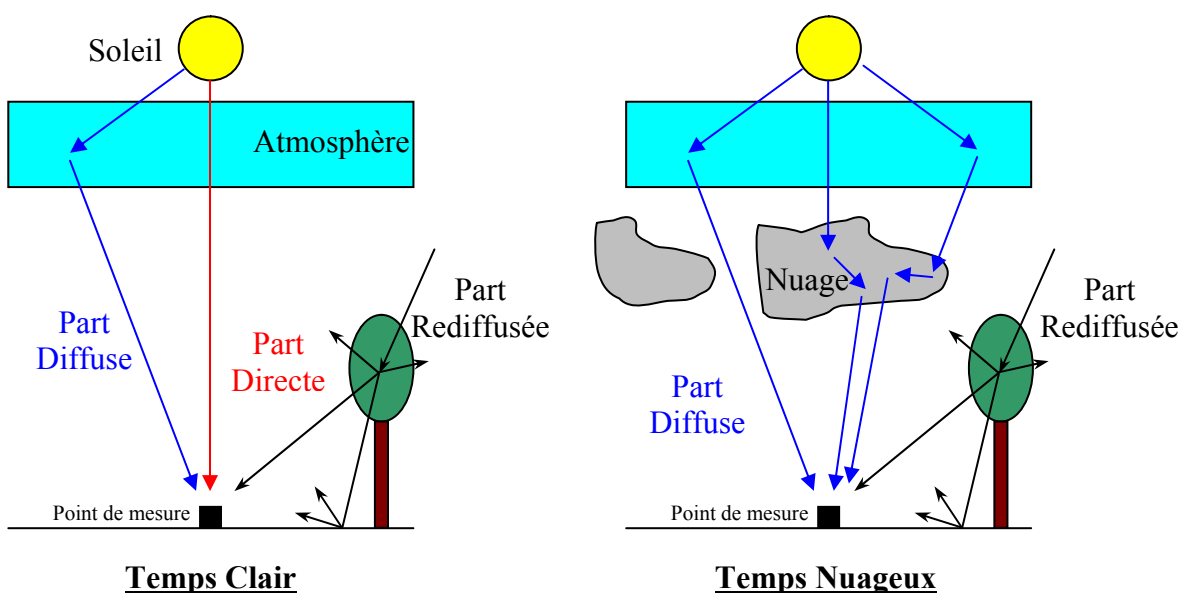


Figure 19 : Illustration des parts directe, diffuse et rediffusée de l'éclairement.

1. L'éclairement direct (ER_{Direct}), constitué des photons provenant directement de la direction du soleil. Cette part n'existe que si le soleil est visible depuis le point considéré. L'éclairement direct est très fortement lié à la course du soleil et est donc responsable de l'asymétrie entre exposition Sud et exposition Nord (en montagne, en trouée ou pour une lisière forestière). Cette part est réduite voire inexistante par temps uniformément couvert.
2. L'éclairement diffus (ER_{Diffus}), composé des photons diffusés par l'atmosphère (ciel bleu) ou les nuages.
3. L'éclairement rediffusé – parfois inclus dans l'éclairement diffus ou simplement négligé – issu des phénomènes de réflexion, réfraction et transmission ayant lieu au niveau des éléments végétaux, du sol ou de tout autre obstacle.

La proportion de diffus est définie comme le rapport :

$$P_{dif} = \frac{ER_{Total} - ER_{Direct}}{ER_{Total}}$$

B. Méthodes de mesure et d'estimation de l'éclairement

1. Les méthodes directes de mesure du PPFD

Les méthodes dites directes permettent de mesurer le PPFD. Pour obtenir un éclairement relatif, deux mesures simultanées en continu, sur une période donnée sont réalisées. Une mesure de référence au dessus du couvert (sur une tour, ou en plein découvert) permet d'obtenir l'éclairement incident (avant interception) sur la période. L'autre mesure, au point considéré, permet d'obtenir l'éclairement transmis sur la même période. Le rapport des deux mesures, sommées sur la période considérée, permet d'obtenir l'éclairement relatif sur cette période.

Les mesures de PPFD sont réalisées à l'aide de capteurs ponctuels. En général, on utilise des détecteurs quantiques constitués de cellules au silicium amorphe ou cristallin, qui génèrent des courants par effet photoélectrique (*Chartier et al. 1992, 1993a*). En mesurant la différence de potentiels et en multipliant par le coefficient de calibrage du capteur on obtient le PPFD instantané. Les capteurs en question sont équipés de filtres permettant de ne mesurer que le PAR. Chaque modèle de capteur a une courbe de réponse plus ou moins proche de la réponse théorique. Les plus réputés sont les « quantum sensor » de marque LI-COR, Lincoln, NE, USA, dont la courbe de réponse est très proche de la courbe théorique (*LI-COR 1982, 1986*). L'inconvénient des capteurs LI-COR est qu'ils sont relativement coûteux. De nombreux autres capteurs sont disponibles sur le marché (*Chartier et al. 1993a, b*). En particulier un fabricant français (Solems, Palaiseau, France) propose un capteur (capteurs CBE), bien adapté à la mesure du PAR, à un coût nettement plus abordable (*Chartier et al. 1989*). L'utilisation de ce type de capteurs, préalablement étalonné vis-à-vis de capteurs de référence (LI-COR par exemple) permet de mettre en place un plus grand nombre de capteurs pour un même prix, sans compromettre significativement la qualité des mesures.

L'avantage principal des méthodes directes est qu'elles obtiennent de l'éclairement relatif par mesure et non par simulation. Elles prennent en compte toutes les composantes de l'éclairement (direct, diffus et rediffusions). Il faut cependant noter qu'en général une mesure directe est réalisée par un unique capteur placé à l'horizontale sur un support et dirigé vers le ciel. Dans ce cas la part des rediffusions provenant du sol ne peut être mesurée. Pour estimer cette partie des rediffusions, il faut également placer un capteur orienté vers le sol (*Chartier et al. 1992, 1993a*). Un autre atout des méthodes directes est qu'elles fournissent des valeurs absolues et instantanées permettant d'avoir des courbes journalières précises de l'éclairement relatif. Les méthodes directes sont considérées comme une référence pour évaluer les autres méthodes, car elles sont précises et non biaisées.

Cependant elles ont des limites. L'éclairement relatif sous couvert varie fortement dans le temps. Pour avoir une bonne caractérisation de l'éclairement moyen il faut donc mesurer l'éclairement de façon continue sur une période significative (de quelques semaines à quelques mois). Cela a de lourdes conséquences du point de vue logistique (gestion de l'énergie et de l'enregistrement des données sur le terrain), imposant des déplacements fréquents et une surveillance régulière, en particulier pour s'assurer du fonctionnement continu des systèmes de mesure afin d'éviter des discontinuités dans les mesures.

De plus, l'éclairement relatif varie fortement dans l'espace. Pour bien caractériser l'éclairement sur une surface donnée il faut donc multiplier les capteurs, qui rappelons-le doivent rester en place pendant une durée relativement longue. Cela induit un coût élevé pour les mesures en continu : achat des capteurs, câbles, batteries, centrales de mesure, cartes de stockage des données, piquets et supports.

Ces dispositifs de mesures sont également très sensibles aux aléas, tels que la chute de branches, le passage du gibier (du fait des câbles reliant les capteurs aux centrales de mesure), la salissure des capteurs, l'infiltration d'eau dans les centrales. En particulier il faut prêter une grande attention à la référence, sans laquelle les mesures réalisées par les autres capteurs ne sont pas utilisables.

Il est également nécessaire de réduire le risque d'erreur lié à la mise en place des capteurs. D'une part ceux-ci doivent être positionnés de façon parfaitement horizontale. Il faut d'autre part minimiser la distance entre mesure de référence et mesure sous couvert. En effet lorsque les conditions climatiques sont variables (nuages, averses...), il est important que l'éclairement incident au dessus de la référence et au dessus du couvert où sont situés les points de mesure soient identiques. Si la distance est trop importante, l'éclairement relatif calculé sera faussé par l'utilisation d'une valeur de référence inadéquate.

Enfin les méthodes directes utilisant des capteurs quantiques simples ne permettent pas de discriminer les parts directes et diffuses de l'éclairement. Il est possible de monter les capteurs de manière à séparer les différentes composantes de l'éclairement, mais ces montages sont coûteux et ne peuvent donc pas être multipliés sur le terrain. On se contente en général de mesurer la proportion de diffus dans l'éclairement incident au point de référence. Il faut noter que, dans tous les cas, il est très difficile d'évaluer la part rediffusée de l'éclairement qui est donc le plus souvent incluse dans la mesure de la part diffuse.

Certains systèmes combinant de multiples capteurs permettent de réaliser des mesures intégrant l'éclairement sur une longueur ou une surface données. Nous citerons en particulier les capteurs dits linéaires, composés soit d'un unique capteur rectangulaire allongé soit plus fréquemment d'une série de capteurs ponctuels montés en série ou en parallèle. Ces capteurs permettent d'atténuer les micro-variations spatiales de l'éclairement, comme par exemples celles produites par les tâches de lumière. Il convient cependant de s'assurer de la validité de l'intégration effectuée par le capteur selon le contexte de mesure.

2. Les méthodes indirectes d'estimation de l'éclairement

Les méthodes indirectes sont basées d'une part sur une modélisation du rayonnement incident (au dessus du couvert) en quantité et en trajet, et d'autre part sur une mesure des obstacles (la végétation dans notre cas) à sa transmission vers le point considéré. La façon dont est caractérisé l'obstacle, ainsi que le modèle employé pour obtenir l'éclairement incident, varie d'une méthode à l'autre.

Ces méthodes permettent, à partir d'une mesure ponctuelle dans le temps et dans l'espace, de déterminer l'éclairement relatif sur une période pendant laquelle l'obstacle mesuré (les feuilles des arbres en particulier) peut être considéré comme invariant. La précision de l'estimation et les conditions d'utilisation dépendent de la méthode employée.

De nombreuses méthodes indirectes ont été proposées et évaluées dans la littérature (*Bellow et Nair 2003, Brown et al. 2000, Canham et al. 1990, Comeau 2000, Comeau et al. 1998, Engelbrecht et Herz 2001, Ferment et al. 2001, Gendron et al. 1998, Jennings et al. 1999, Lieffers et al. 1999, Machado et Reich 1999, Parent et Messier 1996*). Nous ne présenterons que la méthode des photographies hémisphériques, que nous avons utilisée sur le dispositif. Cette méthode est reconnue dans la littérature comme l'une des méthodes indirectes les plus intéressantes en termes d'efficacité pratique, de précision et de robustesse. C'est également l'une des plus documentées.

3. La méthode des photographies hémisphériques

Cette méthode a été développée dans les travaux de *Coombe et Evans 1960, Evans et Coombe 1959*, puis ceux de *Anderson 1964, Bonhomme 1974, 1976, Bonhomme et Chartier 1972, Ducrey 1975a, b*. Elle se fonde sur l'utilisation d'une photographie prise avec un appareil sur lequel a été monté un objectif hémisphérique (ou fish-eye). Ce type d'objectif (*Hill 1924*) permet d'obtenir une photographie de l'intégralité de l'hémisphère céleste visible depuis le point de prise de vue. La photographie obtenue représente tous les obstacles aux rayons lumineux provenant des différentes directions du ciel. La méthode consiste à modéliser la répartition du rayonnement incident sur l'hémisphère céleste pour ensuite modéliser l'interception de ce rayonnement par les obstacles présents sur la photographie.

Nous allons maintenant aborder les différentes étapes de cette méthode. Pour plus de détails, il est possible de se référer à *Frazer et al. 1997, Mitchell et Whitmore 1993, Walter 1993, 2000*.

a. Prise de vue

Il faut faire une photographie pour chaque point où l'on souhaite obtenir l'éclairement relatif. Si la période est la saison de végétation, il faut prendre la photographie une fois que le feuillage des arbres est développé et considéré comme stable. Pour l'analyse, il sera fait l'hypothèse que la végétation est dans le même état que sur la photographie pendant toute la période simulée.

Il est important que la photographie soit prise à l'horizontale afin, d'une part, que tout (et uniquement) l'hémisphère céleste soit visible et, d'autre part, que le zénith du ciel soit bien au centre de la photographie. Par ailleurs, le nord géographique doit être repérable sur la photographie, par une marque sur la photographie (système de diode visible sur la photographie) ou bien par un cadrage systématiquement orienté de la même façon par rapport au nord. Ces différents éléments permettront d'obtenir une trajectoire du soleil bien placée sur la photographie lors de son analyse. Il faut également éviter que des éléments végétaux soient trop près de l'objectif, sous peine de surestimer leur influence réelle (du fait de la projection polaire de l'objectif). En général il est conseillé d'éviter qu'un objet soit à une distance de l'objectif hémisphérique inférieure à environ sept fois sa plus grande dimension.

La photographie peut être réalisée en émulsion argentique ou bien à l'aide d'un appareil photographique numérique. Elle peut être prise en noir et blanc ou, de préférence, en couleur. Une résolution importante de la photographie permettra une estimation de l'éclairement plus précise. En argentique une sensibilité entre 100 et 400 ISO est recommandée. En numérique une définition totale de trois millions de pixels est régulièrement utilisée. Nous estimons que cette valeur constitue un minimum. Cinq voire huit millions de pixels nous paraissent plus appropriés.

Une attention particulière doit être portée à l'exposition des photographies car celle-ci conditionnera leur qualité pour les étapes suivantes. En général une mesure d'exposition est faite à l'aide d'un posemètre, l'appareil étant réglé manuellement. Une autre possibilité consiste à utiliser l'automatisme de l'appareil. Une surexposition systématique par rapport à la mesure d'exposition en terrain découvert est recommandée par certains auteurs pour assurer une bonne exposition du ciel (*Walter 2000*). Une autre solution adoptée est d'encadrer la vue prise avec l'exposition mesurée avec des expositions voisines et de choisir *a posteriori* la meilleure photographie. Il faut de plus prendre garde à la vitesse d'obturation qui ne doit pas descendre en dessous de 1/60 (voire 1/125), pour que le mouvement des feuilles et des branches ne soit pas visible sur la photographie. Pour cette raison il est également déconseillé de travailler quand par temps venteux. Il a été montré

(Macfarlane *et al.* 2000) que l'exposition pouvait conditionner les résultats obtenus avec des photographies hémisphériques.

Le point crucial concerne les conditions climatiques lors de la prise de vue. En effet il est important, d'une part, que le disque solaire ne soit pas visible sur la photographie et, d'autre part, que le ciel ait une teinte homogène. La présence du soleil provoque une brillance des feuilles qui tend à les faire disparaître sur les photographies. Un ciel hétérogène (soleil visible, nuages sur fond bleu, ciel gris non uniforme) conduit à un contraste variable selon les zones de la photographie. Cela pose de grands problèmes pour l'étape de seuillage. Par conséquent les conditions conseillées sont soit un temps uniformément couvert, soit les périodes d'aube et de crépuscule (par temps clair) lorsque le soleil n'est pas visible mais que la lumière est suffisante pour prendre les photographies.

b. Obtention d'une image numérique

Dans le cas des photographies en émulsion argentique il faudra procéder au développement des films et à la numérisation des photographies. Il est conseillé de numériser les négatifs plutôt que les tirages papier pour obtenir une meilleure qualité. De plus la numérisation doit être réalisée avec une bonne résolution (au moins cinq millions de pixels résultants).

Dans le cas des photographies numériques il suffit de transférer les photographies sur ordinateur. Cela représente un gain important en temps et en coût (développement et numérisation), mais nécessite d'avoir des cartes mémoires nombreuses et de bonne taille pour éviter les transferts sur le terrain.

c. Seuillage

Cette étape consiste à transformer la photographie d'origine en une photographie en bichromie noir et blanc, le noir représentant le couvert et le blanc le ciel. Pour cela il est possible d'utiliser un logiciel de traitement d'image tel que Adobe Photoshop ou un logiciel spécialisé dans l'analyse des photographies hémisphériques (comme Gap Light Analyzer, *Frazer et al.* 1999).

Si la photographie a été prise en noir et blanc (en réalité en niveaux de gris) le seuillage est réalisé en fixant un niveau de gris limite : au dessus les pixels sont attribués au ciel, et en dessous ils sont attribués au couvert. Dans les cas problématiques où le contraste est hétérogène selon les zones de la photographie, on peut envisager de seuiller séparément chaque zone. Cela peut permettre de gagner en précision sur le seuillage mais fait perdre en répétabilité et prend plus de temps.

Pour les photographies en couleur il est possible soit de travailler par seuillage global (comme en niveaux de gris), soit d'utiliser une couche couleur ou une combinaison de couches. En particulier les feuilles sont plus opaques dans la gamme du bleu ou du rouge que dans celle du vert. Il est ainsi recommandé de seuiller les photographies en couche bleue pour mieux discriminer les éléments végétaux. Là encore, il est possible de seuiller des zones séparément.

Le seuillage n'est jamais parfait du fait que le ciel n'a jamais une teinte complètement homogène. En particulier il est rare que la luminosité au zénith et à l'horizon soient identiques. Le seuillage consiste donc à tenter d'obtenir le meilleur compromis possible. Cela pose le problème de la répétabilité du seuillage, qui dépend forcément de l'opérateur. Si plusieurs opérateurs interviennent dans le seuillage, il est important qu'ils s'étalonent entre eux. De même quand le temps passe (effet de lassitude), ou quand les conditions d'éclairage changent dans la pièce, l'impression visuelle donnée par les photographies peut varier et conduire à des dérives du seuillage. Il faut donc

porter une attention particulière aux conditions dans lesquelles sont effectués les seuillages, et vérifier régulièrement que les différentes photographies d'une même série sont seuillées de la même façon. En particulier on seuillera les photographies dans un ordre aléatoire, plutôt que dans un ordre correspondant aux modalités de l'expérience, afin que les éventuelles dérives de seuillage ne se superposent pas aux modalités étudiées. Cela permet également d'analyser l'effet de l'ordre dans lequel les photographies ont été seuillées (cet ordre doit donc être noté).

Certains auteurs ont proposé des méthodes d'automatisation ou de standardisation du seuillage (*Ishida 2004, Nobis et Hunziker 2005, Wagner 1998*). Ces démarches relativement récentes répondent au besoin de rendre cette étape moins subjective et plus rapide. Il faut signaler que pour envisager l'automatisation du seuillage, une standardisation de l'exposition entre les photographies d'une même campagne de prise de vue semble incontournable.

d. Analyse de la photographie

Pour cette étape, un logiciel conçu à cet effet est utilisé. En particulier on pourra utiliser l'un des logiciels suivants : Gap Light Analyzer (*Frazer et al. 1999*), HemiView (Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK), WinScanopy (Régent Instruments Inc., Québec, Canada), Winphot (*Ter Steege 1997a, b*), Sunshine (*Smith et Somers 1991*) ou Hemimage (*Brunner 1998*).

Le logiciel modélise la répartition de l'éclairage incident dans les différentes directions de l'hémisphère. Un certain nombre de paramètres doivent être spécifiés pour ce calcul : les dates de début et de fin de la période de simulation, la position géographique (latitude, longitude, altitude), le modèle de distribution de la part diffuse de l'éclairage sur l'hémisphère céleste, la part moyenne de l'éclairage diffus pour la période de simulation (P_{dif} voir partie A de ce chapitre), et éventuellement des paramètres – parfois inclus dans le code – décrivant le rayonnement solaire total et les propriétés de l'atmosphère ainsi qu'une résolution pour le découpage de l'hémisphère céleste. La modélisation de la répartition de l'éclairage pour les différentes directions de l'hémisphère fonctionne exactement comme celle utilisée pour les modèles de lumière, qui sera décrite dans la partie correspondante (partie B.4.b de ce chapitre).

Ensuite le logiciel calcule la part de l'éclairage incident interceptée par la végétation et la part transmise au point considéré, à partir de la photographie seuillée, en se basant sur l'analogie aux milieux turbides (ou méthode des fréquences de trous) appliquée à la projection hémisphérique en deux dimensions de la végétation. Cette méthode sera expliquée dans partie B.4.c de ce chapitre. Dans certains logiciels, il est possible de spécifier des masques topographiques pour prendre en compte le confinement éventuel (en montagne par exemple) avant l'interception par la végétation.

Chaque objectif hémisphérique produit une déformation qui dépend de sa formule optique et de sa qualité de fabrication. Il faut donc corriger la photographie seuillée par une courbe de distorsion qui définit la correspondance entre distance depuis le centre de la photographie et angle depuis le zénith du ciel. Cette courbe, spécifique à chaque modèle d'objectif, doit être établie si elle n'existe pas dans la littérature. Si l'établissement de cette courbe n'est pas possible, on peut utiliser une courbe standard (le plus souvent une projection polaire) mais cela conduit à une erreur sur la prédiction de l'éclairage relatif. Pour plus de détails sur les courbes de distorsion et leur établissement, on pourra se référer à *Frazer et al. 1997*.

Une fois ces paramètres spécifiés, le logiciel calcule pour une photographie et une période donnée les parts directe, diffuse et totale de l'éclairage relatif. Certains logiciels peuvent également calculer des données sur les caractéristiques de répartition du feuillage (indice foliaire en

particulier). Ces calculs sont réalisés sous l'hypothèse que les feuilles – représentées par les pixels noirs – sont complètement noires. Les rediffusions ne sont donc pas prises en compte.

e. Argentique ou numérique

L'utilisation d'émulsions argentiques permet encore à l'heure actuelle, d'avoir une meilleure définition de l'image, et est considérée comme plus fiable. En revanche, l'utilisation du numérique permet d'automatiser une partie du processus et ainsi d'économiser du temps et de réduire les coûts. Ces deux solutions ont été comparées par *Englund et al. 2000*, *Frazer et al. 2001* dans le cas d'un appareil numérique d'une définition inférieure à trois millions de pixels. Les différents facteurs influant sur la qualité des résultats issus de photographies numériques ont été testés par *Inoue et al. 2004*. Ces données incitent à la prudence lors de l'utilisation des appareils numériques testés. D'autres études seront nécessaires pour juger pleinement de la qualité relative des simulations issues de photographies numériques, en particulier avec des résolutions plus fortes (cinq millions de pixels et plus).

4. Les modèles de lumière

Le principe des modèles de lumière – ou modèles de transfert radiatif – est de simuler l'éclairement relatif sous couvert à partir d'une modélisation de l'interception de l'éclairement incident par le peuplement forestier, représenté sous une forme géométrique simplifiée. Il existe de nombreux modèles de lumière, qui diffèrent essentiellement par la géométrie utilisée pour représenter le couvert et par la méthode employée pour calculer l'interception du rayonnement. Des revues de ces modèles sont présentés dans *Brunner 1998*, *Courbaud 1997*, *Meloni 1996*, *Myneni et al. 1989*, *Sinoquet 1993*.

a. Représentation du couvert

Certains modèles utilisent une approche surfacique (*Aries et al. 1993*, *Boquera et al. 1997*, *Chelle et Andrieu 1999*, *Chen et al. 1994*, *Dauzat 1993, 1994*, *Goel et al. 1991*, **figure 20**). Ils décrivent les éléments végétaux (feuilles, branches) par des surfaces élémentaires, généralement constituées de triangles. La description du couvert est donc très fine, ce qui permet une évaluation très précise des transferts radiatifs. En particulier cela permet d'obtenir un bilan énergétique à l'échelle de l'organe. Cette approche permet donc une analyse très poussée de la répartition de l'énergie lumineuse au sein d'une ou de quelques plantes. Cependant l'inconvénient de cette approche est la quantité considérable de données nécessaires à leur alimentation. En effet, il faut décrire finement la géométrie des plantes dans l'espace. Certains auteurs utilisent une numérisation en trois dimensions des plantes pour acquérir la position, la taille et l'orientation de tous les éléments végétaux des plantes (*Jacquet et al. 2000*, *Landry et al. 1997*, *Mouliia et Sinoquet 1993*, *Planchais et Sinoquet 1998*, *Rakocevic et al. 2000*, *Sinoquet et Rivet 1997*, *Sinoquet et al. 1997*). La photogrammétrie (reconstitution de la géométrie à partir de photographies) a également été utilisée (*Boissard et al. 1997*, *Mouliia et Sinoquet 1993*). Ces données peuvent être utilisées soit directement dans les modèles de lumière – ce qui limite la simulation à un nombre restreint d'individus – soit pour reconstituer des couverts complets réalistes, comme par exemple dans *Meloni 1996*. Une autre démarche est de reconstituer l'architecture des plantes par des règles de développement (*Barthélémy et al. 1995*, *Dauzat 1993, 1994*, *De Reffye et al. 1986*, *De Reffye et al. 1991*, *Godin 2000*), des méthodes fractales (*Chen et al. 1994*) ou à partir de L-systems (*Gautier et al. 2000*, *Goel et al.*

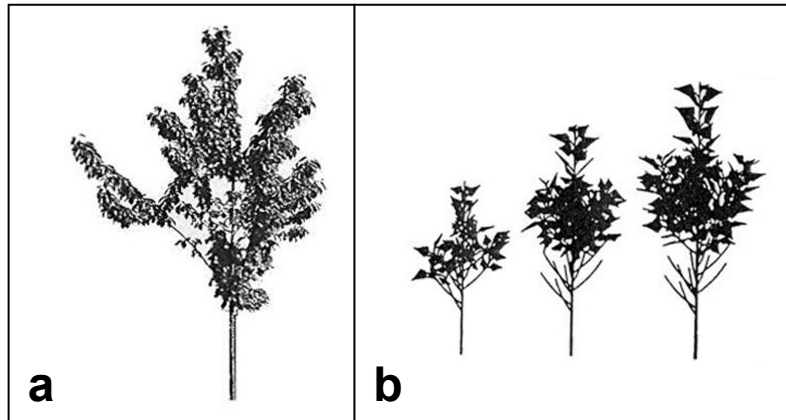


Figure 20 : Représentation des arbres dans les modèles surfaciques : les éléments végétaux sont représentés par des polygones élémentaires. **a** : Merisier digitalisé (source : Meloni 1999). **b** : Reconstitution de peuplier par géométrie fractale (source : Chen et al. 1994).

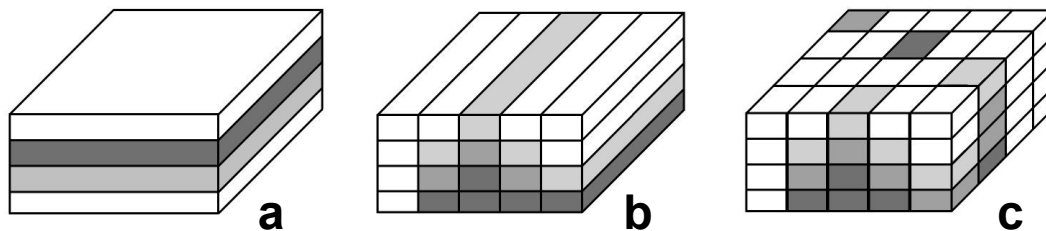


Figure 21 : Représentation des arbres dans les modèles discrets : les éléments végétaux sont contenus dans des volumes élémentaires. Ces volumes peuvent être des niveaux horizontaux (**a**), des tubes à section rectangulaire (**b**) ou des cellules 3D (**c**). Les niveaux de gris plus ou moins intenses représentent des densités de feuillage différentes.

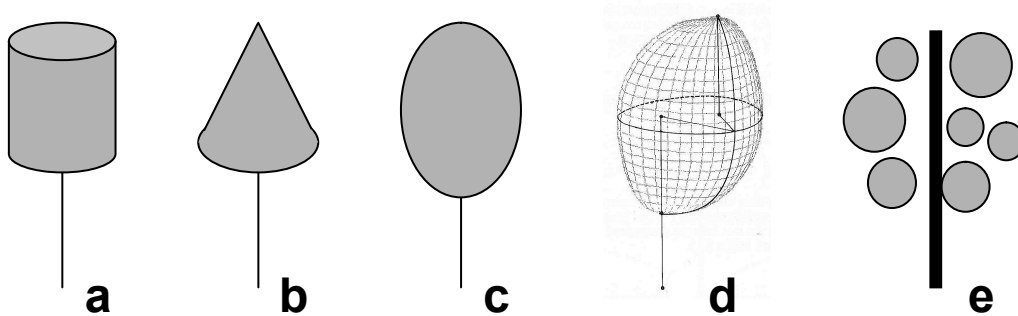


Figure 22 : Représentation des arbres dans les modèles géométriques : le feuillage est réparti dans des volumes délimitant le houppier des arbres. Différentes formes ont été utilisées pour représenter les houppiers : des cylindres (**a**, comme dans Canham et al. 1999), des cônes (**b**, comme dans Bartelink 1995), des ellipsoïdes (**c**, comme dans Bartelink 1995), ou des formes plus complexes (**d**, Cescatti 1997 ; **e**, West et Wells 1992).

1991, Prusinkiewicz 1999). Il faut ajouter que l'approche surfacique est très consommatrice en puissance et temps de calcul.

Les modèles discrets utilisent quant à eux une approche volumique à l'échelle du couvert (**figure 21**). Ils diffèrent entre eux selon le degré de discrétisation de l'espace. Lorsque le couvert étudié peut être considéré comme homogène horizontalement, mais qu'il varie verticalement, comme par exemple dans le cas de futaies régulières, des niveaux horizontaux superposés sont souvent utilisés (Berbigier et Bonnefond 1995, De Castro 2000, Hanan 2001, Kimes et Smith 1980, McMurtrie et Wolf 1983, Wang et Baldocchi 1989). Ce sont les modèles discrets à une dimension. Lorsque l'hétérogénéité s'exprime dans une direction horizontale seulement, comme dans le cas des plantations en rangs, des tubes à section rectangulaires ont été proposés (Planchais et Pontailier 1997, Sinoquet et Bonhomme 1992, Tournebize et Sinoquet 1995). On parle alors de modèles à deux dimensions. Les modèles discrets les plus fins (à trois dimensions) permettent de gérer une hétérogénéité plus complexe par l'utilisation de cellules 3D parallélépipédiques (Comeau 1998, De Castro et Fetcher 1998, Kimes et Kirchner 1982, LeRoux et al. 1997, Meloni 1999, Meloni et Sinoquet 1997). Dans tous les cas le volume élémentaire (niveau, tube ou cellule) a des propriétés définissant une répartition statistique du feuillage : en général une densité de surface foliaire et parfois des données sur la distribution angulaire, azimutale et l'agrégation des feuilles. Ces modèles permettent d'avoir un niveau de complexité adapté au contexte permettant de décrire les phénomènes en fonction de la structuration générale du couvert, sans avoir à prendre en compte explicitement les arbres individuels. Cependant la difficulté est de pouvoir caractériser le contenu de chaque volume élémentaire. Cela est en général réalisé par un échantillonnage des données nécessaires, par mesure systématique sur une maille régulière (Comeau 1998, De Castro 2000) ou par l'analyse de la structuration du couvert et une caractérisation ciblée de la végétation (LeRoux et al. 1997, Meloni 1999, Meloni et Sinoquet 1997, Sinoquet et Bonhomme 1992).

Enfin les modèles géométriques adoptent une approche volumique à l'échelle de l'arbre et de son houppier (**figure 22**). Ils sont bien adaptés à l'analyse de systèmes hétérogènes où la distribution des arbres a une grande importance et où il est difficile de définir une structuration du couvert dans son ensemble. Les houppiers sont représentés par des formes géométriques qui délimitent leur enveloppe. De nombreuses formes différentes ont été employées pour décrire les houppiers : des cylindres (Bégué et al. 1996, Canham et al. 1999, Canham et al. 1990, Stadt et Lieffers 2000), des cônes (Bartelink 1995, Stadt et Lieffers 2000), des ellipsoïdes ou semi-ellipsoïdes (Bartelink 1995, Grace et al. 1987, Mariscal et al. 2004, Mariscal et al. 2000, Pukkala et al. 1993, Wang et Jarvis 1990, West et Wells 1992), des paraboloides (Courbaud et al. 2003, Stadt et Lieffers 2000), d'autres solides de révolution (Courbaud 1995, Stadt et Lieffers 2000, Ter-Mikaelian et al. 1997) ou des formes plus complexes (Brunner 1998, Cescatti 1997, Courbaud 1995, Groot 2004, Koop 1989). Ces dernières permettent de prendre en compte une asymétrie du houppier dans son extension horizontale et parfois même verticale (Cescatti 1997, Groot 2004). D'autres représentations ont été également proposées pour les houppiers sans être implémentées dans un modèle de lumière (Cluzeau et al. 1995, Song et al. 1997). Certains modèles utilisent une représentation plus fine, en définissant un ensemble de volumes à l'intérieur du houppier (Oker-Blom 1989, West et Wells 1992).

b. Distribution du rayonnement incident

Tous les modèles de lumière nécessitent une distribution du rayonnement incident total sur l'hémisphère céleste (**figure 23**). La précision de cette distribution peut varier d'un modèle à l'autre mais le principe reste le même : connaître pour une direction donnée de l'hémisphère céleste la proportion du rayonnement incident qui en provient. Ces calculs se basent d'une part sur des lois

astronomiques fondamentales (*Brock 1981, Iqbal 1983, Spitters 1986, Spitters et al. 1986, Wang et al. 2002*), qui définissent les mouvements relatifs Terre-Soleil et d'autre part sur les propriétés de l'atmosphère, qui conditionnent les parts directe et diffuse de l'éclairement incident (**figure 24**). Il n'y a pas de part rediffusée à ce niveau, car aucun obstacle n'a encore été rencontré.

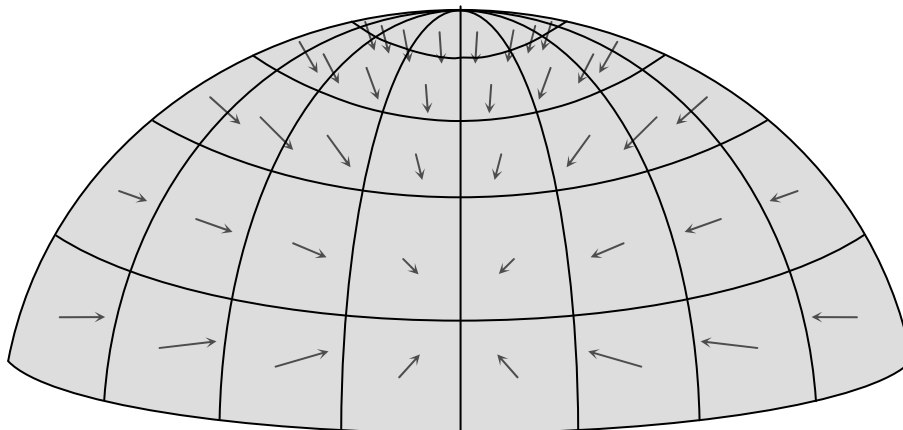


Figure 23 : Pour déterminer la distribution de la part diffuse de l'éclairement incident, l'hémisphère céleste (en gris) est discrétisé en aires de surface égale sur l'hémisphère. Chaque aire correspond à une direction de provenance des rayons lumineux (représentée par des flèches en pointillés). Dans un modèle de distribution de l'éclairement diffus, chacune de ces directions représente une certaine proportion du rayonnement total.

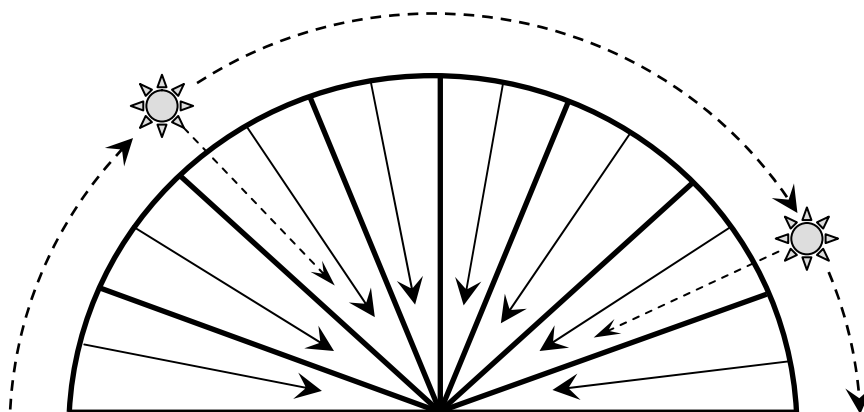


Figure 24 : Pour obtenir la distribution de l'éclairement total, la distribution hémisphérique discrétisée du rayonnement diffus (flèches en trait plein) est combiné à un calcul de la course du soleil (en pointillés) sur la période étudiée.

Pour la part directe, il faut connaître la trajectoire du soleil. Elle est obtenue à partir des dates de début et de fin de la période de simulation et de la position géographique (latitude, longitude, altitude). Une échelle d'échantillonnage sur cette trajectoire est en général définie (souvent toutes les une ou deux minutes), et une part du rayonnement est affectée à chaque position du soleil, sur la période de simulation.

Pour la part diffuse du rayonnement il faut spécifier un modèle de répartition du rayonnement sur l'hémisphère céleste. En général sont proposés le modèle UOC (uniform overcast sky conditions), où la luminosité du ciel est homogène, et le modèle SOC (standard overcast sky conditions), où la luminosité est plus forte près du zénith. Pour plus de détails sur ces distributions voir *Brunner 1998, Courbaud 1997, Mitchell et Whitmore 1993*.

La répartition entre les parts directe et diffuse est en général fixée par la proportion de diffus moyenne P_{dif} (définie en partie A de ce chapitre) sur toute la période de simulation. Certains modèles utilisent les données météorologiques pour déterminer des valeurs journalières de P_{dif} .

c. Interception du rayonnement incident

Plusieurs grandes méthodes (et leurs nombreuses variantes) permettant d'évaluer l'interception du rayonnement incident par un couvert ont été utilisées dans les modèles de lumière. Elles ont été revues en particulier dans *Aries et al. 1993*. Certaines permettent d'établir un bilan radiatif précis pour chaque surface ou volume élémentaire, alors que d'autres calculent l'éclairement transmis en un (plusieurs) point(s) de l'espace. Les rediffusions peuvent être prises en compte de façon plus ou moins précise, ou bien négligées. Pour le détail des différentes méthodes et de leur domaine d'application on pourra se référer à *Aries et al. 1993, Myneni et Ross 1991, Myneni et al. 1989, Ross 1981*. Nous allons succinctement décrire ici la méthode la plus fréquemment utilisée dans les modèles volumiques discrets ou géométriques : la méthode de l'analogie aux milieux turbides (*Sinoquet 1993, Sinoquet et al. 1995, Sinoquet et al. 1993*), initialement proposée par *Monsi et Saeki 1953*. En effet, c'est la méthode employée dans le modèle de lumière que nous avons utilisé.

Cette méthode repose sur la notion de fréquence de trouée ou probabilité de non interception. Il s'agit, dans une direction donnée, de la proportion de ciel visible à travers un feuillage lorsqu'on le regarde dans cette direction. Cette proportion est égale à la probabilité pour qu'un rayon provenant de cette direction ne soit pas intercepté par le feuillage. Dans cette approche, les feuilles sont donc considérées comme totalement opaques et absorbantes : les rediffusions ne sont pas prises en compte. De plus l'hypothèse est faite que le feuillage contenu dans les volumes élémentaires – niveaux, tubes ou cellules pour les modèles discrets, volumes représentant les houppiers pour les modèles géométriques – est analogue à un milieu turbide (comme une solution de chlorophylle par exemple), c'est-à-dire un milieu homogène où les particules ont une taille infiniment faible par rapport au volume les contenant. Sous ces hypothèses, la loi de Bouguer (aussi nommée loi de Beer Lambert) est applicable pour définir la fréquence de trouée P_0 dans une direction du rayonnement donnée :

$$P_0 = e^{-\mu \cdot K \cdot LAI}$$

où le LAI est l'indice foliaire (quantité de surface foliaire par unité de surface du sol), K le coefficient d'extinction et μ le paramètre d'agencement du feuillage. K dépend de la distribution de l'inclinaison et de l'azimut des feuilles, ainsi que de la direction du rayonnement considérée. μ est respectivement supérieur, inférieur ou égal à 1 pour une distribution des feuilles régulière, agrégée ou aléatoire.

Dans l'hypothèse – faite par de nombreux modèles de lumière – d'une distribution sphérique ($K = 0,5$) et aléatoire ($\mu = 1$) des feuilles, on obtient :

$$P_0 = e^{-0,5 \cdot LAI}$$

où LAD est la densité de surface foliaire (surface de feuilles par unité de volume, en $m^2 \cdot m^{-3}$) et L la longueur de trajet dans le volume contenant le feuillage.

A partir de cette loi de la distribution du rayonnement sur l'hémisphère céleste considérée et de la distribution des paramètres LAD et L , on obtient l'éclairement relatif en tout point de l'espace pour la période considérée.

Selon les modèles de lumière, les hypothèses sur la distribution du feuillage sont plus ou moins fortes. Cependant il faut noter que plus la distribution du feuillage est décrite précisément, plus il est nécessaire de fournir de paramètres sur cette distribution. Or certains paramètres tels que μ ne sont pas facilement mesurables sur le terrain, et leur modélisation constitue une étude à part entière (Giuliani et al. 2005).

En outre, il est possible de tenir compte des rediffusions, par exemple en utilisant le concept de fonction de phase (Sinoquet 1993, Sinoquet et al. 1995, Sinoquet et al. 1993) qui définit la probabilité pour un rayon d'une direction donnée d'être renvoyé vers une autre direction. Selon les modèles, les rediffusions sont négligées ou bien traitées avec plus ou moins de précision.

C. Caractérisation de l'éclairement sur le dispositif

1. Choix d'un modèle de lumière

Comme nous l'avons indiqué en introduction nous analyserons l'éclairement sous couvert en fonction de la structure du couvert à l'aide d'un modèle de lumière : tRAYci (Brunner 1998). Nous allons maintenant expliquer les raisons du choix de ce modèle.

Nous avons besoin d'un modèle implémenté et disponible, afin de pouvoir l'utiliser directement. Étant donné que nous nous intéressons à la relation entre structure du couvert et lumière à l'échelle du peuplement, les modèles surfaciques étaient trop gourmands en données dans notre contexte. De même nous ne souhaitons pas faire de bilan radiatif à l'échelle intra arbre, mais obtenir l'éclairement en différents points sous couvert. Les modèles utilisant l'approche de la fréquence de trous ont donc été privilégiés. Enfin, comme nous travaillons en couvert hétérogène, où les houppiers semblent très asymétriques, nous avons choisi d'utiliser un modèle géométrique capable de gérer des houppiers irréguliers. Il ne fallait cependant pas que l'alimentation du modèle soit trop coûteuse en temps de mesure. La gestion de houppiers irréguliers dans leur extension de houppier nécessite la mesure de plusieurs rayons de houppiers (azimut, longueur). La gestion supplémentaire d'une irrégularité de l'extension verticale du houppier (Cescatti 1997), demande en plus pour chaque rayon de connaître sa hauteur (hauteur de plus grande largeur de houppier dans sa direction). Nous avons estimé que ce deuxième niveau d'irrégularité était trop coûteux par rapport au raffinement de la représentation du houppier qui en découle. En effet, la mesure de la hauteur de plus grande largeur de houppier dans plusieurs directions pour chaque arbre est longue et difficile à acquérir sur le terrain. Nous nous sommes donc limités à une représentation dans laquelle tous les rayons de houppiers sont placés à une même hauteur de plus grande largeur de houppier. Le modèle tRAYci (Brunner 1998) nous a paru être le meilleur compromis pour l'ensemble des critères énoncés. De plus ce tRAYci était facilement accessible et son auteur, Andreas Brunner, nous a fourni une assistance scientifique et technique tout au long de la thèse pour l'utilisation de son modèle. En particulier l'auteur a implémenté quelques adaptations spécialement pour notre étude, dont un mode script non interactif qui a permis d'automatiser les simulations depuis le module *regelight* de Capsis 4 (Piboule 2002).

Du fait qu'une grande part de notre travail est fondée sur l'utilisation de ce modèle, nous avons souhaité le calibrer et le valider par rapport à des méthodes éprouvées. Nous avons donc également mis en place des capteurs de lumière et réalisé des photographies hémisphériques sur le dispositif.

2. Mesure directe de l'éclairage à l'aide de capteurs

a. *Échantillonnage*

Pour la mesure ponctuelle du PAR, nous avons utilisé des capteurs composés de cellules au silicium amorphe CBE de marque Solems (*Chartier et al. 1989*), que nous avons préalablement étalonnés. Étant donné que les mesures réalisées avec les capteurs avaient pour but d'être comparées à des simulations du modèle tRAYci, où la régénération n'est pas prise en compte, nous devions placer des capteurs CBE dans des zones où la régénération n'était pas présente. Étant donné les moyens techniques dont nous disposions (une cinquantaine de capteurs CBE et cinq centrales de mesure) nous avons réalisé un échantillonnage par transects dans des trouées de différentes tailles afin d'obtenir des éclairages variés (**figure 25**).

En placette 1, nous avons mis en place deux transects de 10 capteurs CBE chacun dans chacune des deux trouées issues de la tempête de 1999 (de 1,5 et 4,5 ares, présentées au chapitre I). Dans la trouée de 1,5 ares, la partie principale du transect 1 (composée de 8 capteurs) faisait 28 m de longueur avec un espacement de 4 m entre les capteurs. Les deux autres capteurs ont été positionnés au centre de la trouée, en quinconce par rapport à la partie principale du transect. Les capteurs du transect 1 ont été numérotés de 1 à 10. Dans la trouée de 4,5 ares, le transect 2 mesurait 36 m de longueur avec un espacement de 4 m entre les capteurs. Les capteurs du transect 2 ont été numérotés de 11 à 20. Les trois capteurs (n°18, 19 et 20) les plus au nord du transect 2 étaient situés légèrement hors de la zone d'étude.

En placette 2, nous avons mis en place un unique transect de 56 m de longueur qui était constitué de 20 capteurs (transect 3). Ce transect était situé à la limite Ouest de la zone d'étude et son centre correspondait à la lisière de la grande trouée, afin qu'il permette d'échantillonner la transition entre couvert fermé et plein découvert. L'espacement maximal entre les capteurs était de 4 m, mais était réduit à 2 m sur une longueur de 10 m de part et d'autre de la lisière. Les capteurs du transect 3 étaient numérotés de 21 à 40.

Tous les capteurs ont été fixés, sur des piquets solidement enfoncés dans le sol, à l'aide de supports garantissant leur horizontalité, à une hauteur proche de 1,50 m. La hauteur et la position de chaque capteur ont été mesurées après leur mise en place. Lorsqu'un semis était plus haut que les capteurs, il était supprimé ou rabattu. Le transect 3 correspondait à une zone de régénération assez basse, en tout cas sur une bonne partie. Seuls les trois capteurs les plus au Sud (n° 21, 22 et 23) du transect 3 subissaient une influence significative de la régénération. Ils seront donc exclus des comparaisons avec le modèle tRAYci.

Chaque capteur était relié à une centrale de mesure CR10 Campbell : une pour le transect 1, une pour le transect 2, et deux pour le transect 3. Les câbles ont été positionnés de façon à éviter au maximum les problèmes dus au passage du gibier.

Une référence a été mise en place à moins de 500 m des transects, dans une parcelle voisine (plantation au stade gaulis). Les capteurs y ont été montés sur des mâts dans une clairière de façon à être en plein découvert. Nous avons utilisé trois capteurs CBE, qui ont servi de mesure de référence

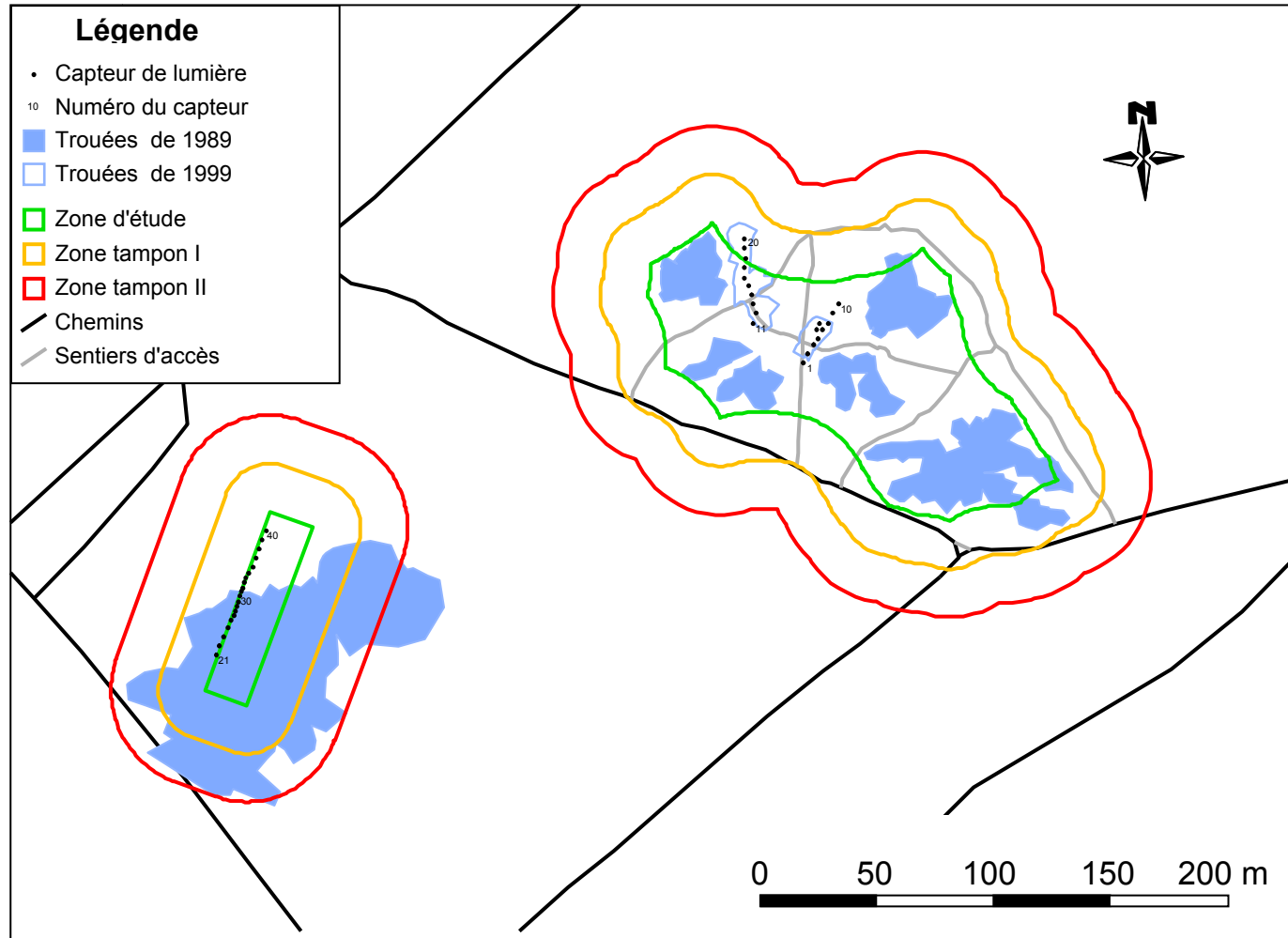


Figure 25 : Localisation des capteurs de lumière CBE sur le dispositif. Au niveau de chaque capteur une photographie hémisphérique a également été prise (photographies de la série 1).

pour le calcul de l'éclairage relatif. L'utilisation de trois capteurs permettait de faire face à une défaillance éventuelle de l'un d'entre-eux. De plus nous avons mis en place un capteur direct/diffus BF2 (Delta-T Devices Ltd), qui a permis d'évaluer la proportion de diffus P_{dif} sur la période de mesure. Tous ces capteurs étaient reliés à une centrale CR10 Campbell.

b. Étalonnage des capteurs

Une cinquantaine de capteurs CBE (transects et référence) ont été étalonnés pendant deux jours ensoleillés consécutifs les 17 et 18 mai 2004. Un étalonnage sur deux jours et par temps ensoleillé avait pour but d'obtenir la gamme de PPFD la plus étendue possible (faibles éclairagements au coucher du soleil et forts éclairagements autour de midi). Pour l'étalonnage, les capteurs ont été positionnés côte à côte, horizontalement en plein découvert. La mesure a été faite en continu du 17 mai à 11 h jusqu'au 18 mai à 15 h. Pendant cette période le temps a été ensoleillé avec quelques nuages. Un capteur linéaire quantique PAR LI-191SB (Li-Cor Inc., *LI-COR 1986*), étalonné par le constructeur, a également été mis en place à l'horizontale, et a fonctionné pendant la même période. Ce dernier capteur a servi de référence pour l'étalonnage des capteurs CBE. L'utilisation d'un capteur LI-COR ponctuel LI-190SB (*LI-COR 1986*) aurait été l'idéal, mais nous n'en disposions pas.

Pour chaque capteur CBE nous avons tracé le voltage mesuré en fonction de la valeur de PPFD mesurée par le LI-191SB. Un polynôme d'ordre quatre a été ajusté pour chaque capteur. La **figure 26** montre un exemple de courbe d'étalonnage. Les paramètres de ces ajustements permettent d'obtenir le PPFD à partir du voltage mesuré. La réponse théorique est linéaire, mais nous avons constaté une légère courbure, ce qui nous a conduit à l'utilisation d'un polynôme. Les capteurs ont été étalonnés sur une large gamme de PPFD (entre 0 et 1870 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$). Les courbes d'étalonnage seront donc a priori utilisées dans leur gamme d'ajustement. Nous avons choisi les 43 capteurs CBE nécessaires pour les mesures, en sélectionnant ceux qui avaient les meilleurs ajustements, en termes de qualité du nuage de points. Tous les capteurs utilisés sur le dispositif avaient de très bons ajustements, avec des nuages de points non biaisés et des valeurs de R^2 supérieures à 0,99.

c. Période de mesure et traitement des données

Des mesures ont été réalisées en continu du 4 juin au 8 novembre 2004. Cependant du fait du dysfonctionnement de certaines centrales (en particulier celle du transect 1), la seule période où nous ayons tous les capteurs simultanément s'étend du 25 juin au 18 août 2004, avec un trou pour le 10 juillet 2004. Cela fait un total de 54 jours consécutifs. Les mesures étaient prises toutes les minutes et une valeur moyenne était stockée toutes les 15 minutes.

Pour chaque capteur, nous avons utilisé les courbes d'étalonnage pour calculer le PPFD à partir du voltage mesuré. La gamme de mesure ne s'étendait pas au-delà du domaine d'étalonnage, ou suffisamment peu pour que cela reste dans un domaine où les polynômes ajustés avaient un bon comportement qualitatif.

Pour chaque capteur CBE (sous couvert ou référence), nous avons calculé la somme Σ_{PPFD} des PPFD enregistrés toutes les 15 minutes sur la totalité de la période de mesure. Pour obtenir l'éclairage relatif ($ER\%$) d'un capteur, nous avons divisé la Σ_{PPFD} du capteur par la moyenne des trois Σ_{PPFD} des capteurs CBE de référence, et multiplié par 100 pour obtenir une valeur en pourcentage.

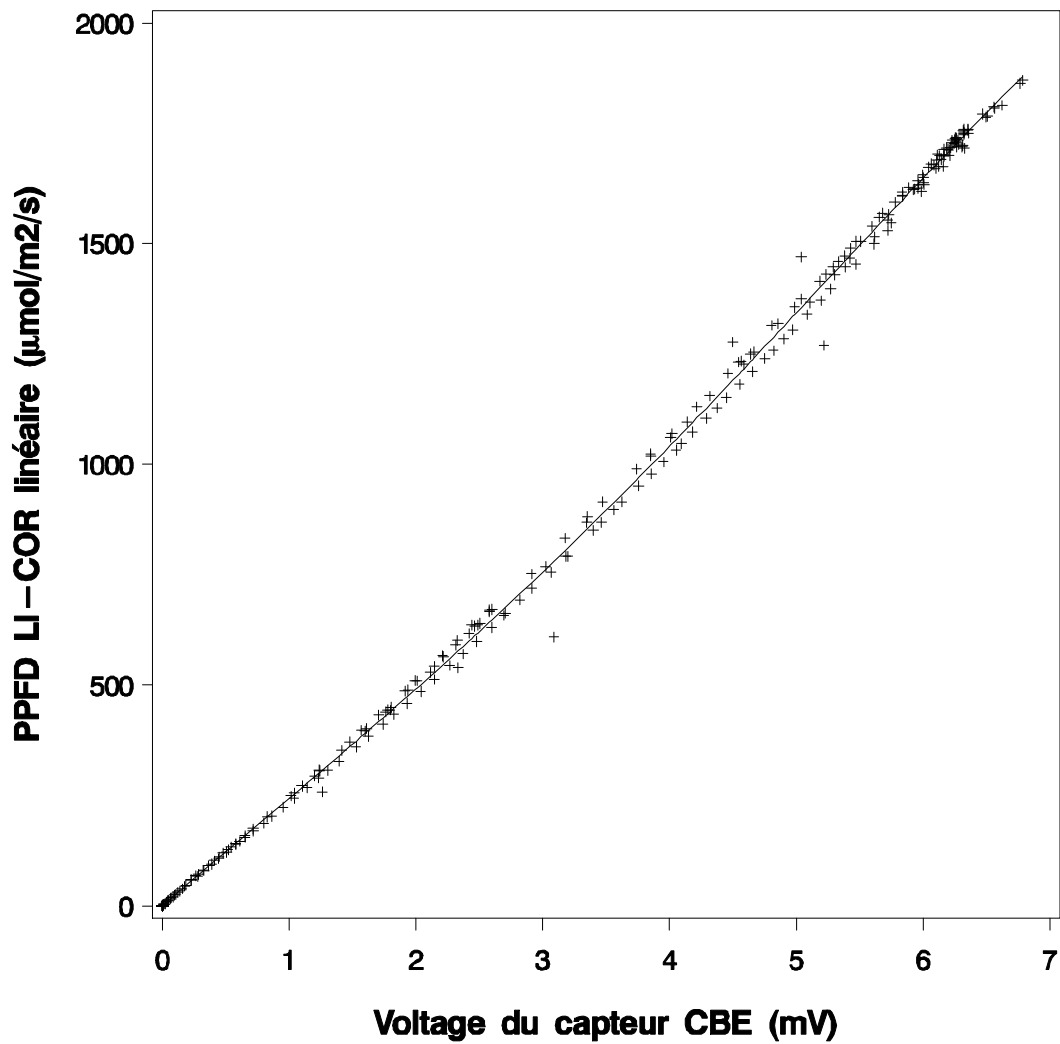


Figure 26 : Exemple de courbe d'étalonnage d'un capteur CBE par rapport au capteur linéaire quantique LI-COR LI-191SB. Les symboles + représentent les valeurs mesurées, et la courbe en trait plein l'ajustement d'un polynôme d'ordre 4. Les écarts de part et d'autre de la courbe ajustée traduisent un léger défaut d'horizontalité du capteur.

Pour le diffus/direct, le capteur BF2 donne directement la valeur du PPFD diffus et total. Nous avons calculé les sommes Σ_{Diffus} et Σ_{Total} des PPFD enregistrés toutes les 15 minutes respectivement pour le diffus et le total. La proportion de diffus P_{dif} sur la période a été calculée comme suit :

$$P_{dif} = \frac{\sum Diffus}{\sum Total}$$

Nous avons obtenu une valeur de P_{dif} de 48,69 %. Sur la période de mesure, nous avons constaté une bonne répartition des différentes conditions climatiques. Sur 54 jours nous avons eu environ 11 jours ensoleillés, 12 jours ensoleillés avec quelques nuages, 17 jours nuageux et 14 jours très nuageux. Ces nombres ont été obtenus à partir de l'observation des courbes journalières du PPFD pour la référence, et n'ont donc qu'une valeur indicative.

Pour la période de mesure (25 juin au 18 août 2004), nous avons également constaté une bonne relation à l'échelle de la journée, entre la proportion de diffus P_{dif} et l'éclairement total moyen (PPFD journalier, **figure 27**).

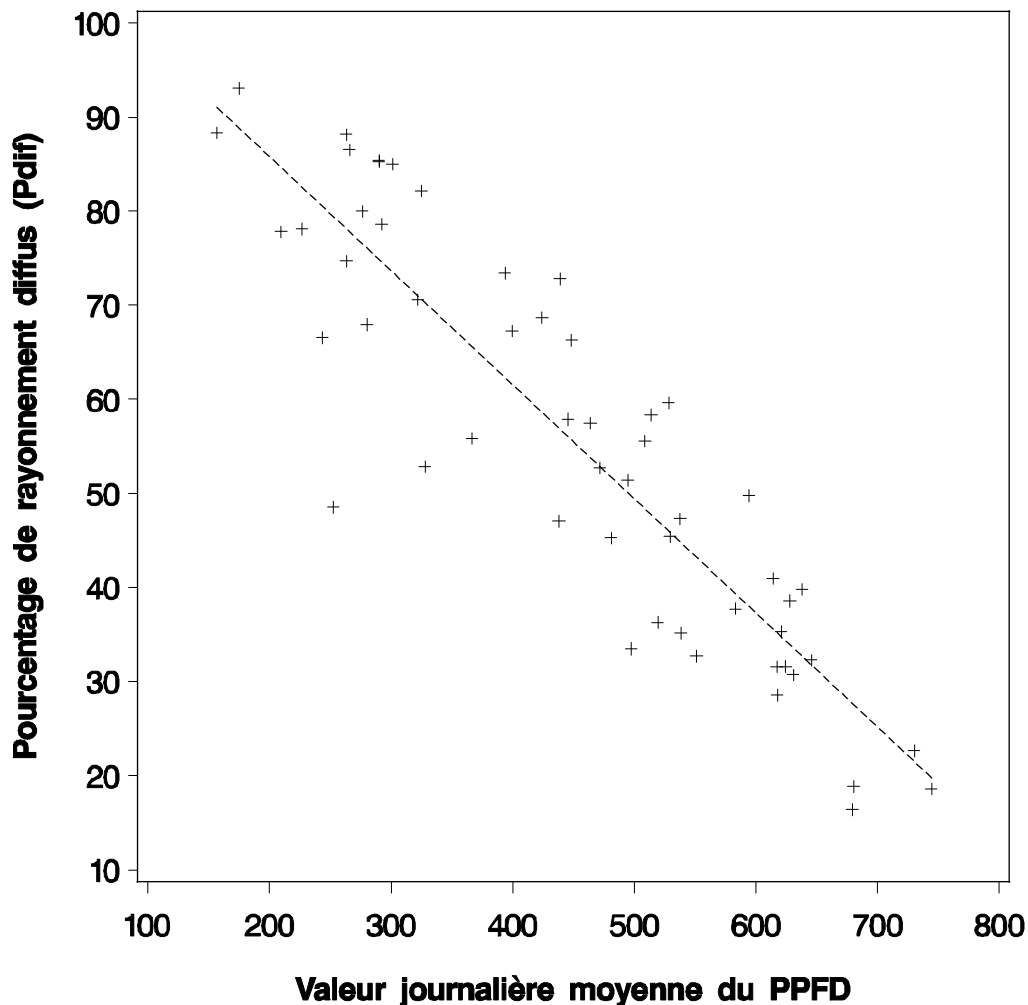


Figure 27 : Relation entre les valeurs journalières du P_{dif} (exprimé en %) et du PPFD moyen (densité de flux de photons, en $\mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$, moyenne calculée sur la journée complète à partir des valeurs moyennes enregistrées toutes les 15 minutes). La droite de régression est figurée en pointillés. Le modèle de régression est très significatif ($p < 0,0001$) et le R^2 vaut 0,81.

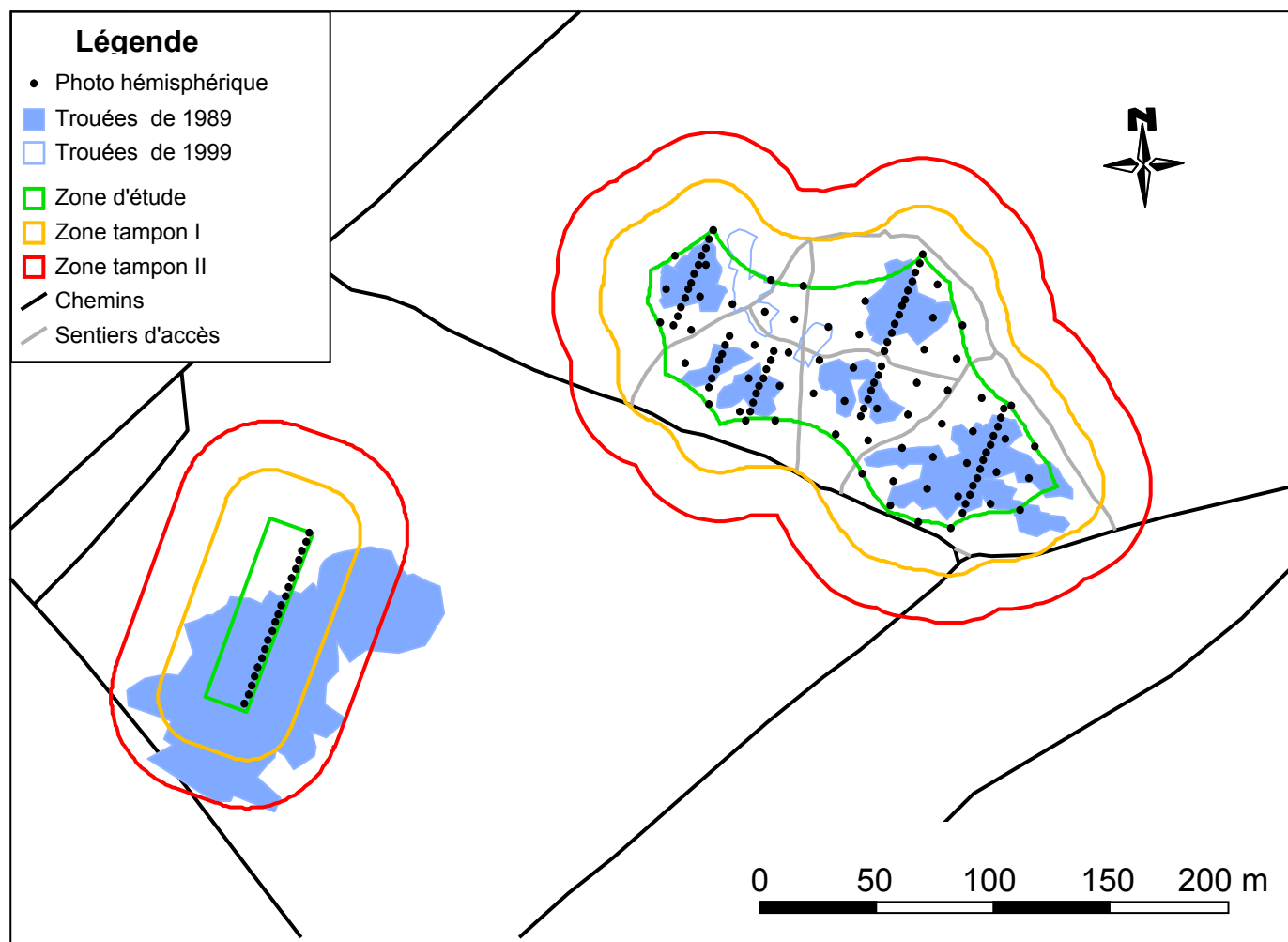


Figure 28 : Localisation des emplacements où ont été prises les photographies hémisphériques de la série 2 (au dessus des placeaux de régénération).

3. Estimation de l'éclairage à l'aide de photographies hémisphériques

a. Échantillonnage

Pour compléter les mesures directes, échantillonnant une faible proportion de la surface du dispositif, nous avons réalisé des photographies hémisphériques sur l'ensemble des deux zones d'étude. Nous avons tout d'abord réalisé une photographie au dessus de chaque capteur (**figure 25**), afin de pouvoir comparer les deux méthodes (40 clichés). C'est ce que nous appellerons la série 1.

Nous avons réalisé une seconde série de photographies (série 2, **figure 28**). Pour cela nous nous sommes appuyés sur l'échantillonnage des placeaux de régénération pour définir les points de prises de vue. En effet, le positionnement des placeaux a été conçu de façon maximiser la variabilité des conditions d'éclairage et couvrir au maximum le dispositif (voir chapitre I). Cependant nous n'avons pas fait des photographies pour tous les placeaux afin de limiter le nombre de photographies à réaliser.

En placette 1, nous avons fait une photographie pour chaque placeau des transects Sud-Sud-Ouest / Nord-Nord-Est (azimuts 225 gr et 25 gr) dans les trouées. De plus, nous avons également fait une photographie pour chaque placeau d'analyse de la maille systématique, excepté lorsque le placeau en question était situé à proximité immédiate d'une des photographies déjà réalisées. En placette 2, nous avons fait une photographie pour chaque placeau du transect le plus à l'Est.

Les photographies ont été prises à une hauteur d'environ 1,50 m, sauf lorsque la régénération était présente au dessus de cette hauteur et qu'il n'était pas possible de la rabattre sans l'endommager pour la durée de la prise de vue. Dans ce cas la photographie était prise à une hauteur correspondant au sommet de la régénération. Dans tous les cas la hauteur de prise de vue a été notée. La hauteur maximale de prise de vue était d'un peu moins de huit mètres. En tout la série 2 comportait 137 photographies.

b. Conditions de mesure

Toutes les photographies ont été prises entre le 16 juin et le 20 juillet 2004. Une première campagne de prise de vues (et de mesures avec les capteurs CBE) a été réalisée en 2003. Mais, du fait de la chute précoce des feuilles fin juillet en réaction à la canicule record de cette année, l'immense majorité des photographies était inexploitable. Nous n'avons donc utilisé que les photographies récoltées en 2004. La majorité des photographies a été prise les soirs lorsque le disque solaire n'était plus visible et par temps clair, pour avoir des conditions optimales de prise de vue. Cependant une grande partie du mois de juillet a été nuageuse, nous empêchant de faire toutes les photographies dans ces conditions. Une quarantaine de photographies ont donc été réalisées lors de deux journées par un temps gris très homogène, dans de bonnes conditions.

Nous avons pris les photographies en couleur à l'aide d'un appareil numérique Nikon CoolPix 5000 équipé d'un objectif Fisheye Nikon FC-E8 (**figure 29**). Nous avons utilisé une définition totale de cinq millions de pixel (soit un peu plus de 1,8 millions de pixels pour le cercle image) et un format TIFF non compressé. Le choix du numérique a été fait pour des raisons de coût et d'efficacité. C'était de plus l'occasion de tester le Nikon CoolPix 5000 récemment acquis par le laboratoire. Pour l'exposition nous avons utilisé le mode automatique de l'appareil, pour des raisons d'efficacité sur le terrain. Tous les autres automatismes ou systèmes de correction étaient désactivés.



Figure 29 : Appareil numérique utilisé pour les photographies hémisphériques, le Nikon CoolPix 5000, équipé de l'objectif Fisheye Nikon FC-E8.



Figure 30 : Dispositif autostabilisé, permettant de garantir l'horizontalité de la prise de vue.

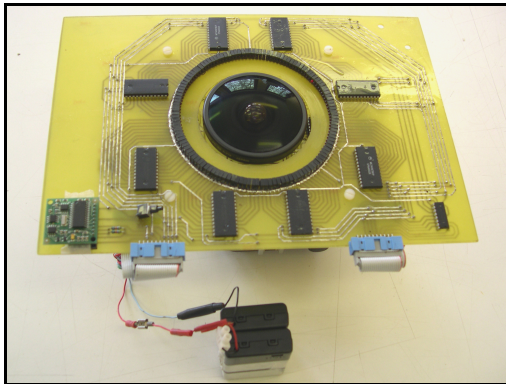


Figure 31 : Dispositif permettant de visualiser sur la photographie à l'aide d'une diode rouge la direction du nord lors de la prise de vue.



Figure 32 : Système permettant le déclenchement à distance de la prise de vue, à l'aide d'une télécommande infrarouge. Ce système, le Digisnaps 2000 (Harbortronics) est connecté à l'appareil numérique par un câble.

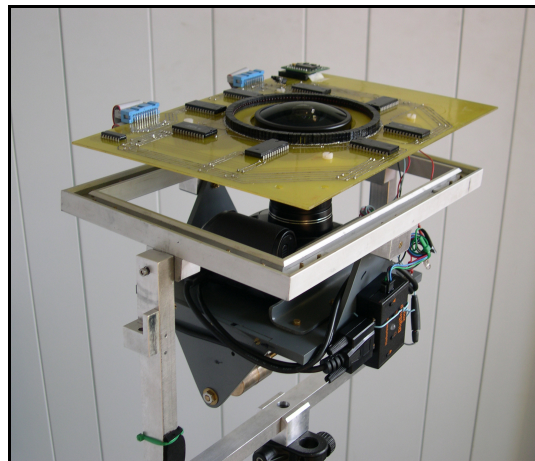


Figure 33 : Système complet de prise de vue, regroupant l'appareil numérique et son objectif Fisheye, le dispositif d'auto-stabilisation de l'horizontalité, le dispositif de repérage du Nord et le système de déclenchement à distance.

Nous avons élaboré un système mécanique auto-stabilisé (**figure 30**) permettant de garantir l'horizontalité de l'appareil lors de la prise de vue. Cela nous a permis non seulement de gagner du temps de mesure mais aussi de prendre des photographies à l'horizontale même en hauteur.

De plus nous avons mis au point un système composé d'une boussole électronique et de 128 diodes réparties autour de l'objectif fisheye, permettant de repérer le Nord sur la photographie de façon automatisée sur le terrain (**figure 31**). Cela nous a permis un gain de temps de mesure considérable et une diminution du risque d'erreur concernant l'orientation de l'appareil. Il faut noter que c'est le Nord magnétique et non géographique qui est repéré, la prise en compte de la déclinaison devant se faire lors du traitement des photographies au laboratoire. Dans notre cas la déclinaison était négligeable (d'une valeur absolue inférieure à 0,15 grades). Nous avons donc utilisé le nord magnétique pour l'orientation des photographies.

Les gains de temps sur terrain du fait de ces systèmes sont d'une grande importance étant donné que le créneau pour les prises de vue (crépuscule) est particulièrement court : entre 30 et 45 minutes par soirée.

De plus nous avons utilisé un système infrarouge (Digisnaps de Harbortronics, **figure 32**) pour le déclenchement de la prise de vue à distance, ce qui nous a en particulier permis de prendre des photographies en hauteur (au dessus de la végétation), jusqu'à près de huit mètres.

La **figure 33** présente le dispositif de prise de vue dans son ensemble.

c. Traitement des données

Les photographies ont été transférées sur PC, recadrées autour du cercle image et orientées de façon à ce que le Nord soit toujours en haut et au centre de l'image. Le fisheye utilisé ayant un angle hémisphérique d'un peu plus de 180 degrés, un nouveau cercle image a été défini à 180 degrés et tous les pixels situés hors du nouveau cercle ont été colorés en noir.

Nous avons établi la courbe de distorsion de l'ensemble composé du fisheye FC-E8 et du CoolPix 5000, selon une méthode utilisée par *Frazer et al. 2001, Frazer et al. 1997*, afin d'obtenir un calcul de l'éclairage le plus fiable possible. Ainsi nous avons mis en place un dispositif technique permettant d'obtenir une photographie où des repères, dont nous avons mesuré l'angle zénithal, étaient visibles. Sur la photographie, nous avons déterminé la distance en pixels entre le centre du cercle image et chaque point. Nous avons ainsi obtenu une correspondance entre distance depuis le centre de la photographie et angle zénithal. Nous avons ajusté un polynôme d'ordre 6 (avec une ordonnée à l'origine nulle), qui constitue la courbe de distorsion pour l'ensemble composé de l'objectif FC-E8 et du CoolPix 5000 :

$$Y = 9,7058 \cdot X - 1,2722 \cdot 10^{-1} \cdot X^2 + 24,7366 \cdot 10^{-3} \cdot X^3 - 8,5802 \cdot 10^{-5} \cdot X^4 + 7,3030 \cdot 10^{-7} \cdot X^5 - 2,3799 \cdot 10^{-9} \cdot X^6$$

Y est la distance d'un point en pixels depuis le centre du cercle image et X l'angle zénithal de ce point en degrés. La **figure 34** montre la courbe ajustée, en comparaison avec celle obtenue par *Frazer et al. 2001* pour l'ensemble composé du fisheye FC-E8 et du CoolPix 950, et avec la projection polaire théorique (relation linéaire entre la distance et l'angle). Le R^2 est de 0,99999.

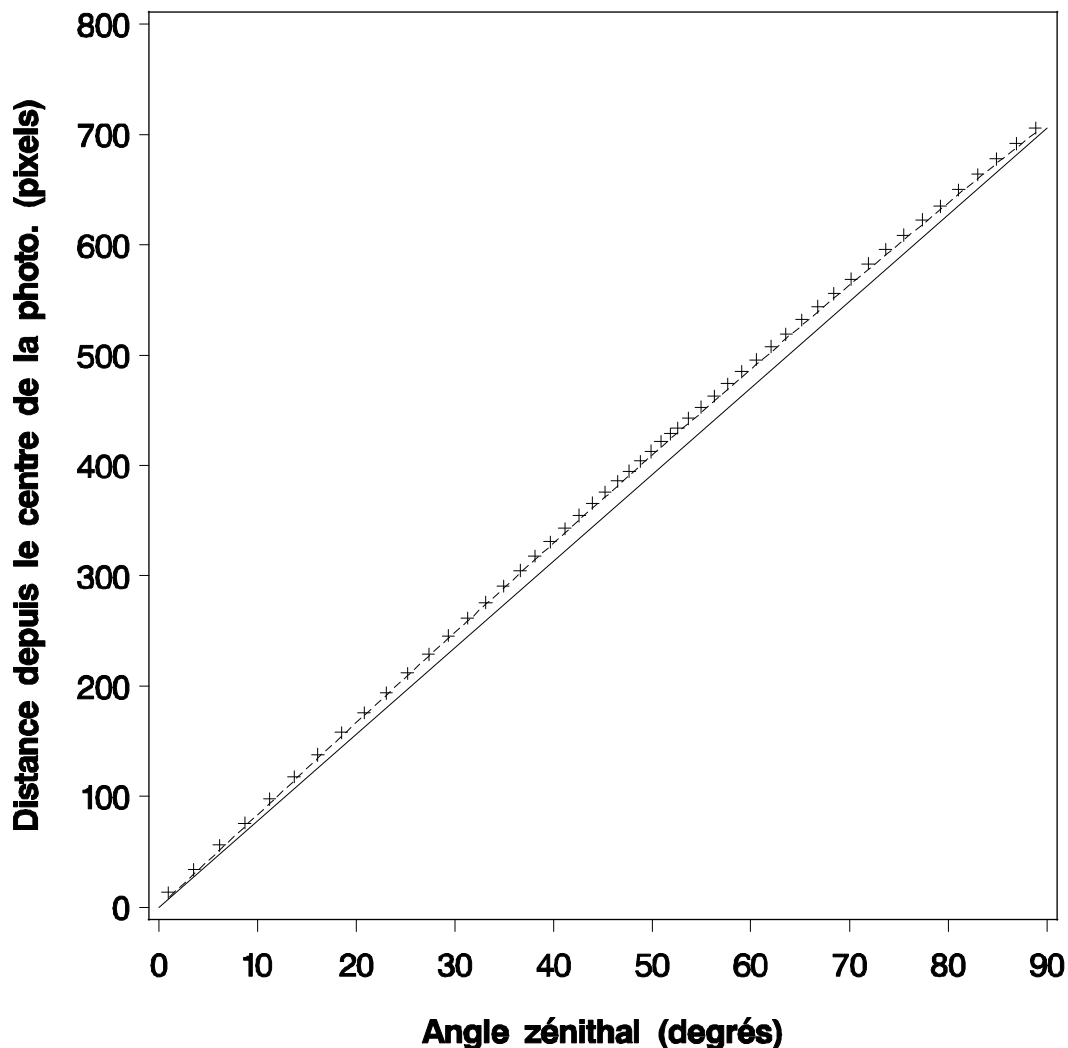


Figure 34 : Courbe de distorsion de l'ensemble CoolPix 5000 et Fisheye FC-E8. Elle définit pour un point la relation entre sa position sur la photographie (distance par rapport au centre, exprimée en pixels), en fonction de la distance angulaire depuis la verticale (angle zénithal) reliant ce point au centre optique de l'objectif. Le graphique permet de comparer la courbe que nous avons établie (symboles +), à celle obtenue par Frazer et al. 2001 pour l'ensemble CoolPix 950 et Fisheye DC-E8 (courbe en pointillé), et la projection polaire théorique (linéaire, en trait continu).

Le seuillage des photographies a été réalisé à l'aide du logiciel Photoshop 6, en utilisant uniquement la couche bleu, où les feuilles sont théoriquement les plus opaques. L'observation préalable des photographies a montré deux défauts importants : d'une part des aberrations chromatiques (halos cyan et pourpres) comme celles constatées par Frazer et al. 2001, et d'autre part une tendance à la surexposition du ciel particulièrement marquée pour les photographies prises sous couvert très fermé. En dehors de cela les photographies étaient de très bonne qualité. L'effet de surexposition du ciel a pour conséquence d'atténuer le feuillage près des zones de ciel visibles (**figure 35**). Nous avons donc réalisé un seuillage très conservatif, c'est-à-dire où nous avons tenté de récupérer le plus de feuillage possible, même si celui-ci était peu marqué sur la photographie. Pour les photographies sous couvert très fermé, le seuil obtenu était très proche du maximum possible (255), ce qui nous fait penser que la surexposition du ciel nous conduit dans ce cas à ne pas pouvoir obtenir toute les feuilles présentes dans la réalité et donc à sous estimer la quantité d'éléments végétaux pour

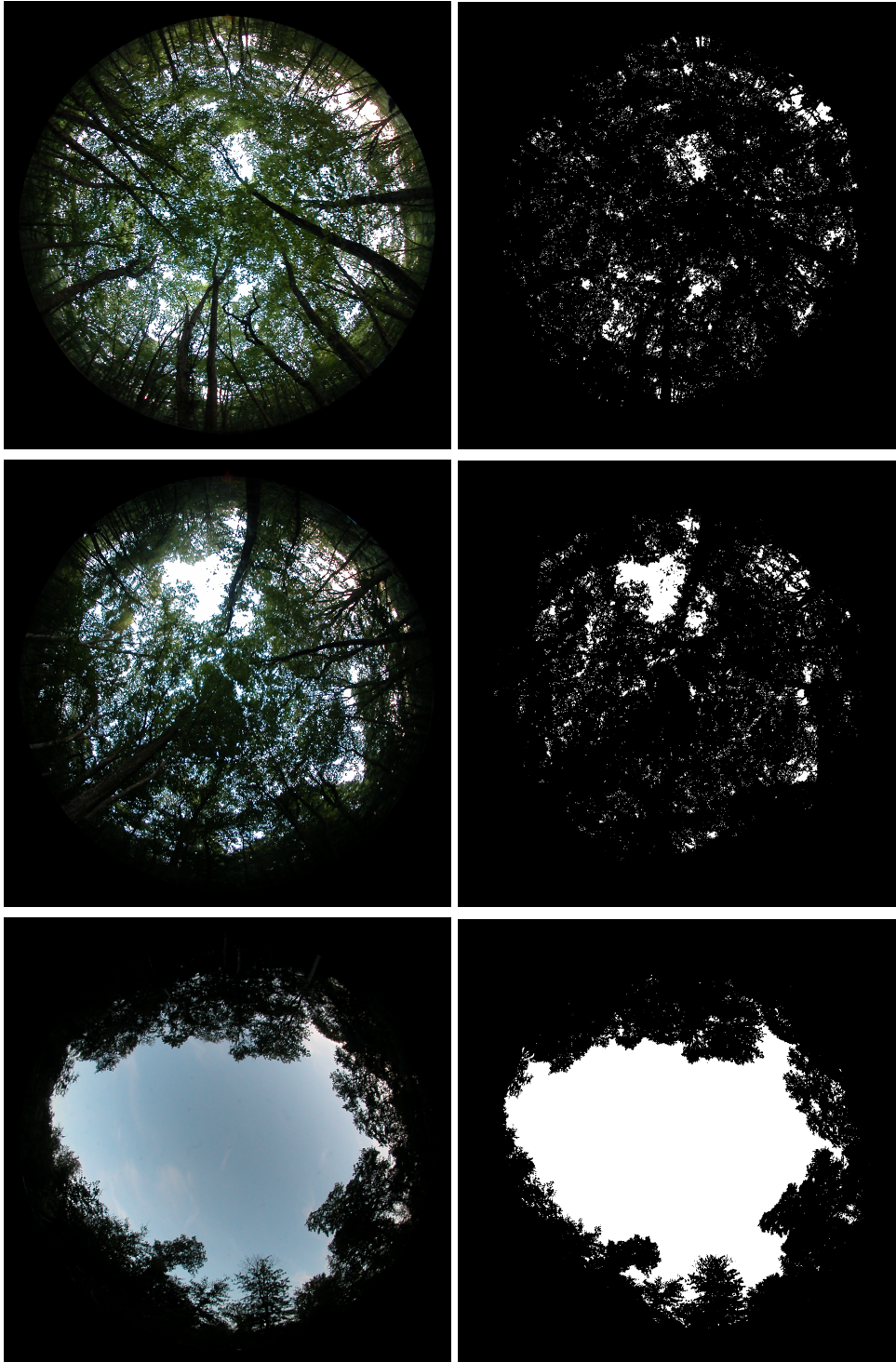


Figure 36 : Trois exemples de seuillages. En haut : couvert fermé en transect 1. Au milieu : petite trouées en transect 2. En bas : grande trouée en transect 3. Pour chaque couple, la photographie en couleur, recadrée et orientée avec le nord vers le haut est à gauche. A chaque fois la même photographie mais seuillée (deux couleurs : noir pour la végétation et blanc pour le ciel) est à droite de la précédente.

l'analyse. Pour les photographies comportant des trouées plus ou moins grandes, le phénomène précédent était d'autant moins marqué que l'ouverture était grande, avec des seuils de plus en plus éloigné de 255. La **figure 36** montre des exemples de photographies avant et après seuillage.



Figure 35 : Illustration du phénomène de surexposition du ciel. A gauche : cas d'une photographie prise sous couvert fermé (transect 1), où le ciel est fortement surexposé. A droite : cas d'une photographie prise dans la grande trouée (transect 3), où le ciel est globalement bien exposé.

Les photographies seuillées ont été analysées avec le logiciel Hemimage implémenté par Andreas Brunner, en utilisant la courbe de distorsion établie. Nous avons utilisé la latitude du site et une distribution SOC (standard overcast sky conditions, avec un coefficient $b=1,23$). Pour plus de détails sur la distribution SOC choisie voir *Brunner 1998* et à partie D.1.b de ce chapitre. Les autres paramètres choisis dépendent de chaque type d'utilisation – comparaison avec les capteurs ou avec le modèle tRAYci – et seront explicités dans les paragraphes correspondants.

d. Comparaison avec les capteurs de lumière

Nous avons comparé les valeurs d'éclairement relatif obtenues avec les photographies hémisphériques prises aux mêmes endroits que les capteurs, avec celles fournies par ces derniers. Pour l'analyse des photographies, nous avons utilisé la période du 25 juin au 18 août 2004, la valeur de P_{dif} mesurée (48,69 %), et nous avons activé l'option correction cosinus, puisque nous voulons comparer les estimations avec des mesures réalisées par des surfaces horizontales et non des points. La **figure 37** montre la relation entre les deux méthodes.

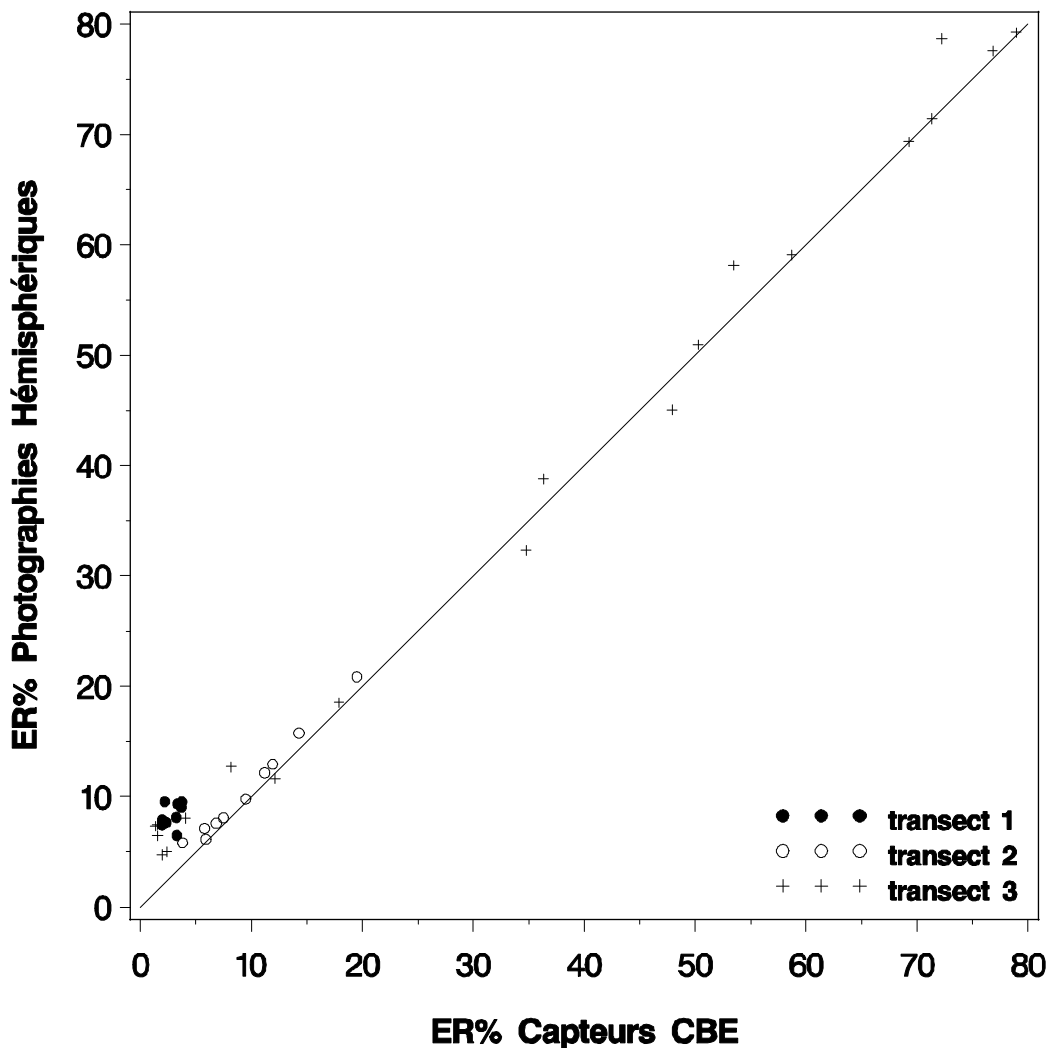


Figure 37 : Éclairage relatif (ER%) obtenu par la méthode des photographies hémisphériques en fonction de celui donné par les capteurs CBE. La droite identité est représentée en trait continu.

Au dessus de 5 % d'éclairage relatif, mesuré par les capteurs, la relation est excellente, avec peut-être une très légère surestimation de l'éclairage relatif par les photographies (moins de 1%). En revanche, nous constatons une surestimation et une imprécision relativement marquée pour les valeurs d'éclairage relatif de moins de 5 % pour les capteurs et moins de 10 % pour les photographies. Cet effet, qui correspond aux photographies prises sous couvert très fermé, est très probablement dû à la surexposition du ciel évoquée précédemment. En effet lorsque le couvert est très fermé, la transmission de l'éclairage se fait principalement par des trous de petite dimension très nombreux dans le couvert. L'effet de la surexposition est donc amplifié par la petite taille et la multitude de ces trous, conduisant à une sous-estimation de la quantité de feuillage quasiment systématique.

Cet effet de surexposition principalement marqué sous couvert très fermé est une conséquence de l'utilisation de l'exposition automatique par l'appareil numérique. Pour que la photographie soit bonne (en terme de seuillage), il faut que le ciel soit bien exposé, afin d'éviter cet effet de contraste excessif. Dans une trouée, la cellule de l'appareil mesure une majorité de rayonnement provenant

du ciel, celui-ci est donc correctement exposé. Quand la portion de ciel visible diminue, l'influence du ciel dans la mesure d'exposition diminue aussi, surexposant d'autant les zones de ciel visibles. Cet effet est particulièrement marqué lorsqu'il n'y a pas de trouée et où le ciel n'est vu que par les interstices entre les feuilles. Dans ce cas la mesure d'exposition se fait quasiment exclusivement sur le feuillage, entraînant une forte surexposition de la multitude de très petites portions visibles du ciel. L'utilisation d'un posemètre classique n'aurait en rien corrigé ce problème.

Il faudrait donc utiliser un posemètre à champ angulaire (angle de 5 degrés) ou mieux un spotmètre (angle de 1 degré) et viser systématiquement le ciel pour la prise d'exposition, afin de toujours bien exposer celui-ci. Cette solution a déjà été proposée, en particulier par *Walter 2000*. Ce type de posemètre étant relativement coûteux, nous n'avons pas fait l'investissement pour ce travail. Il faudrait désormais acquérir ce matériel et tester s'il permet de complètement corriger le biais, ou si d'autres facteurs sont impliqués. Dans tous les cas le seuillage serait plus fiable (moins subjectif) avec une bonne exposition du ciel sur les photographies. De plus, le fait de standardiser l'exposition par la luminosité du ciel devrait permettre d'obtenir des valeurs de seuil assez stables d'une photographie à l'autre, facilitant le traitement en série des photographies.

Sur le même principe, certains auteurs (comme *Ishida 2004*, *Walter 2000*) ont proposé de faire la mesure d'exposition dans une zone ouverte proche du point de mesure (trouées, chablis) afin de bien exposer le ciel.

La technique la plus régulièrement utilisée pour être sûr d'obtenir la bonne exposition (comme par exemple dans *Frazer et al. 2001*, *Frazer et al. 1997*, *Piboule 2001*) est le bracketing qui consiste à prendre plusieurs photographies d'expositions différentes en chaque point et à choisir la meilleure au laboratoire. Cette solution consomme beaucoup de mémoire de stockage ou de pellicule. Si cette méthode assure d'avoir au moins une photographie dont l'exposition permet un seuillage correct, elle ne garantit pas d'obtenir des jeux de photographies homogènes. Cette méthode peut donc introduire une variabilité au seuillage du fait du choix de la prise de vue parmi quelques possibilités. En effet, sans critère précis, le choix de la « bonne » prise de vue reste très subjectif.

4. Validation partielle de la méthode proposée par Parent et Messier 1996

Étant donné que nous avons des données mesurées sur une période relativement longue, nous en avons profité pour tester partiellement la méthode d'estimation de l'éclairement relatif proposée par *Parent et Messier 1996*. Les auteurs montrent qu'une mesure ponctuelle instantanée de PPFD par temps couvert uniforme est un bon estimateur de l'éclairement relatif total sur la saison de végétation. Cette méthode a été l'objet de discussions, en particulier dans *Gendron et al. 1998*, *Messier et Parent 1997*, *Stadt et al. 1997*, en particulier sur l'importance du rayonnement direct dans les trouées, qui ne peut pas être pris en compte dans cette méthode.

Dans notre cas nous avons des capteurs sous couvert fermé, en petite trouée et à différents endroits d'une grande trouée, dans un peuplement feuillu mélangé. Mais nous n'avons une mesure de l'éclairement relatif que sur une période plus courte que la saison de végétation. Nous avons comparé une mesure instantanée de l'éclairement relatif, en fait une moyenne sur 15 minutes, puisque c'est ce qui a été enregistré sur le terrain, avec la valeur de l'éclairement relatif global calculé sur les 54 jours de mesure. Pour la mesure instantanée nous avons choisi un moment où nous étions sûrs que le temps était couvert et très uniforme, du fait qu'à ce moment là nous étions justement sur le site pour prendre des photographies hémisphériques, qui nécessitent les mêmes conditions. Il s'agit du 12 juillet 2004 à 12h00. La **figure 38** montre la comparaison de la valeur instantanée avec la valeur globale obtenue sur 54 jours. Il faut tout de même noter que dans ce cas

les conditions de comparaison sont excellentes puisque les deux mesures sont réalisées avec les mêmes capteurs, dont la position et l'horizontalité sont garanties.

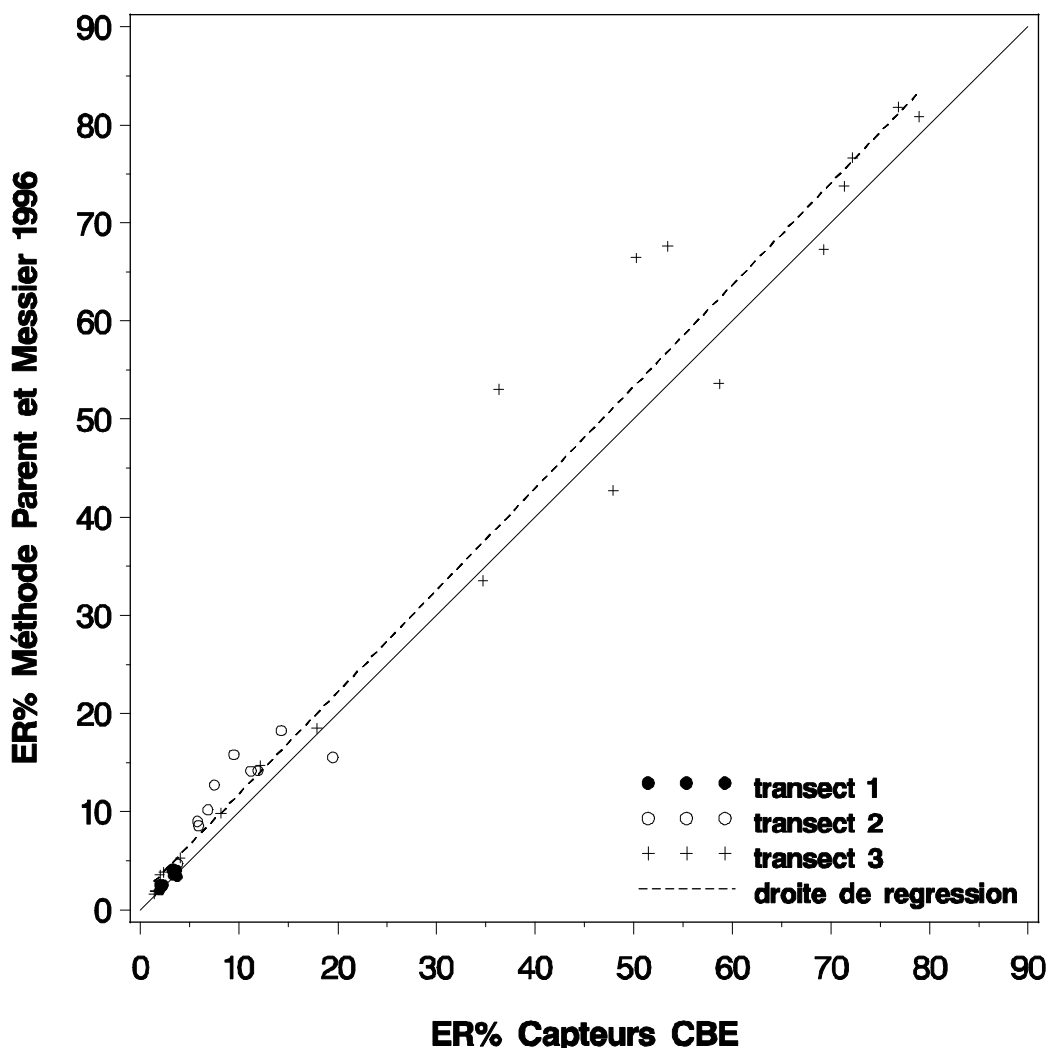


Figure 38 : Éclairement relatif (ER%) obtenu par la méthode proposée par Parent et Messier 1996, en fonction de celui issu des capteurs CBE. La droite identité est représentée en trait continu.

La relation linéaire entre valeur instantanée et valeur globale est très significative ($p < 0.0001$) et a un R^2 de 0,97. Le modèle est cependant significativement différent de la droite identité (au niveau $p = 0.0086$). La relation est particulièrement bonne sous couvert et dans la petite trouée et plus dispersée pour la moyenne et la grande trouée. Si la méthode ne permet pas de prédire l'éclairement avec la même précision qu'une mesure continue, beaucoup plus coûteuse en temps de terrain et en moyens techniques, elle permet tout de même de clairement discriminer les différentes gammes de l'éclairement. L'estimation locale de l'éclairement est soumise à une incertitude lorsque la part relative du rayonnement direct est importante. Cependant l'utilisation de cette méthode, facile à mettre en œuvre, avec un échantillonnage systématique permet de caractériser efficacement la variabilité de l'éclairement à l'échelle du peuplement. Enfin il faut noter que testée par rapport à des mesures effectuées en continu sur la saison de végétation complète, la méthode serait probablement encore plus fiable, du fait d'un éclairement direct plus dispersé sur l'hémisphère céleste.

Nous constatons également que la méthode de *Parent et Messier 1996* est très précise et non biaisée dans la gamme où les photographies hémisphériques le sont le moins et inversement. Ainsi les deux méthodes semblent assez complémentaires.

D. Présentation du modèle de lumière tRAYci

Nous allons aborder ici les grands principes de fonctionnement du modèle tRAYci (*Brunner 1998*). Dans cette partie nous utiliserons quelques notations issues de *Brunner 1998* (dans les formules des paragraphes D.1.b et D.1.c), afin qu'il soit aisé de s'y référer. Lorsque des notations différentes ont été utilisées dans le reste de la thèse, les correspondances seront indiquées.

Le modèle tRAYci permet d'estimer l'éclairage relatif en tout point d'un peuplement forestier à partir d'une représentation géométrique des arbres. La gamme d'éclairage considérée est le PAR. Le **tableau II** présente plusieurs études qui ont utilisé le modèle tRAYci. Il faut noter qu'elles considèrent toutes des peuplements résineux. Cependant le modèle tRAYci est conçu de façon à pouvoir également gérer des feuillus, de par la souplesse des formes permettant de représenter les houppiers.

Auteurs	Essences	Peuplements	Validation (lumière)
Brunner 1998 et Brunner et Nigh 2000	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco Et, en régénération naturelle : <i>Tsuga heterophylla</i> (Raf.) Sarg. <i>Thuja plicata</i> Donn <i>Pinus monticola</i> Dougl.	Plantation de Douglas (50 ans) avec un peu de régénération naturelle	Photos hémisphériques Capteurs (temps gris)
MacFarlane <i>et al.</i> 2002 et MacFarlane <i>et al.</i> 2003	<i>Pinus taeda</i> L.	Jeunes plantations résineuses (16 ans) de densités variées.	Aucune
Gersonde <i>et al.</i> 2004	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco <i>Pinus lambertiana</i> Dougl. <i>Pinus ponderosa</i> Dougl. <i>Calocedrus decurrens</i> (Torr.) Florin <i>Quercus kelloggii</i> Newb.	Peuplements résineux (adultes) mêlés, irréguliers ou avec des trouées	Photos hémisphériques
Nigh et Love 2004	<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss <i>Pinus contorta</i> Dougl. <i>Abies lasiocarpa</i> (Hook.) Nutt.	Peuplements résineux (adultes) mêlés, réguliers, de densités variables	Aucune
Piboule 2001	<i>Fagus sylvatica</i> L. <i>Betula pendula</i> Roth	Peuplements réguliers monospécifiques feuillus	Photos hémisphériques

Tableau II : Études utilisant le modèle tRAYci, types de peuplement considérés et validations éventuelles.

1. Caractéristiques du modèle tRAYci

Dans tRAYci un peuplement forestier est porté par une placette rectangulaire définie par une largeur et une longueur, respectivement selon les axes X et Y . Cette placette peut avoir une pente (définie par une inclinaison et un azimut), et l'axe Y est orienté par rapport au Nord géographique à l'aide d'un angle. Chaque arbre y est localisé (centre du tronc) par des coordonnées (x, y) . Il faut cependant noter que si l'axe X est orienté vers la droite, alors Y est vers le bas (coordonnées inversées).

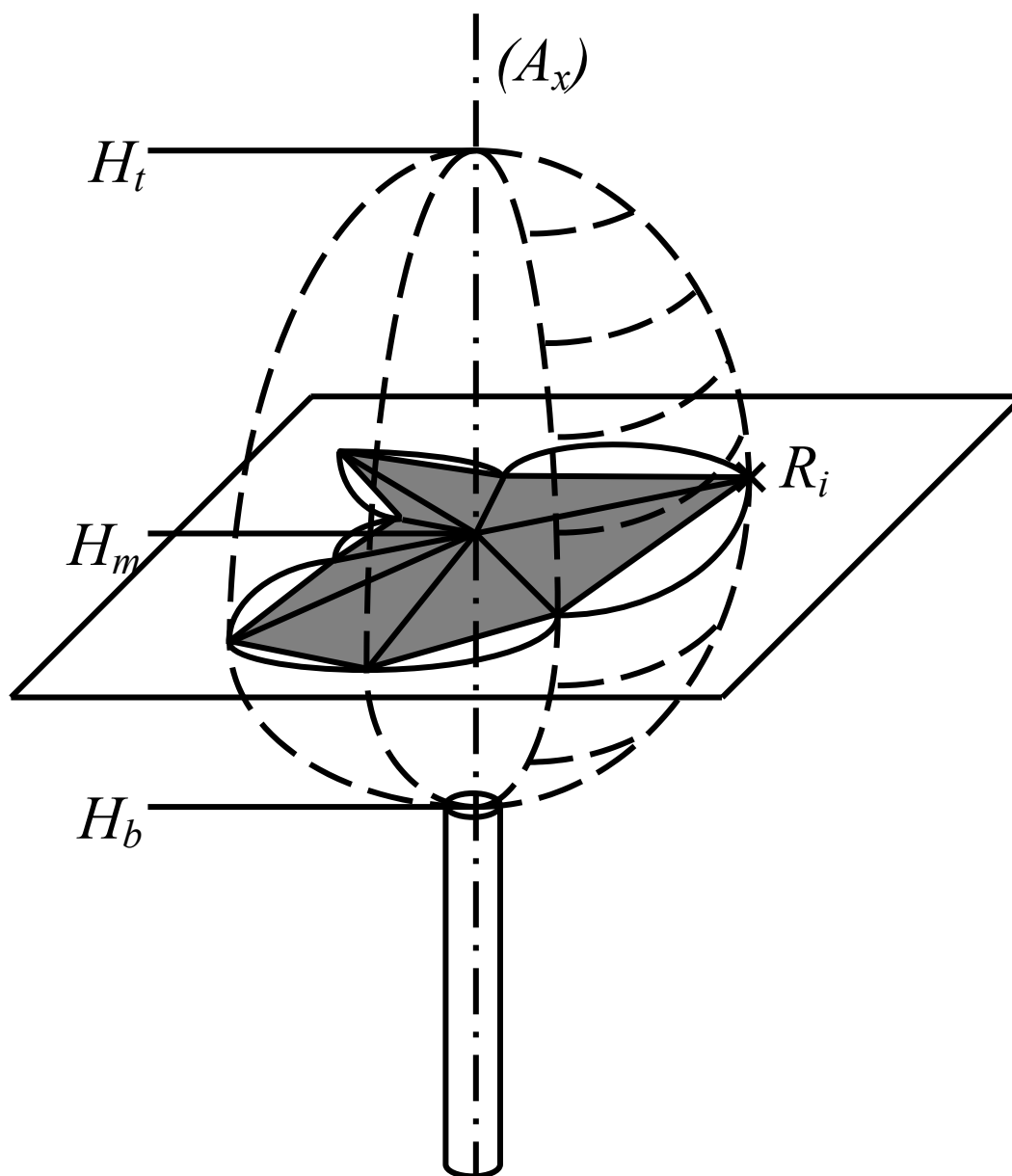


Figure 39 : : Représentation géométrique d'un arbre dans le modèle tRAYci. Le tronc est représenté par un cylindre. (A_x) , en $- \cdot - \cdot -$, est l'axe vertical passant par le centre du tronc. H_t , H_b et H_m sont les points de cet axe, correspondant respectivement à la hauteur totale, la hauteur de base de houppier et la hauteur de plus grande largeur de houppier. R_i est l'un des huit rayons délimitant l'extension latérale du houppier (i allant de 1 à 8, $-$) dans le plan horizontal passant par H_m . La surface ainsi délimitée est représentée en gris et son contour par un trait continu ($-$): celui-ci est obtenu en reliant les rayons successifs par des arc elliptiques. L'enveloppe du volume géométrique du houppier est délimitée par des courbes reliant les rayons R_i à H_t et H_b ($- - - -$).

a. Représentation des arbres dans tRAYci

Au sein du modèle, chaque arbre est décomposé en un tronc et un houppier. Le tronc est représenté par un cylindre vertical, allant du sol à la hauteur de base de houppier de l'arbre (point H_b). Le houppier est représenté par un volume géométrique plus complexe (**figure 39**). Ce volume est centré sur un axe vertical (Ax) passant par le centre du tronc. Il est délimité à son sommet par la hauteur totale de l'arbre (H_t), et à sa base par la hauteur de base de houppiers (point H_b). Le volume est divisé en deux parties, la partie supérieure et la partie inférieure, séparées par un plan horizontal passant par la hauteur de plus grande largeur de houppiers (point H_m). Dans ce plan, l'extension du houppier est délimitée par quatre à huit rayons de houppier depuis H_m (points R_i , i allant de 1 à 4-8). Chaque point R_i est connecté à la fois à H_t pour la partie supérieure du houppier et à H_b pour sa partie inférieure, par des courbes définies par deux paramètres de forme distincts E_{sup} et E_{inf} . Par exemple, une valeur de 1 pour un paramètre de forme correspond à une ligne droite alors qu'une valeur de 2 correspond à un quart d'ellipse. La **figure 40** définit ce paramètre de forme et son influence sur la courbe obtenue. Entre deux rayons successifs R_i et R_{i+1} , le rayon du houppier est extrapolé par la formule du quart d'ellipse, ce qui correspond à la même formule qu'en **figure 40**, avec une valeur de paramètre de forme de 2.

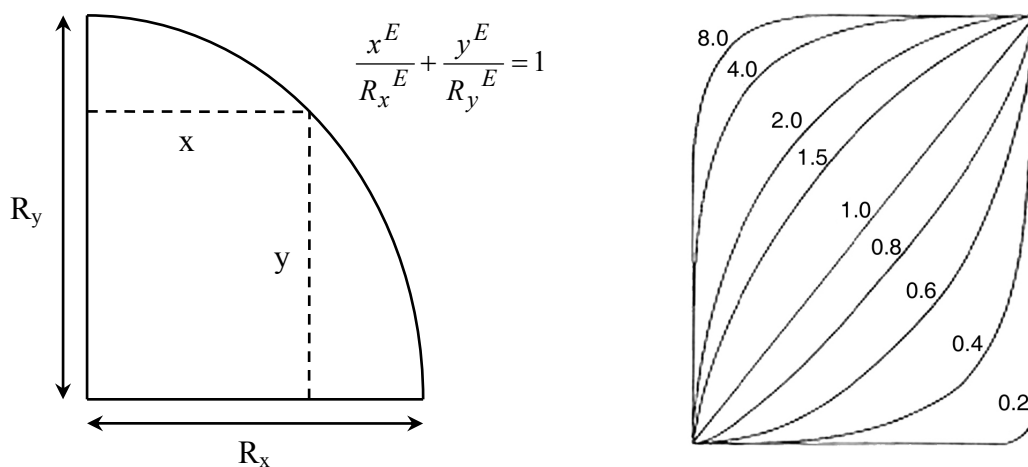


Figure 40 : A gauche : Équation du paramètre de forme E , dans une coupe verticale du houppier. R_y correspond à la longueur séparant la hauteur de plus grande largeur de houppier et la hauteur totale (ou la hauteur de base de houppier selon le cas). R_x correspond au rayon de houppier dans cette coupe. Si $E=2$, alors l'arc est un quart d'ellipse. A droite (source : Koop 1989) : effet de la valeur de E sur la courbure du houppier dans le plan vertical. Dans le modèle tRAYci, Deux valeurs pour le paramètre E , E_{sup} et E_{inf} , sont définies respectivement pour les parties supérieure et inférieure du houppier.

Du fait que H_m n'a de sens que par rapport à H_t et H_b , dans le modèle c'est la hauteur relative de plus grande largeur de houppier ($H_m\%$) qui est utilisée :

$$H_m \% = \frac{|H_m - H_b|}{|H_t - H_b|}$$

Le feuillage peut soit être distribué de façon homogène dans tout le volume obtenu, soit être uniquement réparti dans une certaine épaisseur verticale depuis les surfaces supérieure et / ou inférieure du houppier. Cela correspond à deux paramètres d'épaisseur du feuillage, l'un (L_{sup}) en

partant de l'enveloppe de la partie supérieure du houppier et l'autre (L_{inf}) en partant de l'enveloppe de sa partie inférieure. Ces paramètres sont définis comme des proportions de la longueur $|H_t - H_b|$ (**figure 41**). Il faut noter que si L_{sup} et L_{inf} sont tous les deux non nuls, il y a chevauchement vertical (**fig. 41.e**), ce qui est un artefact du modèle tRAYci.

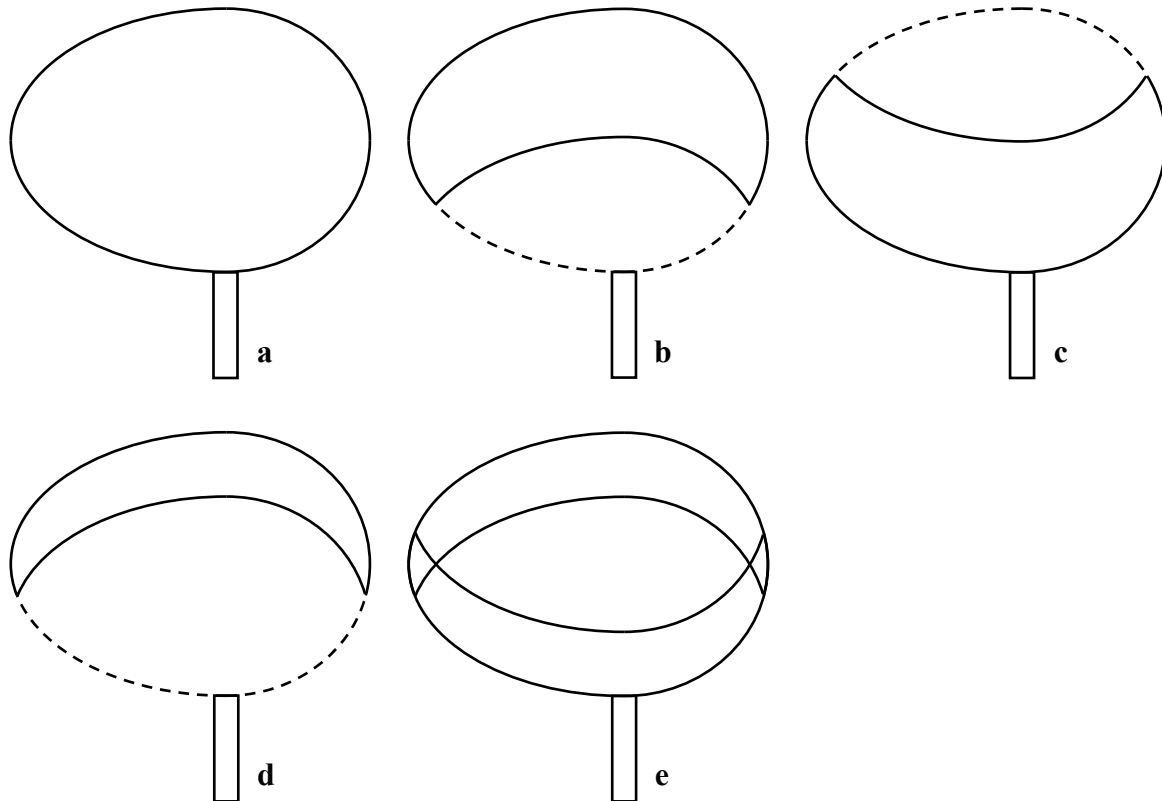


Figure 41 : Effet des deux paramètres d'épaisseur de feuillage (L_{sup} et L_{inf}) sur la partie du houppier contenant effectivement le feuillage dans tRAYci.

a : $L_{sup} = 100 \%$ et $L_{inf} = 0 \%$, ou $L_{sup} = 0 \%$ et $L_{inf} = 100 \%$.

b : $L_{sup} = 50 \%$ et $L_{inf} = 0 \%$.

c : $L_{sup} = 0 \%$ et $L_{inf} = 50 \%$.

d : $L_{sup} = 25 \%$ et $L_{inf} = 0 \%$.

e : $L_{sup} = 25 \%$ et $L_{inf} = 25 \%$. Dans ce cas où les paramètres sont tous deux non nuls, nous constatons un recouvrement artificiel sur les bords du houppier.

Le paramètre LAD (Leaf Area Density, ou densité de surface foliaire) définit la surface foliaire en mètres carrés par mètre cube de houppier.

La hauteur totale de l'arbre, la hauteur de base de houppier et les rayons de houppiers (de quatre à huit) sont spécifiques à chaque arbre. La hauteur relative de plus grande largeur de houppier ($H_m\%$), ainsi que les paramètres E_{sup} , E_{inf} , L_{sup} , L_{inf} et LAD sont définis pour chaque espèce.

Le modèle tRAYci utilise la description des arbres que nous venons de détailler pour construire une représentation simplifiée du peuplement. Une grille carrée au niveau du sol, dont la taille de cellule peut être définie, sert de base à des colonnes verticales. Dans ces colonnes les volumes définis par le houppier et le tronc sont délimités par des hauteurs limites. Ainsi le volume total d'un houppier est représenté par un ensemble de parallélépipèdes rectangles verticaux remplis par une densité de feuillage dépendant de l'espèce (paramètre LAD). C'est cette représentation (**figure 42**) qui, pour sa simplicité géométrique, est utilisée pour les calculs d'interception de la lumière. Avec cette double représentation, tRAYci est à la fois un modèle géométrique, avec une représentation individuelle des arbres et de leur houppier, et un modèle discret, avec une représentation discrète du peuplement pour les calculs d'interception du rayonnement.

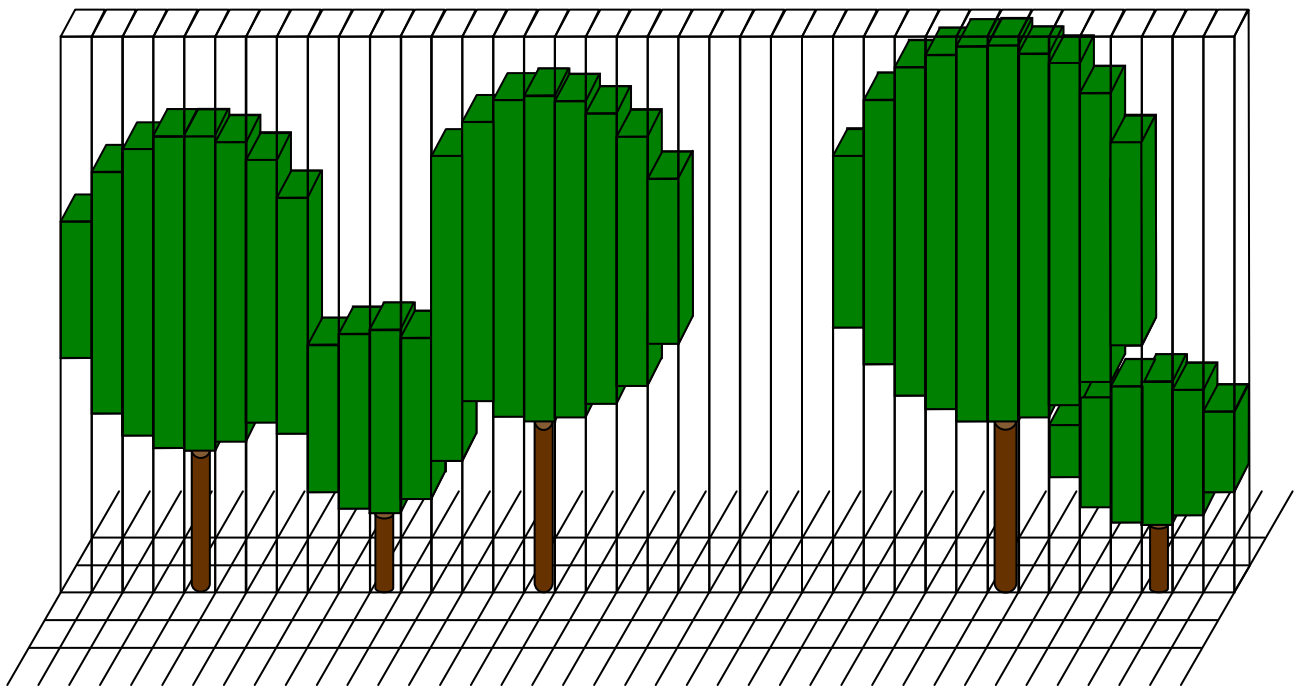


Figure 42 : Représentation simplifiée du peuplement, calculée à partir de la représentation géométrique individuelle des arbres, utilisée pour le calcul de l'interception de l'éclairement incident.

b. Rayonnement incident dans tRAYci

Étant donné que le modèle tRAYci simule uniquement l'éclairement relatif, il ne lui est pas nécessaire de calculer les valeurs absolues du PFD. Une distribution du rayonnement sur l'hémisphère céleste définissant la répartition relative du rayonnement en fonction de la direction est suffisante. Cette distribution est représentée par un certain nombre de rayons lumineux régulièrement répartis sur l'hémisphère céleste. Chaque rayon représente une aire égale de l'hémisphère céleste, ce qui correspond à des distances angulaires constantes entre deux rayons successifs, pour l'angle zénithal et l'azimut (une même valeur pour les deux). La distance angulaire entre deux rayons peut être fixée à 1, 3, 5, 9 ou 15 degrés, ce qui correspond respectivement à 32 400, 3 600, 1 296, 400 et 144 rayons lumineux.

L'étape suivante consiste à attribuer une valeur relative du PPDF à chaque rayon lumineux. Les parts directe et diffuse sont évaluées séparément.

Pour la part directe, la position du soleil est calculée chaque minute de la période de simulation et attribuée au rayon lumineux le plus proche. Le nombre de positions solaires pour chaque rayon lumineux est corrigé en fonction de son angle zénithal, afin de tenir compte de l'atténuation de rayonnement par l'atmosphère à l'aide d'un coefficient d'extinction atmosphérique.

Pour la part diffuse, un modèle de distribution du rayonnement sur l'hémisphère céleste est utilisé pour évaluer la part de chaque rayon lumineux. Ce modèle est spécifié par un coefficient b (également présent dans le logiciel Hemimage, précédemment utilisé pour l'analyse des photographies hémisphériques). Selon la valeur de b nous obtenons une distribution de type UOC (uniform overcast sky condition, $b=0$) ou SOC (standard overcast sky condition, $b>0$). Une autre distribution SOC souvent utilisée correspond à $b=2$. Pour plus d'informations sur ce coefficient et les distributions proposées dans la littérature, il est possible de se référer à la revue bibliographie réalisée à ce propos dans Brunner 1998.

La pondération entre direct et diffus est gérée par la proportion de diffus P_{dif} . La valeur relative du PPDF total au dessus du couvert ACL_{az} pour un rayon lumineux d'azimut a et d'angle zénithal z est donnée par :

$$ACL_{az} = P_{Dif} \cdot DIF_z + (1 - P_{Dif}) \cdot DIR_{az}$$

Où DIF_z est la valeur relative du PPDF diffus pour l'angle zénithal z , et DIR_{az} la valeur relative du PPDF direct pour le rayon lumineux considéré.

c. Interception du rayonnement dans tRAYci

Le modèle tRAYci utilise la méthode générale des fréquences de trouées décrite précédemment.

Pour chaque rayon lumineux d'azimut a et d'angle zénithal z , la longueur de trajet $PATH_{azs}$ au sein des houppiers de l'espèce s est calculée. L'interception de chaque rayon lumineux est calculée séparément pour chaque espèce, en utilisant une loi de Bouguer. La proportion non interceptée ($PACL_{azs}$, c'est-à-dire la fraction de trouée précédemment nommée P_0) pour le rayon lumineux d'azimut a et d'angle zénithal z , à travers les houppiers de l'espèce s est calculée comme suit :

$$PACL_{azs} = e^{-0.5 \cdot LAD_s \cdot PATH_{azs}}$$

Où LAD_s est le paramètre de densité de surface foliaire pour l'espèce s .

Les troncs cylindriques bloquent quant à eux totalement le rayonnement.

Pour chaque rayon, le produit des proportions non interceptées par les différentes espèces donne la proportion non interceptée totale pour le rayon lumineux. Le produit de cette proportion par la valeur relative du PPDF total attribuée au rayon donne la valeur relative de PPDF total non interceptée pour ce rayon. L'éclairement relatif ($PACL$, noté $ER\%$ dans le reste de la thèse) est la somme des valeurs relatives du PPDF total non intercepté pour tous les rayons lumineux :

$$PACL = 100 \cdot \sum_{a=1}^{noa} \sum_{z=1}^{noz} \left[ACL_{az} \cdot \prod_{s=1}^{nos} PACL_{azs} \right]$$

Où *noa* est le nombre d'azimuts et *noz* le nombre d'angles zénithaux utilisés pour les rayons lumineux. Le nombre d'espèces différentes est *nos*.

Le modèle tRAYci ne prend pas en compte les rediffusions. Ce point a été considéré comme secondaire vis-à-vis des autres critères de choix.

2. Alimentation du modèle pour notre étude

a. *Données du peuplement*

Au chapitre I, nous avons décrit en détail les données que nous avons relevé sur les arbres du peuplement. Nous allons indiquer ici comment elles ont été utilisées dans le modèle tRAYci, afin de simuler l'éclairage pour les différents points souhaités. Tous les points, où l'éclairage relatif a été simulé, sont situés dans les zones d'étude, sauf les trois points (numéros 18, 19 et 20) des transects de capteurs évoqués précédemment, qui cependant en sont très proches.

Dans les zones d'études et tampon I, toutes les données nécessaires au modèle ont été relevées. Pour un arbre donné (ou une cépée), il s'agit de l'essence, de la position (coordonnées), du diamètre du tronc à 1,30 m, de la hauteur totale, de la hauteur de base de houppier, et de huit rayons de houppiers sous la forme chacun d'un azimut et d'une longueur. L'altitude de la base de chaque tronc a été obtenue grâce au SIG.

Il nous faut pourtant préciser quelques éléments concernant la position. En effet sur le terrain nous avons relevé une position pour le ou les troncs, et une position de centre de houppier. Dans le modèle tRAYci chaque centre de houppier a la même position que le tronc correspondant. De plus il n'y a qu'un tronc par arbre (le cas des cépées n'est pas pris en compte). Pour résoudre cette difficulté, nous avons utilisé le module *regelight* (Piboule 2002). Pour chaque tronc, nous avons créé un arbre sans houppier. Pour chaque houppier nous avons créé un arbre sans tronc dont la position était celle du centre de houppier.

Il faut également signaler que nous avons les positions sous forme de coordonnées Lambert II étendues, alors que tRAYci utilise des coordonnées relatives à la taille de la placette de simulation, avec de plus un axe Y inversé. Là encore l'interfaçage a été fait sous *regelight* afin de travailler de manière transparente en coordonnées Lambert II étendues (en particulier pour la gestion des données sous SIG), tout en fournissant les données converties de façon adéquate à tRAYci.

Pour les simulations, nous avons utilisé une placette de simulation rectangulaire de 360 m de large sur 520 m de haut, incluant les placettes 1 et 2 (avec leurs positions relatives réelles). Les zones d'études et tampon I (épaisseur 20 m) étaient complètement mesurées. Pour les zones tampon II (épaisseur 20 m), il manquait les données de houppier. Entre et autour des placettes 1 et 2 (zone tampon III) nous n'avions pas de données. La zone tampon III avait une épaisseur minimale de 30 m entre chacune des deux placettes et les bords de la placette de simulation. Nous avons procédé à une reconstitution des données manquantes, avec le module *regelight*. La **figure 43** illustre les différentes étapes de la préparation de la placette de simulation, que nous allons maintenant détailler.

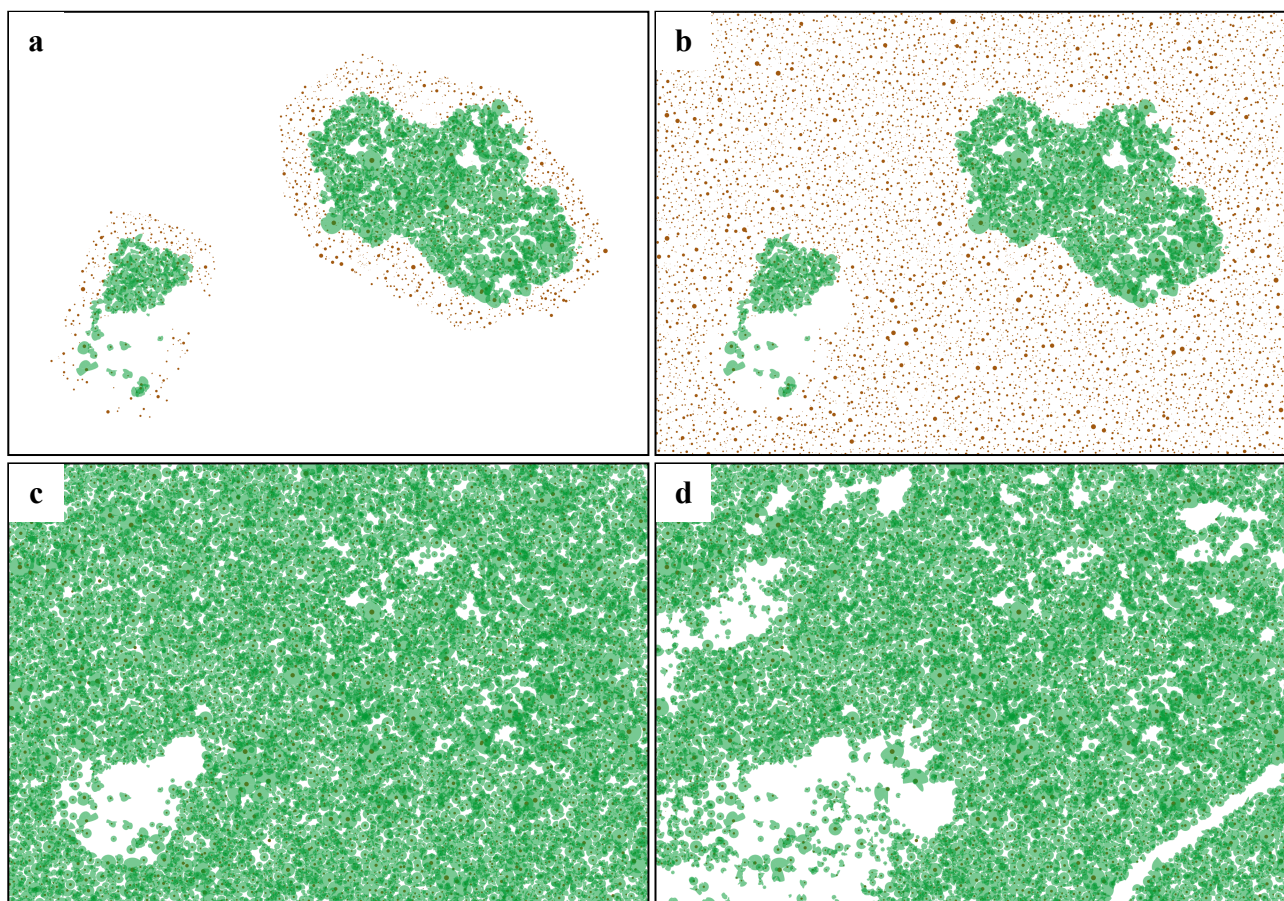


Figure 43 : Étapes de la préparation de la placette de simulation. Dans tous les cas (**a**, **b**, **c**, **d**) la surface représentée est la même. **a** : Troncs (en marron) et projection des houppiers (en vert) mesurés sur le terrain. **b** : Implantation de troncs dans la zone tampon III. **c** : Reconstruction des houppiers des zones tampon II et III à l'aide de l'algorithme de reconstruction des houppiers par minimisation des recouvrements (décrit au chapitre IV). **d** : Création des trouées présentes sur le terrain à partir de la photographie aérienne de 2001. Le diamètre des troncs est exagéré (facteur 5). La représentation du modèle tRAYci a été utilisée pour déterminer le contour des houppiers.

Dans la zone tampon III, nous avons commencé par recréer des troncs (essences, positions et diamètres à 1,30 m). Nous avons d'abord déterminé la densité du peuplement dans les zones mesurées (zones d'étude et tampon I, hors surface de la grande trouée en placette 2). Puis nous avons tiré au hasard un nombre de troncs correspondant à cette densité dans la distribution essence x diamètre (par classes de 5 cm) issue des zones mesurées. Il faut noter que pour les cépées, nous avons dans ce cas utilisé le diamètre équivalent (diamètre d'un tronc de surface terrière égale à la somme des surfaces terrières des troncs de la cépée). Il était en effet délicat de gérer l'appartenance à une cépée et le nombre de brins des cépées pour la création des nouveaux arbres. Comme ces reconstitutions étaient réalisées relativement loin des zones de simulation, nous avons considéré que cette approximation ne portait pas à conséquence.

Les troncs obtenus ont ensuite été placés aléatoirement dans la zone tampon III. Pour plus de réalisme, nous avons ensuite utilisé un algorithme de régularisation de la position des troncs. Pour chaque tronc, nous avons défini une zone d'influence circulaire égale à 10 fois leur diamètre à 1,30 m exprimé en mètre. Ensuite nous avons utilisé une boucle dont le nombre d'itérations était de 1,5 fois le nombre de troncs recréés. A chaque itération un des troncs implantés était choisi au hasard. Nous calculions l'aire de sa zone d'influence recouverte par les zones d'influence des autres arbres. Nous tirions au hasard une position alternative en zone tampon III. Si la nouvelle position

conduisait à un recouvrement plus faible de la zone d'influence du tronc considéré, la nouvelle position était adoptée pour le tronc. Sinon il restait à sa place. Cette boucle permettait d'obtenir une certaine régularité dans le positionnement des arbres, d'éviter un groupement excessif des gros arbres et de ne pas créer de trouées.

Pour tous les troncs où seules les données de houppiers étaient manquantes (zones tampon II et III), nous avons recréé ces données en utilisant l'algorithme reconstruction des houppiers par minimisation des recouvrements, que nous avons mis au point et qui sera décrit en détail au chapitre IV.

Enfin pour encore plus de réalisme, nous avons délimité sous SIG, à partir de la photographie aérienne de 2001, le contour des trouées présentes en zone tampon III. Les arbres des zones correspondantes ont été supprimés (sous *regeligh*, *Piboule 2002*) dans la placette de simulation.

b. Choix des paramètres espèce-dépendants

Les paramètres définis au niveau de l'espèce sont :

- La hauteur relative de plus grande largeur de houppier ($H_m\%$, en pourcentage de la longueur $H_t - H_b$)
- Le paramètre de forme de la partie supérieure du houppier (E_{sup})
- Le paramètre de forme de la partie inférieure du houppier (E_{inf})
- Le paramètre d'épaisseur de feuillage de la partie supérieure du houppier (L_{sup})
- Le paramètre d'épaisseur de feuillage de la partie inférieure du houppier (L_{inf})
- La densité de surface foliaire (LAD , en $m^2 \cdot m^{-3}$)

Pour $H_m\%$, nous avons calculé et utilisé pour chaque essence la moyenne des valeurs individuelles mesurées sur les arbres de l'espèce correspondante. Une analyse plus détaillée de $H_m\%$ sera réalisée dans le chapitre III, qui traite de la structure du couvert. Cette analyse montre que l'utilisation d'une valeur de $H_m\%$ unique pour chaque espèce est justifiée.

Nous avons fixé $E_{sup} = 2$ et $E_{inf} = 2$, nous ramenant ainsi à une forme de houppier où toutes les courbes reliant les points caractéristiques de son enveloppe sont des arcs elliptiques. Dans le cas idéal où tous les rayons seraient égaux, la forme du houppier serait donc un ellipsoïde. Ce choix est a été fait en partie pour permettre une implémentation plus aisée de l'algorithme de reconstruction des houppiers par minimisation des recouvrements, que nous détaillerons au chapitre IV. De plus les paramètres de forme sont quasiment impossibles à estimer sur le terrain (*Gersonde et al. 2004*). Dans le cas de résineux, *Gersonde et al. 2004* ont constaté que l'utilisation de paramètres de forme mesurés individuellement pour chaque arbre n'améliore pas l'estimation de l'éclairage de façon importante. Enfin la forme de type ellipsoïdal paraît visuellement relativement bien adaptée à la description de feuillus, et a souvent été utilisé dans les modèles de lumière (*Bartelink 1995*, *Grace et al. 1987*, *Mariscal et al. 2004*, *Mariscal et al. 2000*, *Pukkala et al. 1993*, *Wang et Jarvis 1990*, *West et Wells 1992*).

Nous avons également fixé $L_{inf} = 0\%$ et $L_{sup} = 100\%$. Ce choix se justifie par la façon dont nous avons mesuré la hauteur de base de houppier (H_b). En effet dans notre cas il s'agit d'une hauteur de base du houppier vivant, considéré comme un volume homogène et continu. Il est donc cohérent d'utiliser une répartition des feuilles dans tout le volume de houppier délimité. Si nous avons mesuré sur le terrain la hauteur d'insertion des branches, une valeur inférieure à 100 % pour ce paramètre aurait pu se justifier.

Pour le *LAD*, paramètre pour lequel nous n'avons pas d'éléments de choix *a priori*, nous avons réalisé une calibration à partir des photographies hémisphériques, détaillée dans le paragraphe suivant.

c. Calibration du LAD

Il existe différentes méthodes pour estimer l'indice foliaire (LAI, leaf area index), qui est la surface de feuilles exprimée en mètres carrés par mètre carré de sol. Pour une revue de ces méthodes, on pourra se référer à *Breda 1999, Dufrene et Breda 1995, Soudani et al. 2001, Welles 1990*. La plupart sont d'ailleurs très proches des méthodes indirectes d'estimation de l'éclairement. En particulier les photographies hémisphériques ont été fréquemment utilisées pour obtenir l'indice foliaire (*Chen et al. 1991, Planchais et Pontailier 1999, Van Gardingen et al. 1999*). Cependant, dans notre cas, nous cherchons à obtenir non pas l'indice foliaire (LAI), mais la densité de surface foliaire (LAD) contenue dans les volumes de houppier représentés dans le modèle tRAYci. Il est possible de passer du LAI au LAD en connaissant le volume total des houppiers (*MacFarlane et al. 2003*), ce que nous pouvons obtenir avec tRAYci. Cependant la forte stratification verticale des houppiers et la présence de trouées, conduisent à des biais pour l'estimation de la surface foliaire effective par des méthodes indirectes, du fait de l'agrégation du feuillage et de l'auto ombrage des feuilles. De plus le paramètre *LAD* utilisé dans tRAYci ne correspond pas exactement à la densité de surface foliaire réelle. En effet, la valeur du paramètre *LAD* représente non seulement la surface foliaire, mais aussi les branches (*Brunner 1998*).

Nous avons donc préféré considérer le *LAD* en tant que paramètre ajustable du modèle, plutôt que comme une donnée mesurable sur le terrain. Néanmoins, nous avons fait quelques tentatives d'estimation du *LAD* d'arbres individuels en peuplement à partir de l'analyse de photographies (réalisées avec un objectif normal), prises à différentes distances de l'arbre pour des angles de prise de vue variés, en se référant à la forme géométrique utilisée pour représenter les houppiers. Malheureusement, du fait de la proximité des arbres dans le peuplement, il était en général impossible d'isoler les feuilles d'un arbre donné sur la photographie. Nous avons testé l'utilisation d'un ballon d'un mètre de diamètre, gonflé à l'hélium comme écran, pour n'obtenir sur la photographie que les feuilles appartenant à un arbre donné. Une méthode semblable a été utilisée par *Meir et al. 2000*. Cependant nous avons abandonné cette voie (en tout cas pour la thèse), du fait des nombreuses mises au point qui restaient à mettre en œuvre, ne nous permettant pas d'espérer des résultats satisfaisants dans la durée du travail.

Dans notre cas nous avons calibré le paramètre *LAD* en comparant les simulations obtenues pour différentes valeurs de *LAD* à des estimations indépendantes de l'éclairement issues des photographies hémisphériques. Du fait des nombreuses espèces présentes sur le dispositif en mélange très inégal, il était difficilement envisageable de pouvoir calibrer une valeur de *LAD* par espèce. Nous avons donc opté pour une unique valeur moyenne pour l'ensemble des espèces. Ce faisant nous faisons l'hypothèse que les disparités entre les espèces dont nous disposons sont relativement faibles. Considérant que nous n'avons que des feuillus, que nous n'avons pas d'essences dont le feuillage paraît particulièrement clairsemé (tel que le frêne ou le bouleau) et que le charme est très largement dominant, cette hypothèse nous semble acceptable.

Rappelons que nous avons deux séries de photographies hémisphériques. La série 1 a été prise aux mêmes emplacements que les capteurs CBE (40 points à environ 1,50 m de hauteur). La série 2 a été prise au dessus des placeaux de régénération (137 photographies à des hauteurs allant de 1,50 m à 8 m). Nous avons déjà utilisé la série 1 pour évaluer l'estimation de l'éclairement relatif par les photographies hémisphériques, en comparaison de celui issu des capteurs CBE. Nous utiliserons la

série 2 pour calibrer le paramètre LAD . En effet cette série est composée de photographies prises sur l'ensemble de la surface des zones d'étude, nous permettant ainsi d'ajuster le LAD à partir de simulations prenant en compte une grande quantité de houppiers différents.

Notre approche consiste à réaliser des simulations de l'éclairement relatif pour les points où nous avons pris les photographies de la série 2, avec des valeurs de LAD différentes, et à choisir la valeur donnant la meilleure relation entre simulation du modèle tRAYci et estimation par les photographies hémisphériques.

Cependant nous avons précédemment constaté un biais dans la prédiction de l'éclairement relatif ($ER\%$) par les photographies hémisphériques (en comparaison des capteurs) pour les faibles valeur de $ER\%$. Nous avons donc d'abord ajusté une courbe permettant de corriger l'estimation des photographies hémisphériques, afin d'obtenir une relation linéaire entre la valeur de $ER\%$ issu des capteurs CBE et celle estimée par les photographies hémisphériques (**figure 44**). Cet ajustement a été réalisé sur la période du 25 juin au 18 août 2004, avec une correction cosinus activée pour les photographies, étant donné que nous utilisons les capteurs comme référence. Nous avons utilisé une distribution SOC et la valeur mesurée de P_{dif} (48,69 %), pour la part diffuse. Nous avons obtenu l'équation suivante :

$$ER\%_{corr} = 0,7545 \cdot ER\% + 3,1115 \cdot \sqrt{ER\%} - 10,2798$$

Nous avons calculé la valeur de $ER\%_{corr}$ pour les photographies de la série 2. Nous avons établi des régressions linéaires entre la valeur $ER\%$ obtenu avec le modèle tRAYci pour des valeurs de LAD allant de $0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ à $10 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$, et la valeur de $ER\%_{corr}$ des photographies. Là encore, les simulations ont été conduites sur la période du 25 juin au 18 août 2004 (correction cosinus activée, distribution SOC et $P_{dif} = 48,69 \%$) afin de rester dans les conditions utilisées pour calculer les valeurs de $ER\%_{corr}$. Pour chaque régression nous avons testé si le modèle obtenu était significativement différent de la droite identité (à l'aide de la procédure STAT/REG/TEST du logiciel SAS, *SAS Institute Inc. 2000*). Nous avons choisi la valeur de LAD pour laquelle le modèle était le moins significativement différent de la droite identité, présenté en **figure 45** (niveau de significativité de l'écart du modèle à la droite identité de 0,82). Nous avons ainsi obtenu une valeur de LAD de $1,6 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$.

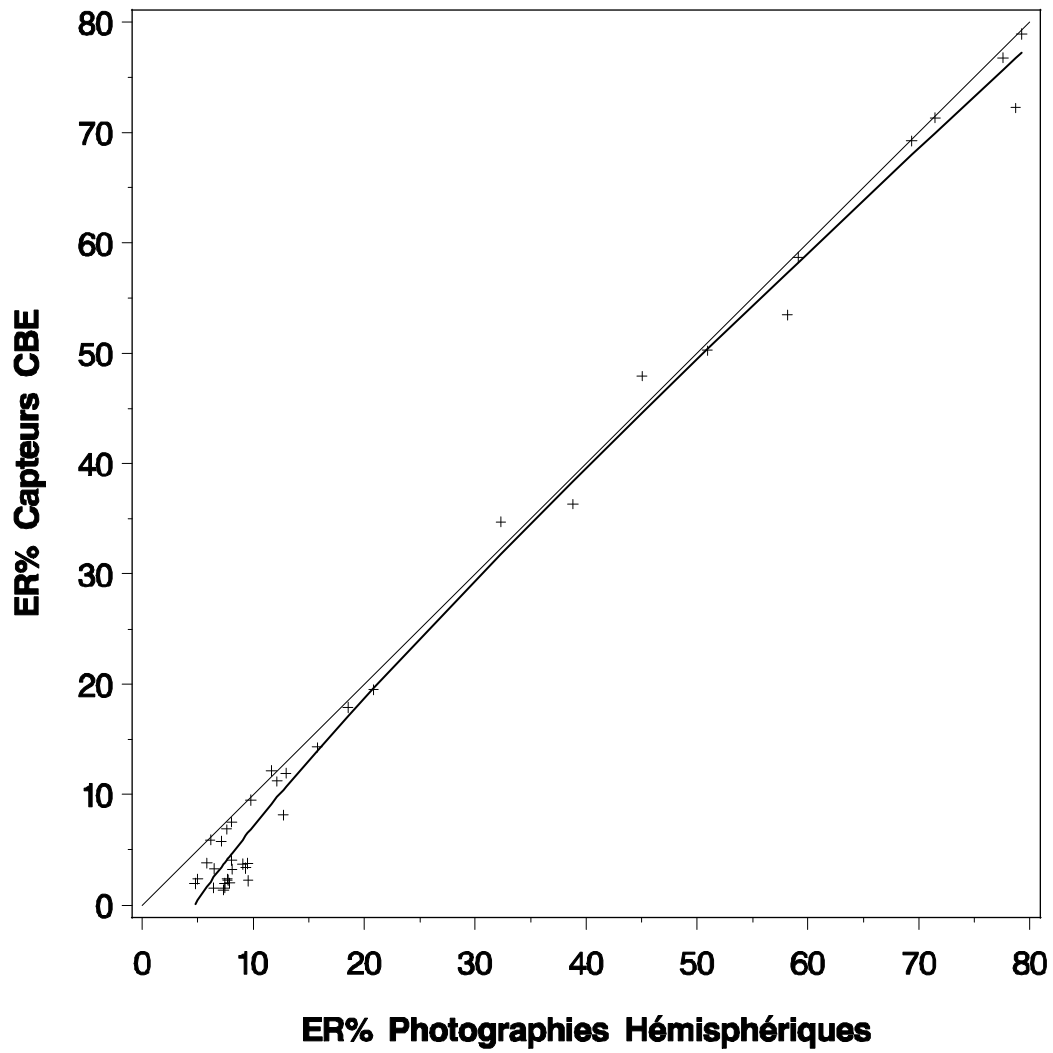


Figure 44 : Valeur de l'éclairement relatif (ER%) issue des capteurs CBE en fonction de celle obtenue par les photographies hémisphériques. La droite identité est représentée en trait fin. La courbe ajustée, permettant de calculer la valeur de $ER\%_{corr}$ pour les photographies est figurée en trait gras.

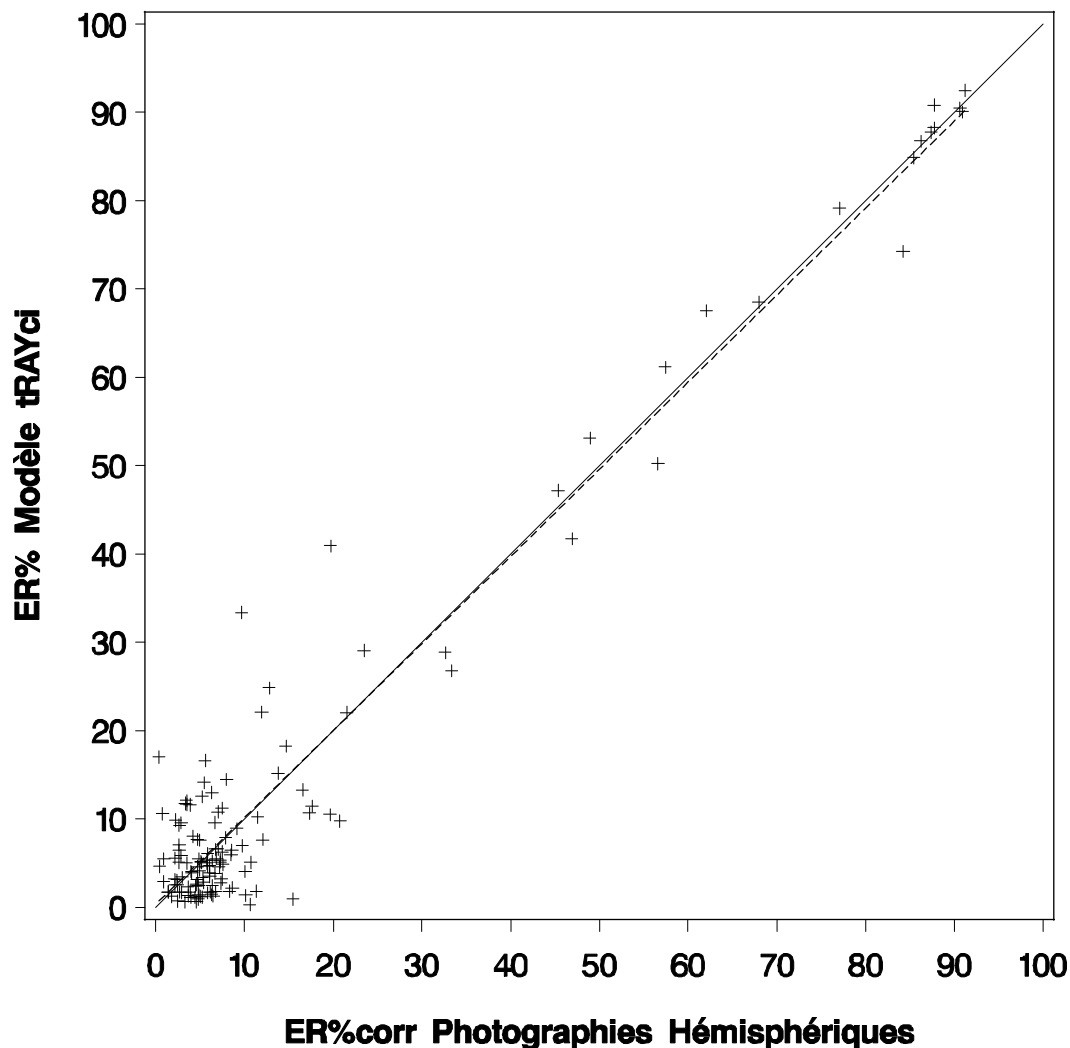


Figure 45 : Relation entre l'éclairage relatif ($ER\%$) simulé par le modèle tRAYci pour une valeur de LAD de $1,6 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ en fonction de la valeur de l'éclairage relatif corrigé ($ER\%_{\text{corr}}$) obtenu par les photographies hémisphériques. La droite de régression est représentée en pointillés. La droite identité est représentée en trait continu.

3. Validation des simulations

Pour valider le modèle tRAYci, nous avons comparé la simulation obtenue sur la période du 25 juin au 18 août 2004 (correction cosinus activée, distribution SOC et $P_{\text{dif}} = 48,69 \%$), avec l'éclairage relatif obtenu par capteurs CBE pour les mêmes positions (**figure 46**). Il faut signaler que les positions des capteurs 21, 22 et 23 ont été exclues, du fait qu'ils étaient entourés d'une régénération dense et assez haute, non prise en compte dans le modèle. Nous constatons une bonne adéquation entre modèle et capteurs : la régression linéaire obtenue n'est pas significativement différente de la droite identité (niveau de significativité $p = 0,12$) et le R^2 est de 0,98.

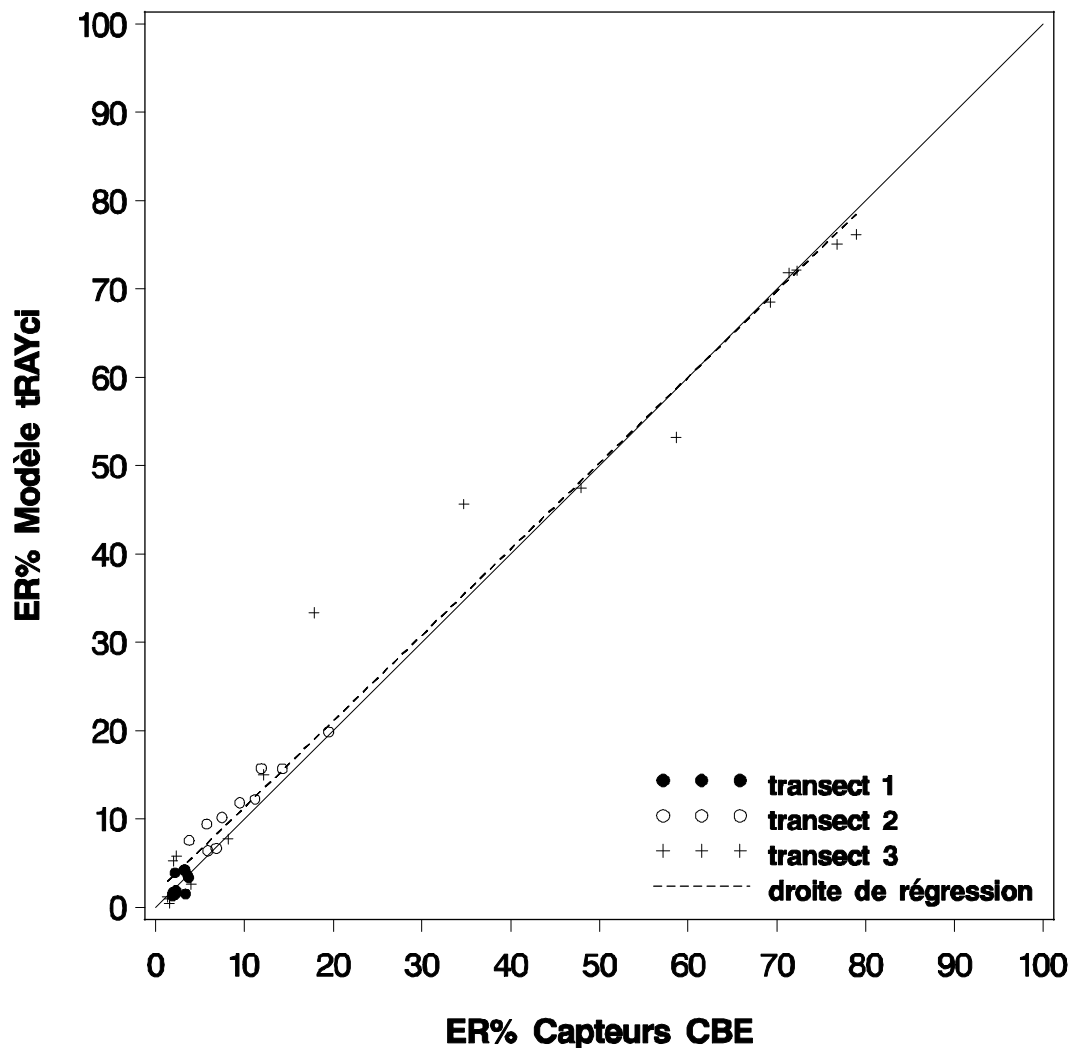


Figure 46 : Relation entre l'éclairage relatif (ER%) simulé par le modèle tRAYci (avec les données mesurées et un LAD de $1,6 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$) en fonction de la valeur de l'éclairage relatif issu des capteurs CBE. La droite identité est représentée en trait continu.

Il semble cependant qu'il y ait une légère surestimation de l'éclairage par le modèle pour le transect 2. Cet écart semble dû à des imprécisions locales de la représentation des houppiers. En particulier, à cet endroit, un nombre relativement important de houppiers sont étriqués ou penchés. Un autre élément à prendre en compte est le fait que le transect 2 est placé dans une trouée récente de 1999. Les arbres ayant réagi il y a relativement peu de temps à cette ouverture, il est possible qu'ils présentent des particularités géométriques. Dans ce cas, la différence d'un an entre les mesures de houppiers et la prise des photographies explique peut-être l'écart, les houppiers ayant pu pousser particulièrement rapidement du fait de la mise en lumière. Cependant rien ne nous permet d'étayer ou d'infirmer cette dernière hypothèse.

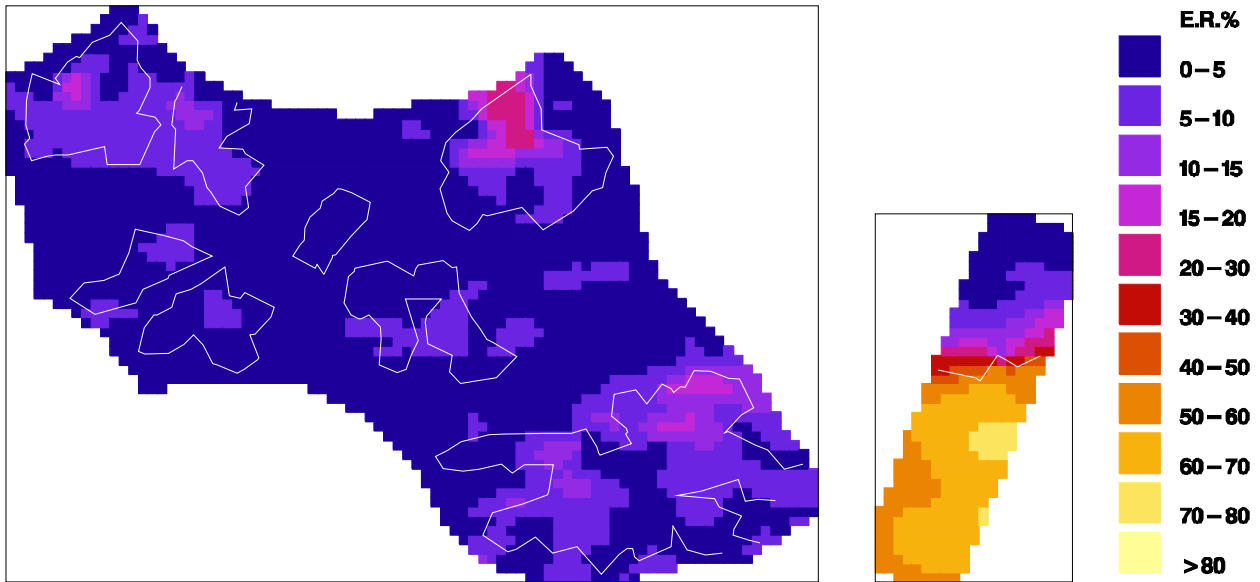


Figure 47 : Carte de répartition de l'éclairement relatif à un mètre de hauteur, sur les zones d'études des placettes 1 (à gauche) et 2 (à droite). Les valeurs sont issues du modèle tRAYci alimenté avec les données mesurées (période du 1^{er} mai au 31 octobre, $P_{diff} = 48,69\%$, distribution SOC avec $b = 1,23$, correction cosinus désactivée). Un point a été simulé tous les 2 m. Chaque pixel élémentaire de la carte représente la valeur moyenne des points simulés à ses quatre sommets. Le contour des trouées est délimité en trait blanc.

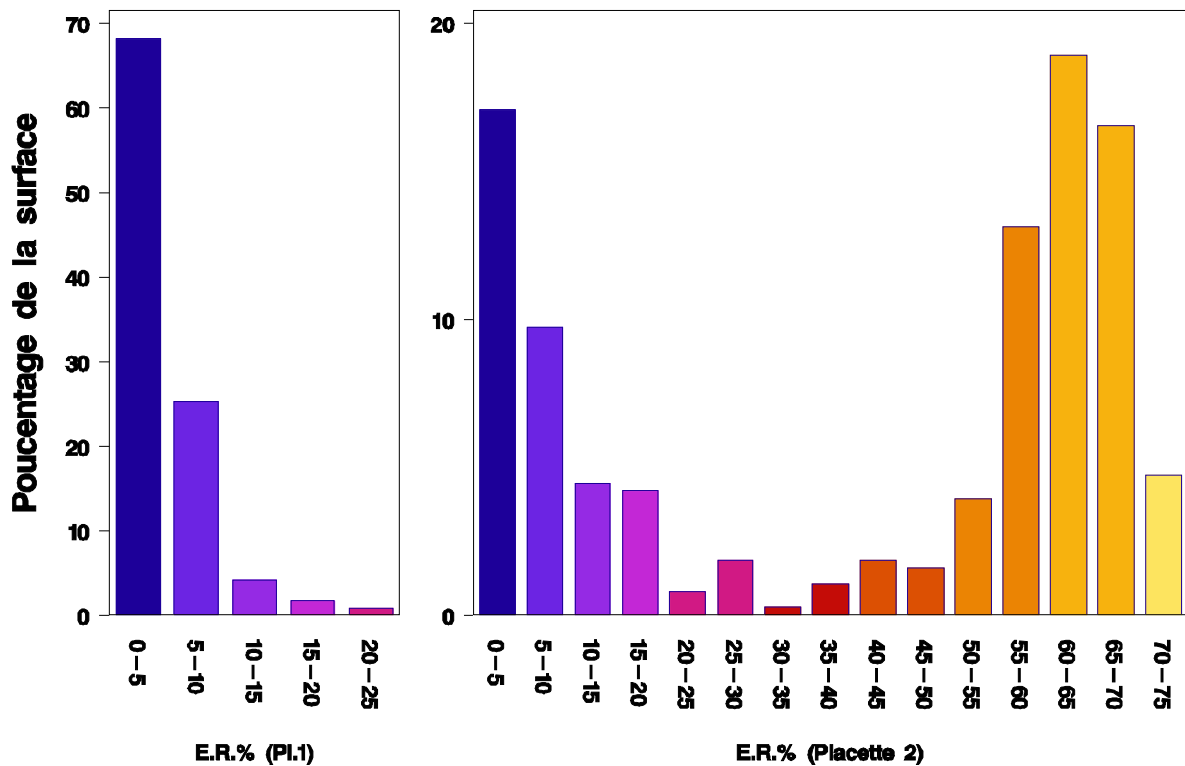


Figure 48 : Distribution de la surface par classes de 5 % d'éclairement relatif, pour les placettes 1 (à gauche) et 2 (à droite), pour la simulation réalisée à l'aide tRAYci. Pour les détails de la simulation, se reporter à la figure 47.

4. Cartographie de l'éclairage sur le dispositif

La **figure 47** présente la cartographie à un mètre au dessus du sol (un point tous les deux mètres) obtenue par le modèle tRAYci avec les données mesurées sur le peuplement, pour les deux zones d'étude. Cela permet d'illustrer la variabilité des conditions d'éclairage sur le dispositif. Nous constatons en particulier très nettement l'effet des trouées.

Un autre mode de représentation de ces données, que nous nommerons histogramme d'éclairage relatif, permet d'avoir une approche à l'échelle du peuplement (**figure 48**). Il s'agit de calculer la surface représentée pour chaque gamme d'éclairage relatif (ici par classes de 5 %). Ce type d'approche, couplée à des données sur les gammes d'éclairage propices à la régénération des différentes espèces, permettrait d'évaluer les potentialités de régénération pour la parcelle. L'utilisation d'un modèle de lumière tel que tRAYci permet d'envisager ainsi la comparaison de différents scénarios sylvicoles et leur effet sur l'éclairage relatif, et incidemment sur les potentialités de régénération. Ce type de données permettant de caractériser la distribution de l'éclairage sur une parcelle peut également être utilisé pour l'analyse de la variabilité spatiale de tout processus dépendant de l'éclairage relatif.

Chapitre III : Analyse de la structure du couvert

A. Démarche

Dans le chapitre précédent nous avons vu comment la description géométrique du peuplement permet d'estimer l'éclairement relatif sous couvert, à l'aide d'un modèle de lumière spatialement explicite tel que tRAYci. Nous allons maintenant nous intéresser plus précisément à cette géométrie, en analysant la structure des houppiers des arbres mesurés sur le dispositif. Cette analyse servira de base à la reconstitution des houppiers à partir de jeux réduits de données, composés uniquement de l'essence et du diamètre à 1,30 m des arbres.

Tout d'abord nous nous placerons à l'échelle du peuplement afin d'analyser la distribution verticale des houppiers. Cette partie permettra d'étudier la place relative des différentes essences dans le peuplement, et de donner quelques repères concernant la structuration verticale du couvert.

Ensuite nous relierons les principales caractéristiques des houppiers au diamètre à 1,30 m des arbres, en fonction de leur essence. Les relations ainsi établies permettront de reconstituer des houppiers réalistes uniquement à partir de données mesurées sur les troncs. Nous verrons en quoi elles permettent également de mieux cerner les différentes variables caractéristiques du houppier et leur variabilité.

Enfin nous analyserons plus en détail l'extension latérale du houppier et sa variabilité. Pour ce faire nous étudierons un certain nombre de critères de forme des houppiers, permettant d'appréhender leur plasticité dans le contexte de compétition entre les houppiers rencontrés dans le dispositif.

Pour ce chapitre nous avons utilisé les données des arbres pour lesquels les houppiers ont été caractérisés, en zones d'étude et tampon I des deux placettes. Cela fait un total de 1359 arbres.

B. Structuration verticale des houppiers

En nous fondant sur la géométrie des houppiers proposée dans tRAYci (avec des paramètres de forme égaux à 2, voir chapitre II partie D), nous avons reconstitué une maquette en trois dimensions de la partie du peuplement où les houppiers ont été mesurés. Pour pouvoir analyser la structuration verticale de façon claire, nous n'avons pas tenu compte ici des variations d'altitude. Les arbres ont ainsi été implantés sur une surface horizontale. Étant donné les faibles variations d'altitude sur le site, cette approximation n'a quasiment pas d'influence à l'échelle locale, mais elle permet de comparer tous les arbres à niveau égal.

Pour chaque arbre il est relativement aisé – du fait de la représentation choisie – de calculer la projection du houppier à une hauteur donnée. Rappelons que les huit rayons mesurés pour chaque arbre sont tous définis dans un plan horizontal situé à la hauteur de plus grande largeur de houppier H_m . En les reliant les rayons successifs par des arcs elliptiques, nous obtenons l'aire du houppier i à la hauteur H_m , que nous noterons $S_{max,i}$. Cette surface est en fait tout simplement la surface projetée au sol du houppier. Nous pouvons également calculer pour toute hauteur h les rayons de houppier

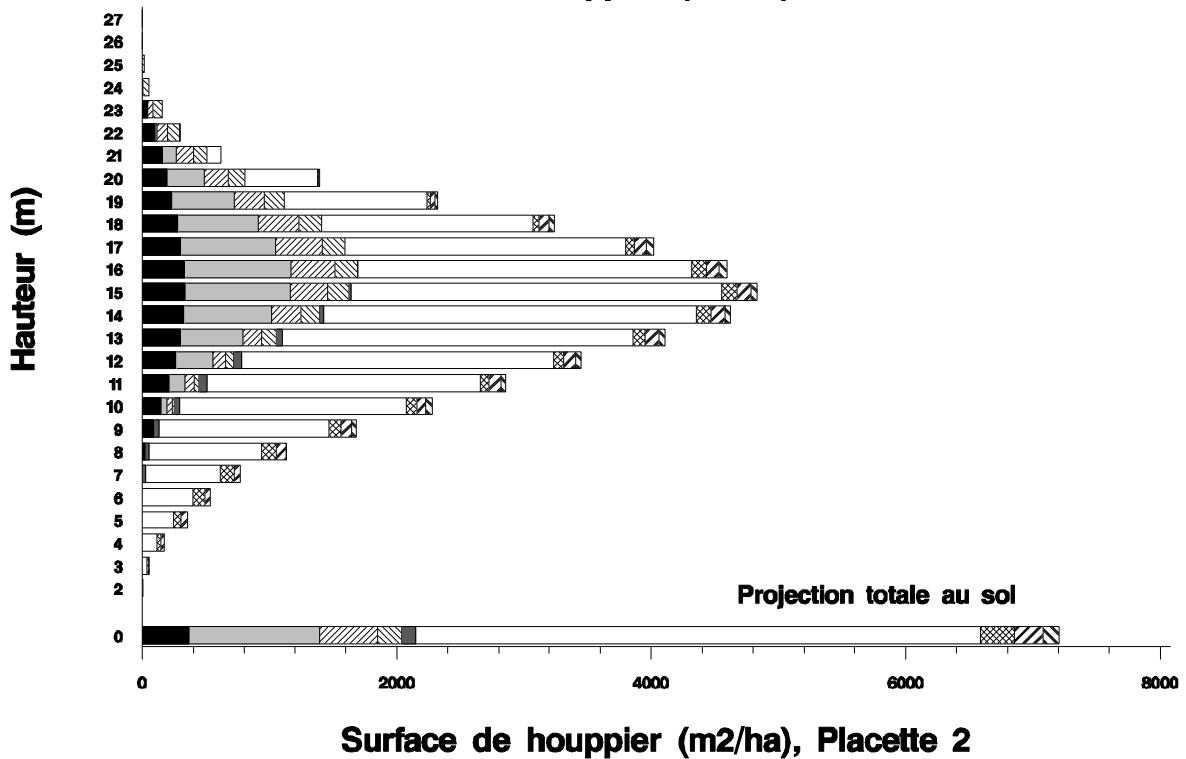
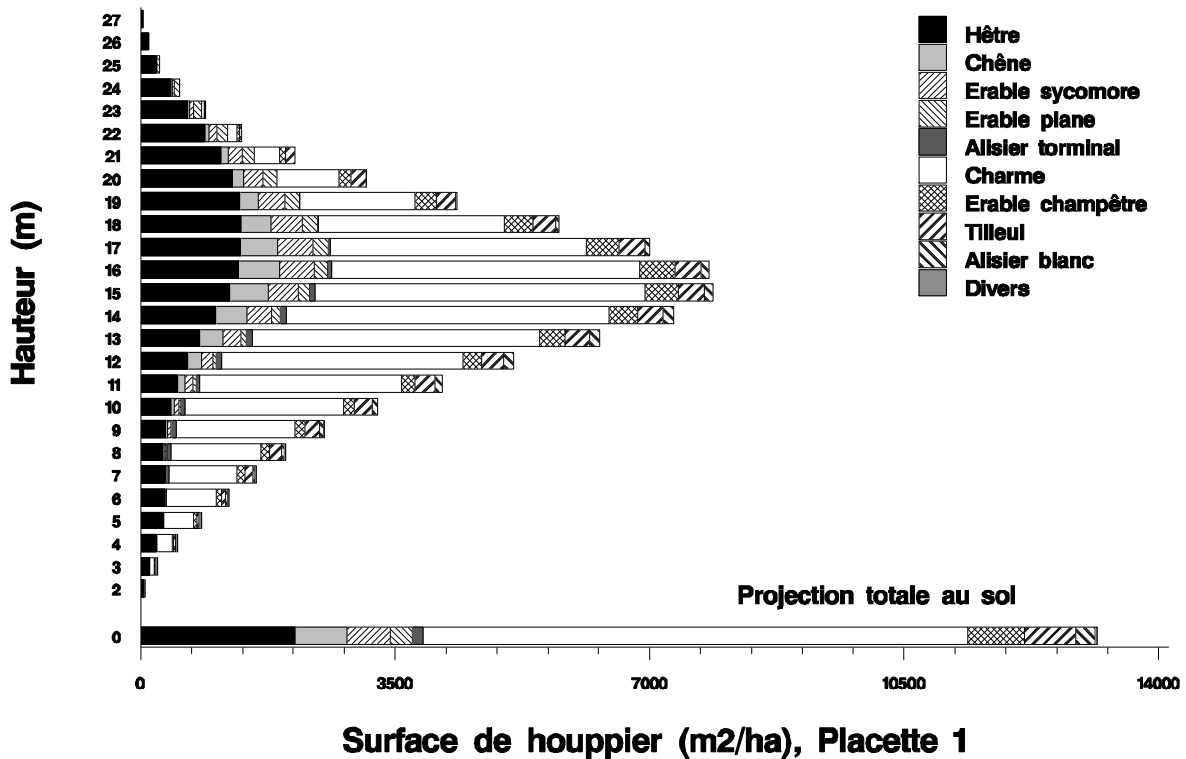


Figure 49 : Distribution verticale de la surface de houppier. Pour chaque hauteur la surface totale des sections de houppier est calculée par essence. La hauteur 0 correspond à la projection au sol de tous les houppiers.

correspondant, à partir de la formule des paramètres de forme (voir la **figure 40** du chapitre II) et obtenir l'aire $S_{h,i}$ du houppier dans un plan horizontal situé à la hauteur h . L'aire ainsi définie correspond à une coupe horizontale du houppier à la hauteur h .

1. Distribution verticale des essences

Pour analyser la distribution verticale des houppiers par essence, nous avons défini des plans horizontaux tous les mètres depuis le sol jusqu'en haut de la canopée. Pour chaque hauteur h nous avons calculé la somme des $S_{h,i}$ séparément pour chaque essence et chaque placette (**figure 49**). Le houppier d'un même arbre occupe une gamme de hauteur plus ou moins étendue. Cela revient à faire des coupes horizontales dans la maquette du peuplement et à calculer la surface des houppiers dans ces coupes. Chaque houppier est présent avec une importance variable sur une gamme de hauteur également variable.

Nous avons de plus défini une hauteur $h = 0$ m qui correspond à la projection totale au sol, c'est-à-dire la somme des $S_{max,i}$. Dans ce cas le houppier de chaque arbre est projeté au sol. Il n'y a qu'une surface par houppier, quelle que soit son extension verticale.

En placette 1, nous constatons qu'en terme de surface projetée au sol, le charme est très majoritaire (environ 57 % de la somme des surfaces projetées des différentes espèces), le hêtre étant second (16 %) mais avec une surface nettement moindre. Viennent ensuite les érables, le tilleul et le chêne (23 % en tout). Les alisiers sont peu représentés (3 %). Du point de vue de la stratification verticale, la répartition est progressive. Le hêtre est clairement dominant en hauteur. En descendant, apparaissent d'abord l'érable plane et l'érable sycomore puis, ensemble, le charme, le chêne, l'érable champêtre et le tilleul. Les deux alisiers n'apparaissent que nettement plus bas. Du point de vue de la surface de houppier, le hêtre est majoritaire au dessus de 20 m. En dessous c'est le charme qui fournit l'essentiel de la surface de houppier. Le hêtre, l'érable sycomore, l'érable plane et le chêne atteignent leur maximum de surface de houppier autour de 17 m, juste au dessus du charme qui atteint le sien autour de 15 m en même temps que l'érable champêtre et le tilleul. Les deux alisiers ont toujours une surface très faible, mais nous pouvons situer un maximum approximatif autour de 13-14 m. Le hêtre est présent sur toute la hauteur. Le charme a également une gamme de hauteur particulièrement étendue. Le rapprochement avec les histogrammes en diamètre présentés au chapitre I, permet de bien voir que les surfaces correspondent à des réalités sensiblement différentes selon les essences. En effet la dominance en hauteur du hêtre semble correspondre aux très gros diamètres rencontrés pour cette essence. Ces arbres peu nombreux occupent à eux seul une grande gamme de hauteur et produisent une grande surface. Cela explique l'importance relative plus grande du hêtre en surface de houppier qu'en nombre de tiges. La présence du hêtre sur toute la gamme de hauteur s'explique par le fait qu'il est présent dans toutes les gammes de diamètre. Pour le charme par contre, l'étalement sur une large gamme de hauteur correspond à un nombre de tiges considérable. Il y a donc une grande hétérogénéité de statut social au sein de cette essence. L'érable champêtre et le tilleul ont un comportement semblable au charme, mais avec une répartition plus équilibrée sur la gamme de hauteur. L'érable plane, l'érable sycomore et le chêne ont, quant à eux, une gamme de hauteur et de diamètre assez restreintes, ce qui suppose une certaine homogénéité pour ces espèces, plutôt en position dominante. Les deux alisiers ont également une gamme restreinte, mais en position clairement dominée.

En placette 2, nous retrouvons les mêmes principes avec une différence significative : il n'y a pas de gros hêtres dominants comme en placette 1. Par contre le chêne est nettement plus présent. Si l'ordre d'apparition en hauteur des différentes espèces reste le même, l'écart entre les hauteurs dominantes est plus faible. Nous obtenons donc une situation nettement moins stratifiée avec un

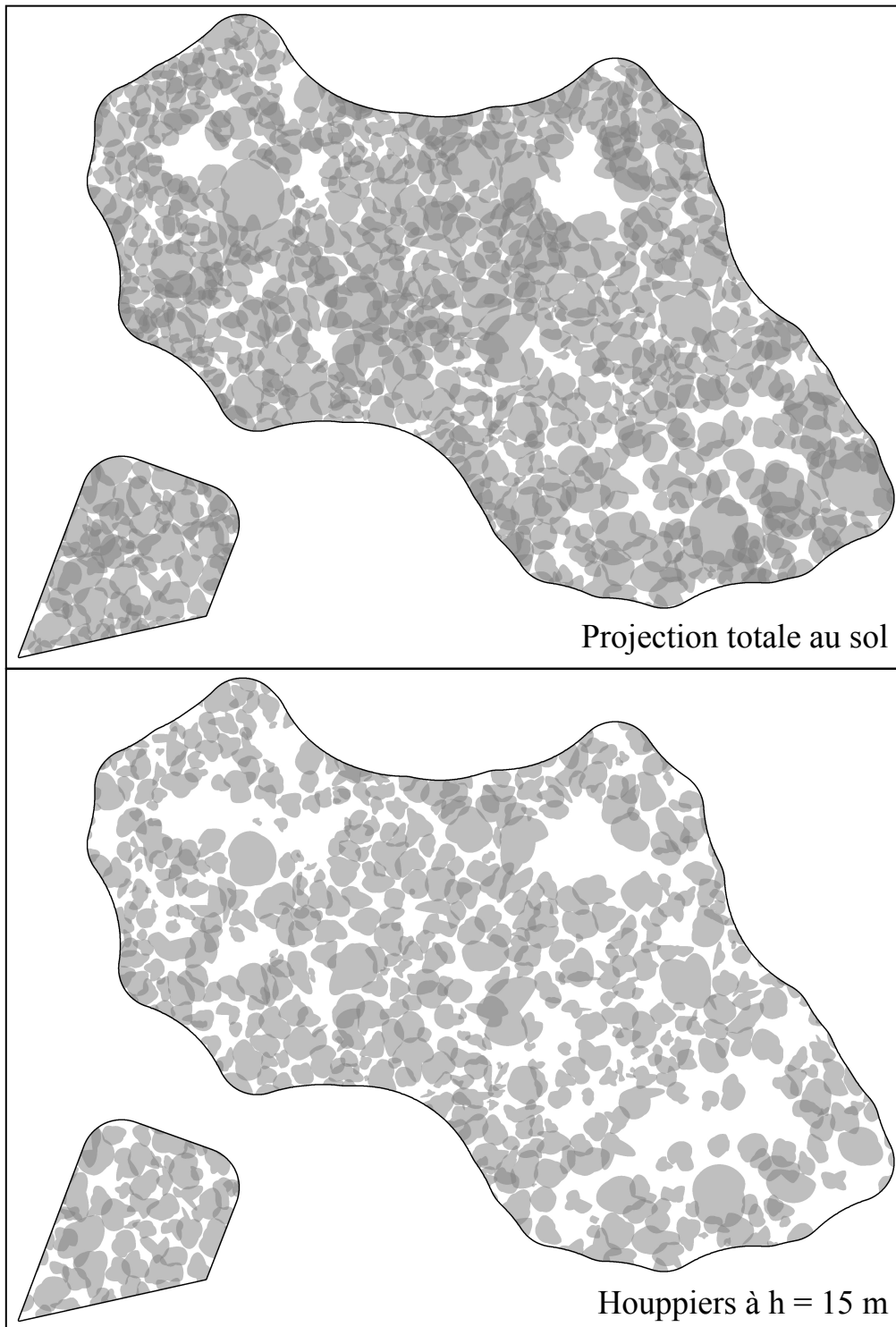


Figure 50 : En haut, carte des projections de houppiers au sol pour la zone utilisée pour les calculs de recouvrement. En bas, carte de l'aire des houppiers à la hauteur de 15 m. Dans les deux cas les houppiers ont une transparence de 50 %, permettant de visualiser le nombre de houppier superposés en un point par le niveau de gris résultant, d'autant plus foncé qu'il y a un grand nombre de houppiers superposés. A 15 m le recouvrement est effectif, alors qu'au sol il peut résulter de la stratification verticale des houppiers.

maximum de surface de houppier atteint autour de 15-16 m conjointement par le chêne, l'érable sycomore, l'érable plane, charme et le hêtre. Le charme a environ la même présence relative aux autres essences qu'en placette 1, mais le tilleul, l'érable champêtre et le hêtre se placent légèrement plus bas. Les alisiers ont la même position dominée qu'en placette 1. Cela correspond bien à la différence entre les histogrammes de diamètre signalée en chapitre I : le peuplement est plus régularisé qu'en placette 1. Cela est peut-être dû à un arrêt des coupes de taillis plus précoce, ce que nous n'avons pas pu vérifier.

2. Recouvrement entre houppiers

Afin de mieux caractériser la structure du couvert nous avons déterminé le recouvrement entre houppiers. Cette fois il n'a pas été possible d'utiliser tous les houppiers mesurés. En effet pour les houppiers proches du bord des zones tampon I, une partie des houppiers voisins n'a pas été mesurée. Par conséquent nous n'avons évalué le recouvrement que sur une surface d'analyse dont les limites étaient situées à 10 m à l'intérieur des zones tampon I. De même en placette 2, nous avons mis la limite à la lisière de la grande trouée, afin de ne considérer que la partie constituée du peuplement fermé. Pour cette analyse les deux placettes n'ont pas été séparées. En effet, le fait qu'il y ait des trouées en placette 1 et pas dans la partie utilisée de la placette 2 introduirait des différences entre placettes sans rapport avec le recouvrement entre houppiers, sans permettre pour autant leur comparaison. Pour pouvoir comparer les deux placettes il faudrait soustraire toutes les zones de trouées de la placette 1, ce qui réduirait drastiquement le nombre d'arbres utilisés dans l'analyse. En fait même en groupant les deux placettes, les trouées biaisent très légèrement l'analyse du fait que les arbres à la lisière des trouées ont moins de voisins que les autres (donc moins de recouvrement potentiel). Cependant nous considérerons ce problème comme négligeable étant donné le grand nombre de houppiers considérés et la taille relativement petite des trouées par rapport à la surface d'analyse.

Nous avons, comme précédemment, utilisé la maquette en trois dimensions du peuplement (dans le module *regelight*, Piboule 2002) pour réaliser une coupe horizontale tous les mètres depuis le sol jusqu'à la hauteur maximale sur le dispositif. Pour chaque hauteur une image haute définition de la coupe a été créée (**figure 50**) dans laquelle l'aire des houppiers à cette hauteur était représentée par un niveau de gris homogène commun à tous les houppiers, affecté d'une transparence de 50 %. Après avoir isolé la surface d'analyse, nous avons déterminé le nombre de pixels pour chacun des niveaux de gris résultant de la superposition des houppiers. Du fait de la transparence chaque niveau de gris correspondait de façon non équivoque à un nombre précis de houppiers superposés. Nous avons réalisé le même travail pour la projection totale au sol (hauteur $h = 0$ m). La **figure 51** présente les résultats.

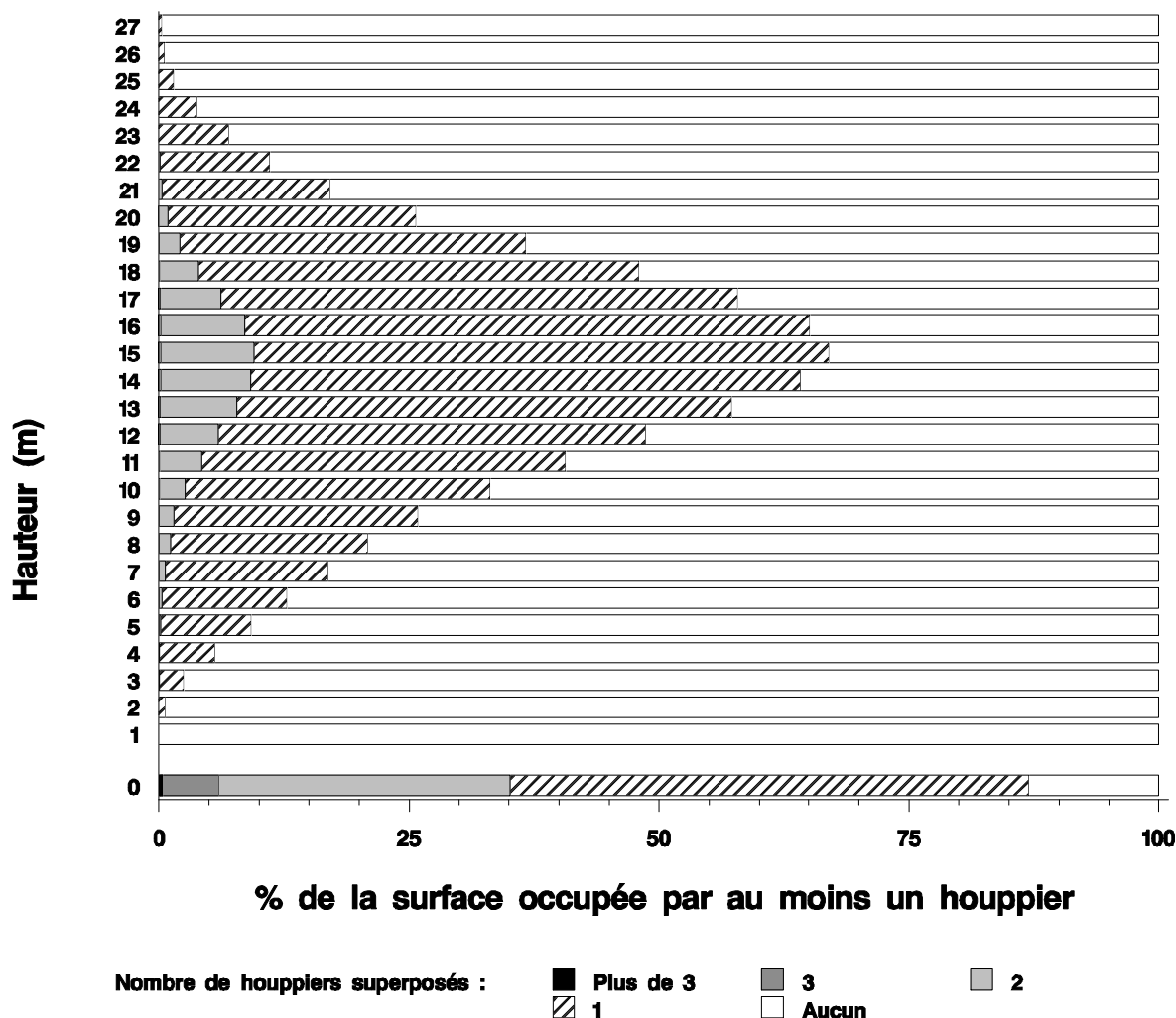


Figure 51 : Recouvrement entre les houppiers pour différentes hauteurs. Pour chaque tranche de hauteur le pourcentage de la surface occupé par 0, 1, 2, 3 ou plus de 3 houppiers est indiqué. La hauteur 0 correspond au recouvrement des projections au sol.

Il faut d’abord remarquer le fort décalage entre les recouvrements à différentes hauteurs – où les houppiers se chevauchent effectivement – et le recouvrement des projections au sol. Ainsi même si nous considérons la hauteur où il y a le plus de recouvrements (15 m), le pourcentage de surface où au moins deux houppiers se chevauchent n’est que d’environ 10 % contre 35 % si nous considérons le recouvrement des projections au sol. Cela est encore plus marqué si nous nous intéressons au pourcentage de surface où au moins trois houppiers se chevauchent : nous passons de moins de 0,5 % à environ 6 %. De la même façon la proportion de la surface où il n’y a aucun houppier est beaucoup plus faible dans le cas des projections au sol. Tout cela indique une forte structuration verticale des houppiers. La **figure 52** illustre ce phénomène.

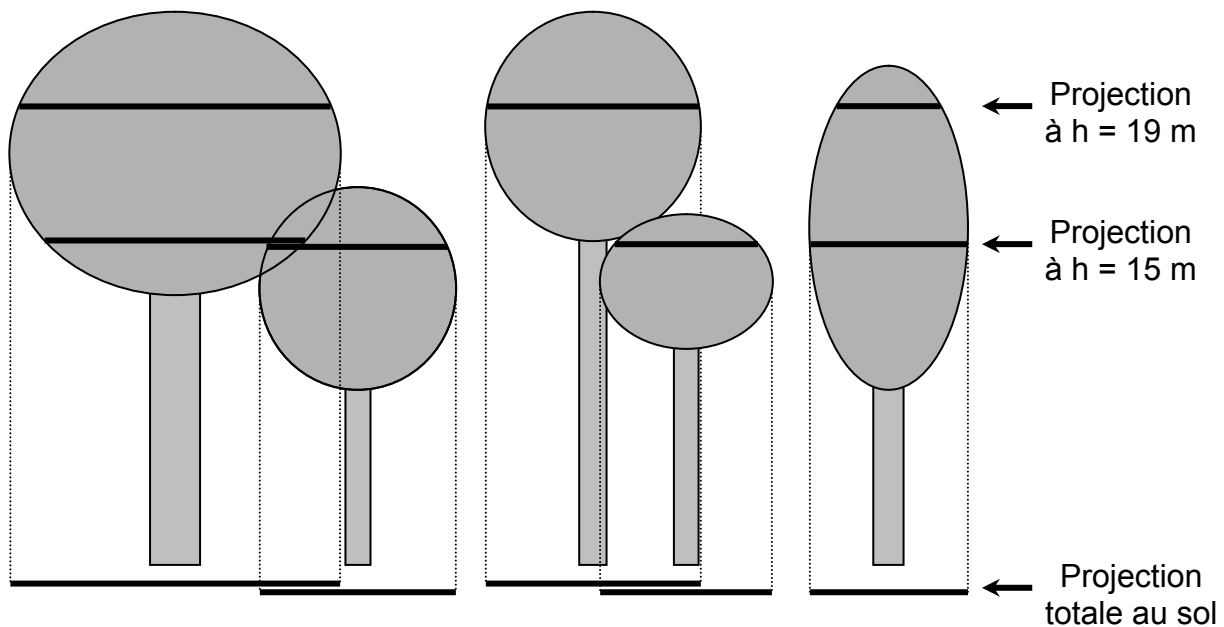


Figure 52 : Illustration du décalage entre recouvrement à une hauteur donnée et recouvrement total au sol. Les arbres et leurs houppiers sont représentés en gris. Les traits noirs épais représentent la surface de houppier à une hauteur donnée (15 ou 19 m) ou en projection totale au sol. Les pointillés matérialisent la projection des houppiers au sol. Nous remarquons à 15 m une zone de recouvrement effectif. Au sol les recouvrements sont plus fréquents du fait de la stratification verticale des houppiers

Il est également important de noter que le recouvrement effectif (à une hauteur donnée) entre houppiers est relativement faible : moins de 10 % de la surface à 15 m de hauteur, et moins de 5 % hors de la tranche 11-18 m. Le pourcentage de surface où plus de deux houppiers se recouvrent est, quand à elle, négligeable. Une grande part des recouvrements entre houppiers est due à la représentation géométrique utilisée. En effet, l'enveloppe du houppier étant délimitée par des arcs d'ellipse, elle ne peut tenir compte du contour exact de la bordure de chaque houppier qui est par nature très irrégulier. Ainsi le recouvrement réel entre les houppiers est probablement très inférieur à ce que nous venons de voir. Le recouvrement observé correspond à des zones où la frontière exacte entre deux houppiers voisins n'est pas modélisable avec la géométrie choisie. Une autre cause possible de recouvrement est le cas de quelques arbres dont le houppier est inclus dans celui d'un autre (observés sur le terrain). Là encore la géométrie utilisée ne peut gérer ces inclusions.

C. Relations entre caractéristiques du houppier et diamètre à 1,30 m en fonction de l'essence

1. Variables étudiées

La représentation géométrique utilisée décrit un houppier à l'aide des variables suivantes : hauteur totale (Ht), hauteur de base de houppier (Hb), hauteur de plus grande largeur de houppier (Hm) et huit rayons de houppiers (R_i , i allant de 1 à 8), définis par une longueur et un azimut. Dans cette partie, nous allons relier ces données à l'unique variable descriptive du tronc, le diamètre à 1,30 m, en fonction de l'essence.

Cependant certaines des variables du houppier sont relatives aux autres. Ainsi Hb et Ht sont fortement liées. Nous étudierons donc plutôt la longueur de houppier (LH) au lieu de Hb , sachant que : $LH = Ht - Hb$.

De même Hm , tout comme dans le modèle tRAYci, sera exprimée comme une proportion de LH , notée $Hm\%$. Si $Hm\% = 1$ alors $Hm = Ht$ et si $Hm\% = 0$ alors $Hm = Hb$.

Les rayons de houppier posent un problème : leurs azimuts sont variables, et leur longueur dépend fortement des voisins. C'est donc un rayon moyen que nous devons relier au diamètre à 1,30 m. Mais nous ne pouvons nous contenter de faire la moyenne des rayons mesurés, étant donné qu'ils ne sont pas répartis régulièrement. Nous utiliserons donc le rayon équivalent (R_{eq}), calculé comme le rayon du cercle dont la surface est égale à celle de la projection du houppier de l'arbre, dans la représentation géométrique utilisée (rayons reliés par des arcs elliptiques).

Pour ce qui est de la variable explicative, le diamètre à 1,30 m, là encore il convient de prendre quelques précautions du fait de la présence des cépées. En effet nous avons relevé un unique houppier pour chaque cépée. Or pour chaque cépée nous disposons du diamètre de chaque brin. Quel diamètre doit-il être pris en compte ?

Pour Ht , $Hm\%$ et LH nous utiliserons le diamètre du brin le plus gros (D_{max}). En effet la multiplicité des brins d'une cépée n'a pas d'effet additif sur les données de hauteur, qui sont plus probablement déterminées par le brin dominant. Si cette remarque paraît évidente pour Ht , elle est plus discutable pour $Hm\%$ et surtout LH dans le cas où les brins ont des diamètres très différents. Dans ce cas, la stratification verticale au sein de la cépée peut entraîner une augmentation de LH , et une modification de $Hm\%$ (**figure 53**). Il paraît cependant difficile de prendre en compte ce phénomène avec une unique variable de diamètre.

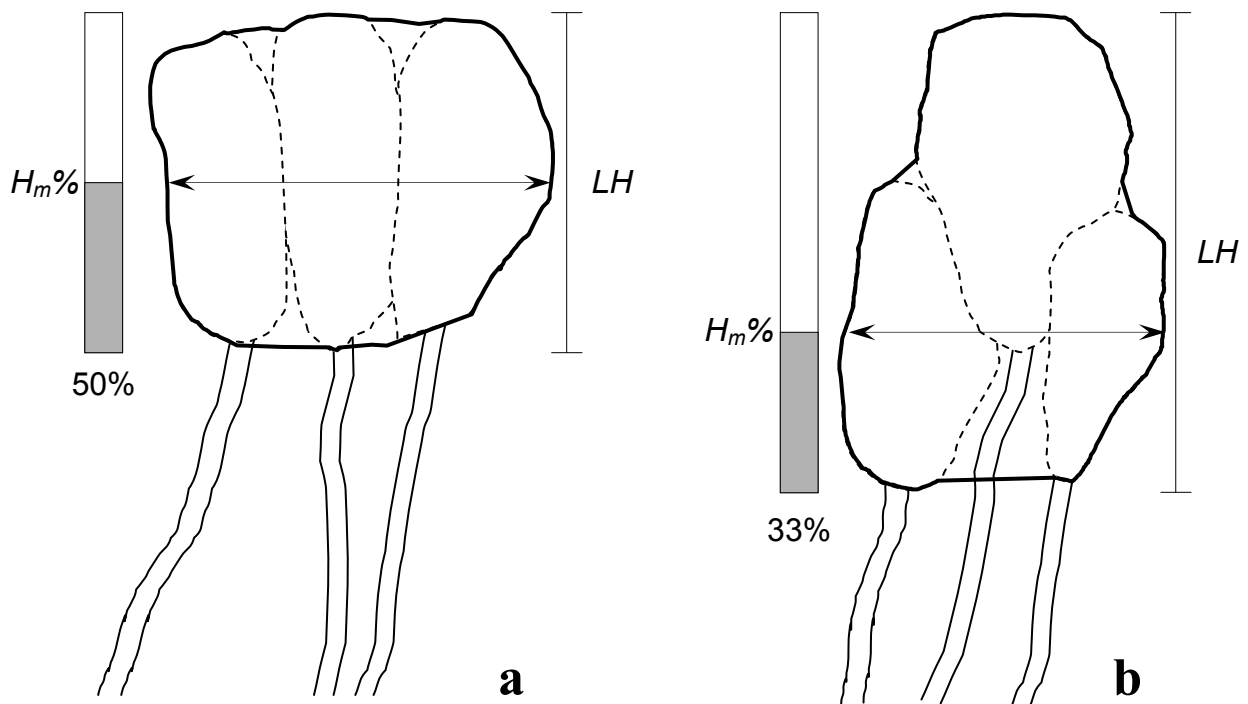


Figure 53 : Influence d'une stratification au sein de la cépée sur LH , H_m . En **a**, cas d'une cépée non stratifiée. En **b**, cas d'une cépée présentant un stratification verticale. Dans le cas présenté (relativement extrême) la stratification entraîne une augmentation de LH une diminution de $H_m\%$ et une réduction de l'extension latérale du houppier (doubles flèches). Les houppiers des brins de la cépée sont représentés en pointillés, le houppier de la cépée en trait gras.

En revanche, dans le cas de R_{eq} , les différents brins d'une cépée s'additionnent latéralement pour former le volume total de houppier. Nous utiliserons donc un diamètre équivalent pour la cépée (D_{eq}), égal au diamètre d'un tronc dont la surface terrière est la somme de la surface terrière des différents brins. Ainsi D_{eq} est la somme quadratique des diamètres des différents brins (D_j) :

$$D_{eq} = \sqrt{\sum_j D_j^2}$$

Dans le cas évoqué précédemment d'une stratification verticale des brins de la cépée, tous les brins ne participent pas forcément à R_{eq} . Par conséquent lorsque LH est sous-estimée, R_{eq} sera surestimé. Ces deux erreurs sont très contingentes à la structure propre de chaque cépée, mais elles se compensent dans une certaine mesure. Considérant cela et le fait que les situations correspondantes sont nettement minoritaires, nous supposons que l'approximation n'a pas d'influence majeure sur les relations établies. Notons également que si les brins sont fortement stratifiés, c'est que certains sont de taille nettement inférieure : ils participent donc proportionnellement beaucoup moins au volume total du houppier. L'erreur induite est donc limitée.

Pour les arbres qui ne sont pas des cépées, D_{max} et D_{eq} sont égaux.

Il faut garder à l'esprit, tout au long des analyses qui vont suivre, que les différentes essences ont des répartitions en diamètre très différentes. Pour cette raison les graphiques présentant les relations entre une variable du houppier et le diamètre à 1,30 m seront standardisés sur les deux axes, de façon à pouvoir comparer les essences entre elles. Pour les graphiques présentant les résidus de Student des régressions en fonction de la variable prédite, l'axe de la variable prédite sera par contre adapté à chaque espèce pour pouvoir juger correctement de la qualité de l'ajustement sur le domaine d'ajustement. Pour chaque relation un graphique en couleur permettra de superposer les relations obtenues pour chaque essence. Les relations ont été établies pour les deux placettes confondues. Cependant les points correspondant aux deux placettes seront représentés par des symboles différents (symbole + pour la placette 1 et symbole o pour la placette 2) afin de pouvoir vérifier l'homogénéité des données sur ce critère.

Pour chaque relation, un tableau donnera les données importantes de la régression, à savoir le nombre de points (N), la somme des carrés totale⁸ (SCT), la somme des carrés résiduelle (SCR), la valeur et l'erreur standard de chaque paramètre, le niveau de significativité du modèle (p-value) et le coefficient de détermination, R^2 calculé de la façon suivante :

$$R^2 = 1 - \frac{SCR}{SCT}$$

Les analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel SAS/STAT (*SAS Institute Inc. 2000*). Un total de 15 arbres a été exclu des analyses car ces arbres étaient très dépérissants ou avaient subi un accident récent. L'exclusion de ces arbres a été faite d'après des observations de terrain, réalisées lors de la mesure des arbres. Sur les 1359 houppiers mesurés, 1344 seront donc utilisés pour les analyses.

Concernant les essences de la catégorie « divers », le nombre d'individus est très faible (5 arbres). Des relations linéaires ont tout de même été établies afin de pouvoir prédire une valeur pour tout

⁸ La somme des carrés totale est la somme des carrés corrigée par la moyenne calculée comme suit :

$SCT = \sum_i (x_i - \bar{x})^2$, avec x_i les valeurs de chaque individu i , et \bar{x} la moyenne des x_i . Elle est nommée CSS dans les sorties de SAS/STAT (à ne pas confondre avec USS , la somme des carrés non corrigée).

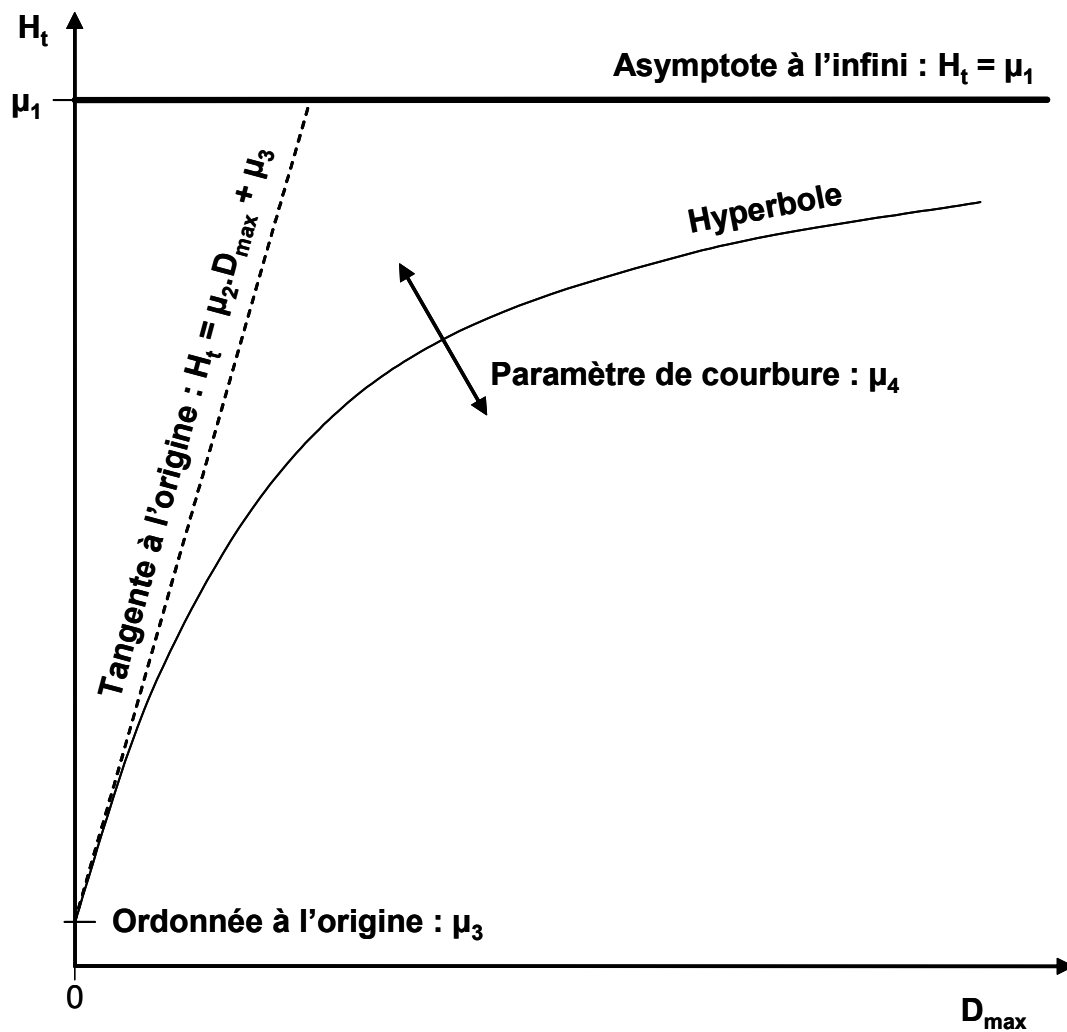


Figure 54 : Signification géométrique des paramètres du modèle hyperbolique utilisé (d'après Dhôte et De Hercé 1994). Dans l'exemple montré les paramètres ont été fixé comme suit : $\mu_1 = 25$; $\mu_2 = 1,5$; $\mu_3 = 1,3$; $\mu_4 = 0,5$.

arbre. Cependant dans ce cas les relations obtenues n'ont aucune valeur statistique et ne doivent être considérée que comme des ajustements empiriques qui ne seront pas utilisés hors de leur domaine d'ajustement. Les graphiques les concernant ne seront pas présentés. Les paramètres d'ajustement figurent tout de même dans les tableaux, même si aucun des modèles concernant la catégorie « divers » n'est significatif au seuil de 5%.

2. Hauteur totale (Ht)

Nous avons utilisé le modèle hyperbolique développé par *Dhôte et De Hercé 1994*. L'équation du modèle est la suivante :

$$Ht = \frac{\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 4\mu_2\mu_4(\mu_1 - \mu_3)} \cdot D_{\max}}{2\mu_4} + \mu_3$$

où $\alpha = \mu_1 - \mu_3 + \mu_2 \cdot D_{\max}$

Les paramètres sont les suivants (**figure 54**) :

- μ_1 fixe l'ordonnée de l'asymptote horizontale de l'hyperbole quand D_{\max} tend vers l'infini (en m).
- μ_2 est la pente de la tangente à l'origine de l'hyperbole (en $m \cdot cm^{-1}$).
- μ_3 est l'ordonnée à l'origine de l'hyperbole. Nous avons fixé $\mu_3 = 1,30$ m.
- μ_4 est un paramètre de forme compris entre 0 et 1 ; au voisinage de $\mu_4 = 1$ la courbe s'écrase sur ses asymptotes.

Le modèle a donc trois paramètres estimables (μ_1, μ_2, μ_4). Nous avons utilisé la procédure SAS/STAT/NLIN (méthode de Marquardt) pour ajuster pour chaque essence séparément ce modèle de régression non linéaire. Dans le cas de l'érable plane, la procédure ne converge pas du fait du très faible nombre d'individus. Nous avons donc fixé pour cette essence le paramètre de courbure μ_4 , en utilisant la valeur obtenue sur l'érable sycomore, considérant que ces deux essences sont assez proches et occupent une place semblable dans le peuplement. L'ajustement obtenu semble bon. La procédure ne convergeait pas non plus pour le chêne. Dans ce cas le nuage de points est de très mauvaise qualité, et surtout la gamme de diamètre est très peu étendue. De plus il manque pour le chêne à la fois les petits et les gros diamètres, rendant impossible un ajustement fiable de μ_2 et de μ_4 . Cette fois étant donné l'absence des faibles diamètres nous avons jugé plus logique d'imposer la pente de l'asymptote à l'origine, μ_2 . Nous avons pris la valeur moyenne de μ_2 , calculée sur toutes les espèces sauf l'érable plane et le chêne, soit $1,223 m \cdot cm^{-1}$.

Le modèle est très significatif pour toutes les essences (**tableau III**). La forme de courbe choisie semble bien s'adapter aux nuages de points (**figure 55**), sauf dans le cas du chêne. Dans le cas du charme, la courbe semble peut-être se stabiliser un peu trop bas pour les diamètres de plus de 30 cm, mais il est difficile d'en juger sans observations pour les diamètres supérieurs. Les R^2 sont élevés pour la plupart (supérieurs à 80 %). Le tilleul, et surtout le charme, montrent une grande variabilité, traduite par des R^2 un plus bas (mais supérieurs à 70 %). Cela est probablement dû à la grande variabilité du statut social des arbres de ces espèces dans le peuplement, évoquée dans la partie précédente. Le chêne a un R^2 très faible (22,6 %).

Espèce	N	p	SCR	SCT	R ²	μ_1	μ_2	μ_4	e.s. μ_1	e.s. μ_2	e.s. μ_4
Hêtre	103	<0.0001	372.0	4414.1	91.6%	30.620	1.225	0.551	2.084	0.104	0.195
Erable sycomore	47	<0.0001	139.1	763.0	81.8%	32.194	1.607	0.139	7.053	0.507	0.969
Erable plane*	20	<0.0001	39.3	560.5	93.0%	31.133	1.950	0.139	1.307	0.172	-
Charme	818	<0.0001	3776.8	13825.4	72.7%	23.285	1.199	0.812	0.883	0.053	0.056
Erable champêtre	114	<0.0001	415.9	2550.8	83.7%	24.020	1.065	0.857	1.740	0.082	0.088
Tilleul	62	<0.0001	345.9	1493.9	76.8%	25.504	1.046	0.788	3.271	0.145	0.198
Chêne**	80	<0.0001	263.8	333.6	20.9%	21.668	1.223	0.846	0.861	-	0.057
Alisier torminal	39	<0.0001	80.8	512.3	84.2%	21.026	1.307	0.745	3.012	0.221	0.271
Alisier blanc	56	<0.0001	93.3	574.9	83.8%	19.903	1.111	0.960	1.062	0.064	0.034
Divers***	5	0.2956	7.4	11.3	34.7%	0.54	0.82	-	6.420	0.653	-

* μ_4 fixé pour cette essence
 ** μ_2 fixé pour cette essence
 *** Ajustement d'un modèle linéaire de la forme $Ht = \mu_2 \cdot D_{max} + \mu_1$

Tableau III : Données de la régression entre hauteur totale (m) et diamètre à 1,30 m (D_{max} en cm). Figurent dans l'ordre l'effectif (N), le niveau de significativité du modèle complet (p), la somme des carrés résiduelle (SCR), la somme des carrés totale corrigée (SCT), le coefficient de détermination (R^2), l'estimation des paramètres et leur erreur standard.

Les arbres des deux placettes semblent avoir des comportements semblables et sont globalement bien mélangés.

Les graphiques de résidus de Student en fonction de la variable prédite (**figure 56**) indiquent que les hypothèses de la régression sont globalement bien vérifiées et que les modèles ne semblent pas biaisés, sauf dans le cas du chêne où le modèle sous estime la hauteur pour les hauteurs prédites inférieures à 18 m. Dans le cas de l'érable sycomore, les observations sont très concentrées entre 18 et 24 m de hauteur prédite, rendant l'ajustement peu fiable. En particulier, l'estimation de μ_4 est particulièrement imprécise pour cette essence.

La précision de l'estimation varie fortement selon les essences et le paramètre considéré, du fait du nombre variable d'individus par espèce et de la mauvaise conformation de certains nuages de données (en particulier pour l'érable sycomore).

La superposition des courbes (**figure 57**) reflète assez bien la structuration verticale du peuplement décrite précédemment. Pour les faibles diamètres les courbes sont parallèles. Lorsque le diamètre augmente, les courbes se séparent clairement. Un groupe dominant occupe la partie supérieure du nuage de point : il s'agit du hêtre de l'érable sycomore et de l'érable plane. Nettement en dessous nous trouvons le groupe des essences intermédiaires : le tilleul, l'érable champêtre et le charme. En position encore plus dominée nous remarquons les deux alisiers. La position de la courbe du chêne est difficilement interprétable du fait de son mauvais ajustement, mais elle semble tout de même plus proche du groupe intermédiaire que du groupe dominant.

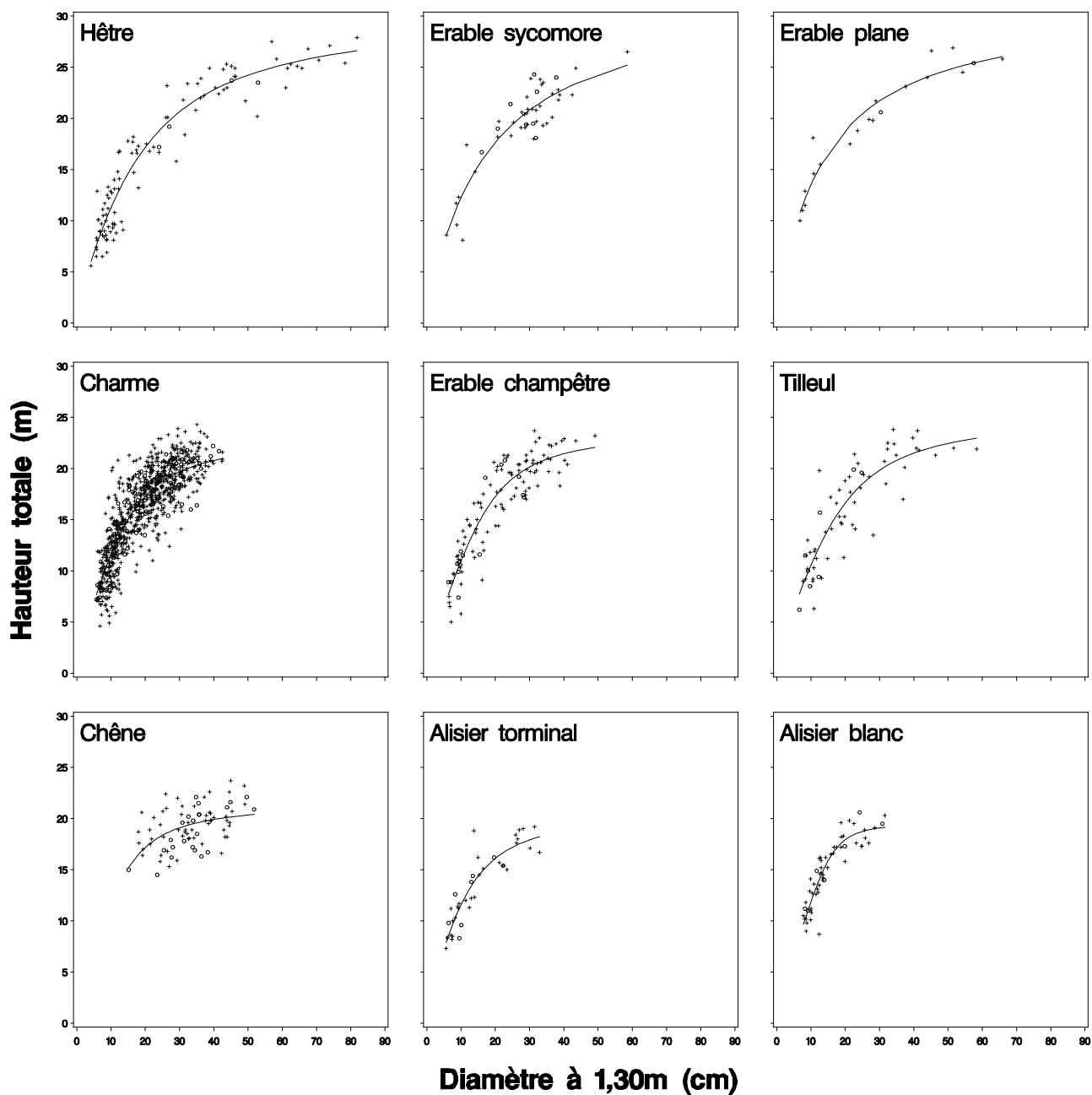


Figure 55 : Hauteur totale (m) en fonction du diamètre à 1,30 m (D_{max} en cm). Les courbes de régression ajustées sont représentées en trait plein. Les plus (+) correspondent aux arbres de la placette 1 et les cercles (o) à ceux de la placette 2.

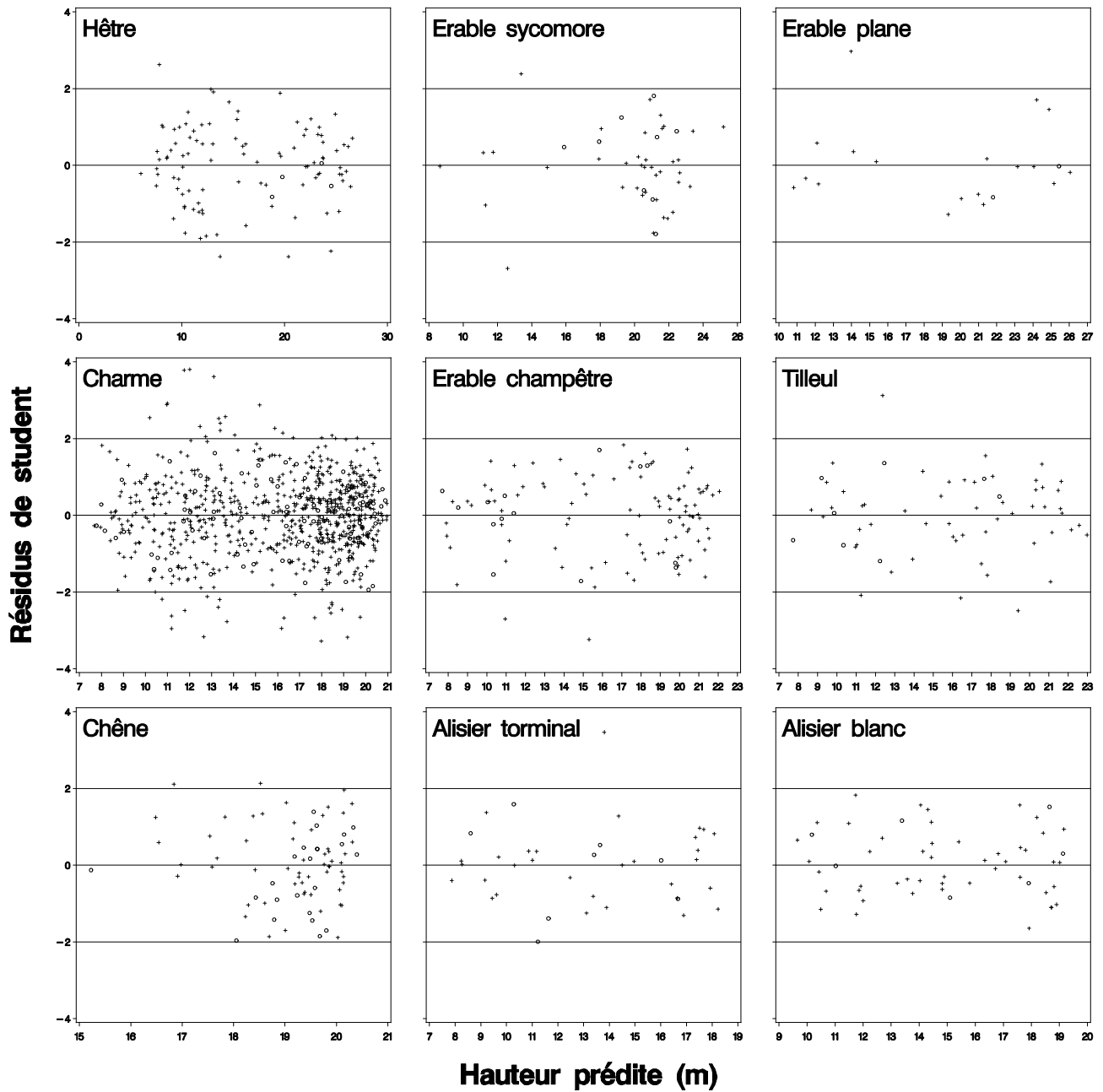


Figure 56 : Résidus de Student en fonction de la variable prédite pour la relation entre hauteur totale (m) et diamètre à 1,30 m (D_{max} en cm). Les plus (+) correspondent aux arbres de la placette 1 et les cercles (o) à ceux de la placette 2.

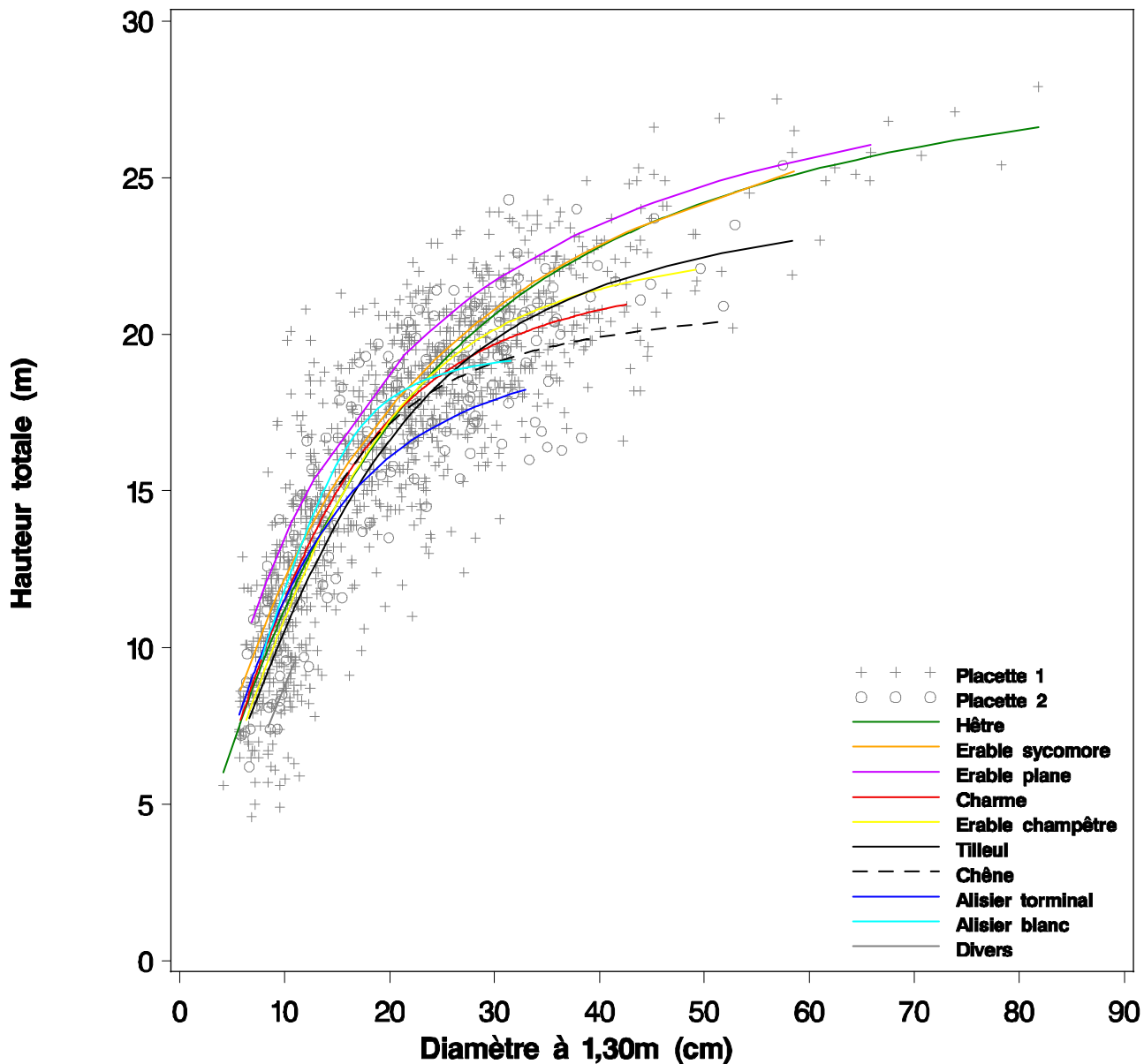


Figure 57 : Superposition des relations entre hauteur totale (m) et diamètre à 1,30 m (D_{max} en cm), obtenues pour les différentes essences. Le nuage de point toutes espèces confondues apparaît en gris en arrière plan.

3. Longueur de houppier (LH)

Nous avons ajusté – à l’aide de la procédure SAS/REG – un modèle linéaire de la forme :

$$LH = \alpha_{LH} \cdot D_{max} + \beta_{LH}$$

Le modèle est très significatif pour toutes les essences (**tableau IV**). Les ajustements semblent bien correspondre aux nuages de points (**figure 58**). Nous constatons cependant une très grande variabilité de la longueur de houppier quel que soit le diamètre, traduite par des R^2 plutôt faibles sauf pour l’érable plane. Cette variabilité est particulièrement marquée dans le cas du charme.

Espèce	N	p	SCR	SCT	R ²	α_{LH}	β_{LH}	e.s. α_{LH}	e.s. β_{LH}
Hêtre	103	<0.0001	497.7	1289.6	61.4%	0.138	5.941	0.011	0.349
Erable sycomore	47	<0.0001	213.1	363.1	41.3%	0.174	3.539	0.031	0.936
Erable plane	20	<0.0001	30.4	216.3	86.0%	0.166	4.409	0.016	0.544
Charme	818	<0.0001	3850.2	5543.0	30.5%	0.169	3.989	0.009	0.192
Erable champêtre	114	<0.0001	439.0	792.2	44.6%	0.170	3.555	0.018	0.432
Tilleul	62	<0.0001	308.9	484.4	36.2%	0.140	4.834	0.024	0.601
Chêne	80	<0.0001	290.7	368.5	21.1%	0.116	3.407	0.025	0.877
Alisier torminal	39	<0.0001	96.8	217.1	55.4%	0.213	1.855	0.031	0.549
Alisier blanc	56	<0.0001	155.8	220.9	29.5%	0.170	2.762	0.036	0.602
Divers	5	0.476	10.5	12.8	18.0%	0.632	-1.222	0.778	7.654

Tableau IV : Données de la régression entre longueur de houppier (m) et diamètre à 1,30 m (D_{max} en cm). Figurent dans l’ordre l’effectif (N), le niveau de significativité du modèle complet (p), la somme des carrés résiduelle (SCR), la somme des carrés totale corrigée (SCT), le coefficient de détermination (R^2), l’estimation des paramètres et leur erreur standard.

Nous ne constatons pas de différence entre les deux placettes.

Les résidus (**figure 59**) indiquent que les hypothèses de la régression sont bien respectées et que les modèles ne semblent pas biaisés. Cependant nous notons une légère asymétrie des résidus dans le cas du charme avec une petite proportion d’arbres dont la longueur de houppier est particulièrement importante. La plasticité du houppier du charme sur l’axe verticale semble ainsi particulièrement grande. Il n’est par contre pas possible de savoir si c’est un caractère propre de cette espèce ou si cela est lié à la grande variabilité du statut social des arbres de cette essence dans le peuplement. D’autre part nous constatons un défaut d’ajustement pour les plus grands diamètres rencontrés chez le tilleul. Il est difficile de savoir si le défaut est réel ou s’il n’est dû qu’à deux points particuliers (les deux tilleuls de plus gros diamètre).

La précision des paramètres n’est pas très bonne, sauf pour le charme (probablement un effet du grand nombre d’individus pour cette essence).

La superposition des courbes (**figure 60**) présente un faisceau central assez homogène constitué de l’érable sycomore, l’érable plane, le charme, l’érable champêtre et le tilleul. Le hêtre présente clairement des longueurs de houppiers plus importantes pour les faibles diamètres. Ce phénomène s’atténue quand le diamètre augmente du fait de la pente plus faible pour cette essence. A l’inverse les deux alisiers, et surtout le chêne ont des longueurs de houppiers nettement inférieures aux autres espèces.

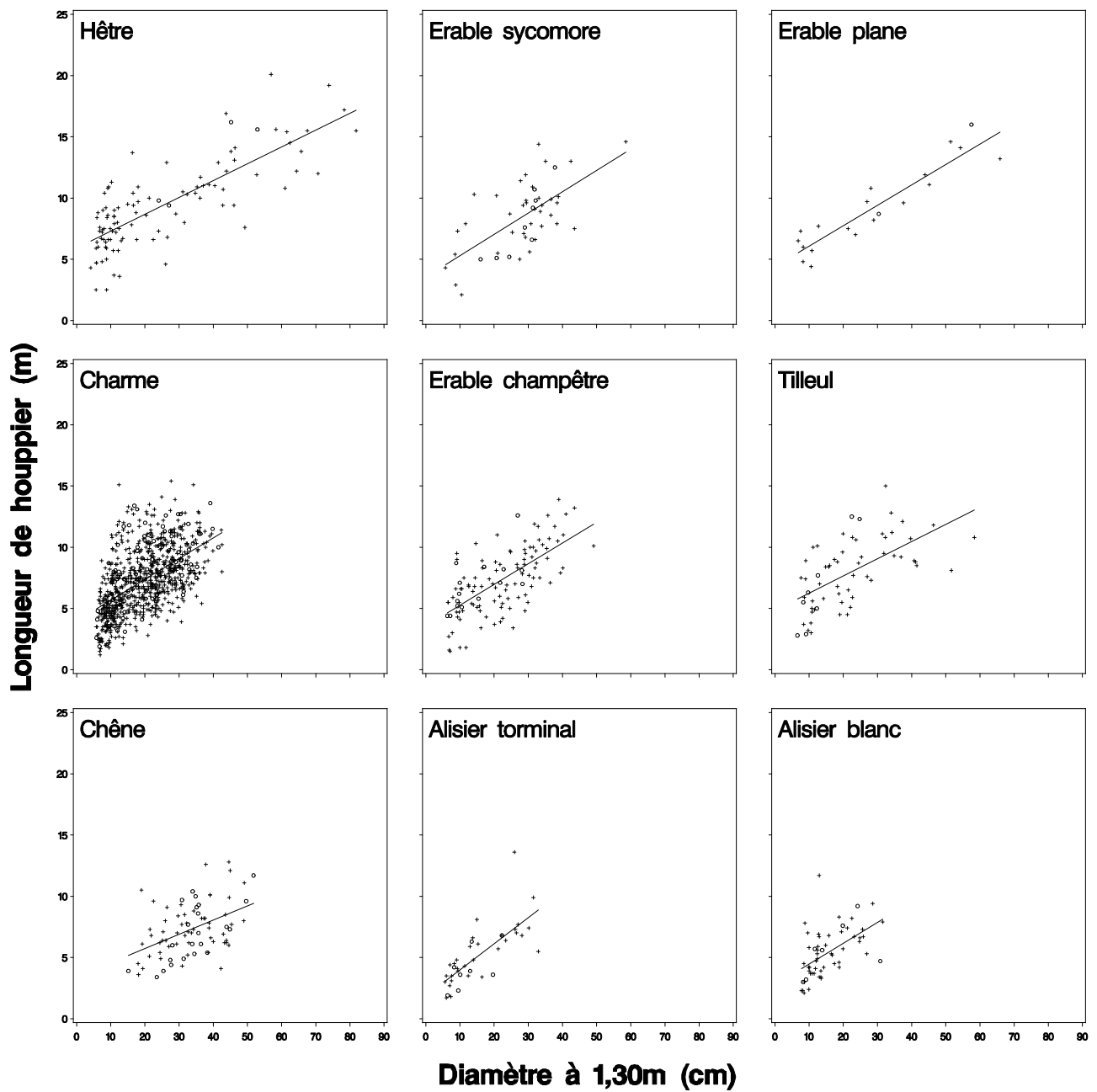


Figure 58 : Longueur de houppier (m) en fonction du diamètre à 1,30 m (D_{max} en cm) pour chaque essence. Les droites de régression ajustées sont représentées en trait plein. Les plus (+) correspondent aux arbres de la placette 1 et les cercles (o) à ceux de la placette 2.

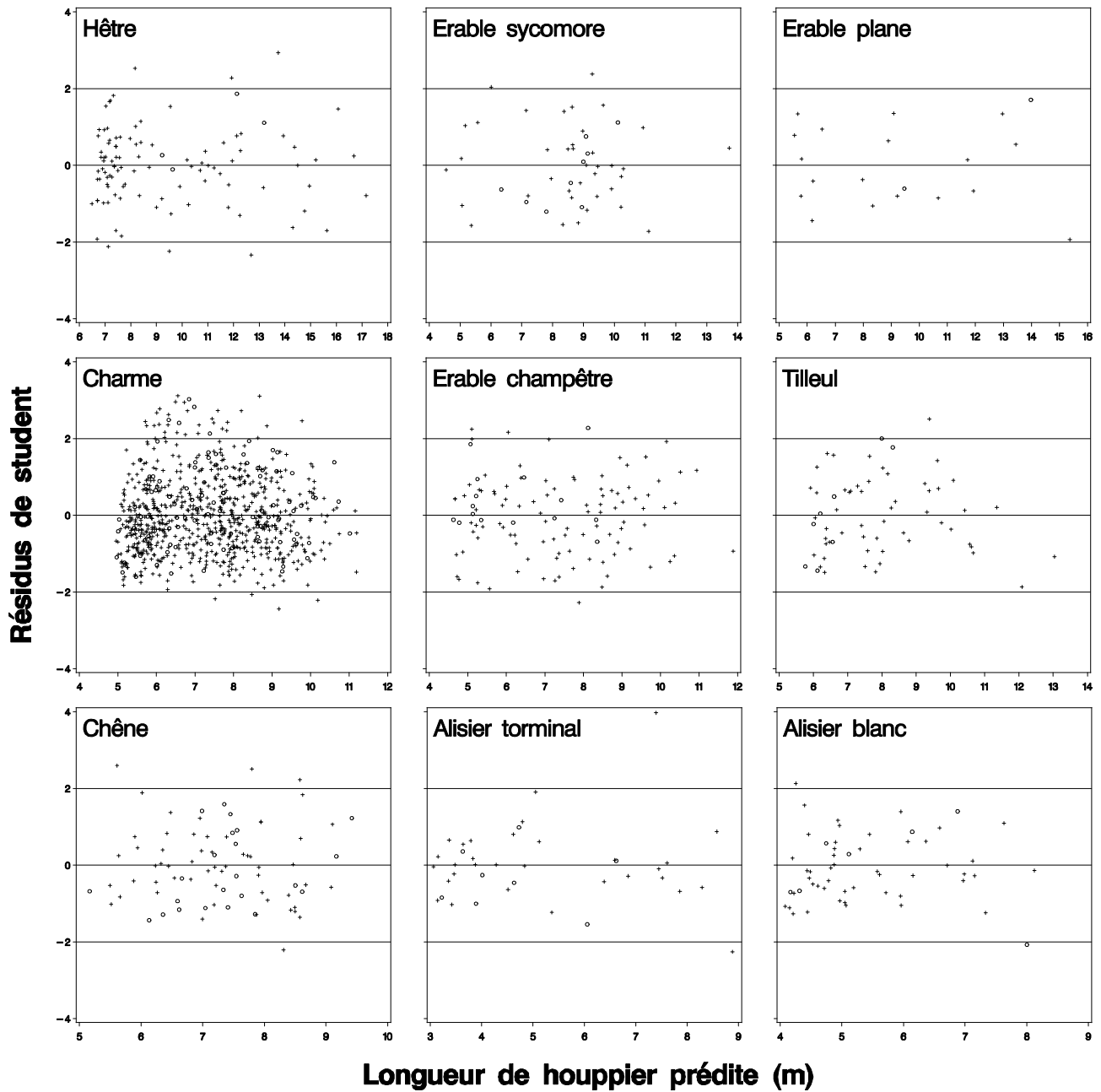


Figure 59 : Résidus de Student en fonction de la variable prédite pour la relation entre longueur de houppier (m) et diamètre à 1,30 m (D_{max} en cm). Les plus (+) correspondent aux arbres de la placette 1 et les cercles (o) à ceux de la placette 2.

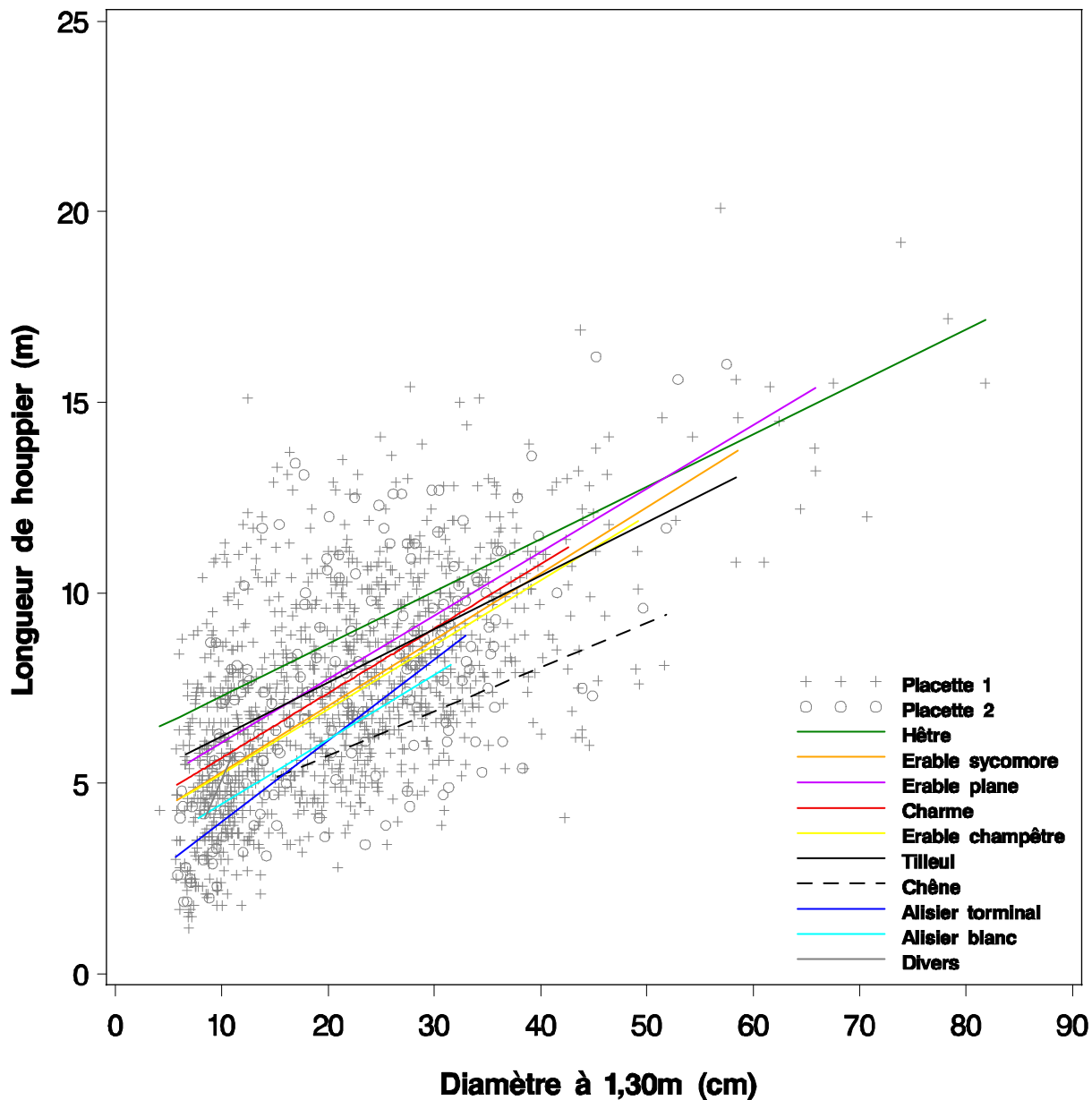


Figure 60 : Superposition des relations entre longueur de houppier (m) et diamètre à 1,30 m (D_{max} en cm), obtenues pour les différentes essences. Le nuage de point toutes espèces confondues apparaît en gris en arrière plan.

4. Extension latérale du houppier (R_{eq})

Pour toutes les essences sauf le hêtre, nous avons utilisé un ajustement linéaire de la forme :

$$R_{eq} = \alpha_R \cdot D_{eq} + \beta_R$$

Pour le hêtre l'ajustement linéaire en fonction du diamètre conduisait à un modèle fortement biaisé pour les gros diamètres. Nous avons donc utilisé pour cette essence le modèle suivant :

$$R_{eq} = \alpha_R \cdot D_{eq}^2 + \beta_R$$

Le modèle est très significatif pour toutes les essences (**tableau V**). Les ajustements semblent bien correspondre aux nuages de points (**figure 61**). Le charme présente une assez grande variabilité. Le R^2 varie fortement selon l'espèce. Le charme, le tilleul, le chêne et les deux alisiers présentent une variabilité relativement importante.

Espèce	N	p	SCR	SCT	R ²	α_R	β_R	e.s. α_R	e.s. β_R
Hêtre*	103	<0.0001	27.3	285.8	90.5%	0.00101	2.410	0.00003	0.063
Erable sycomore	47	<0.0001	8.7	47.0	81.4%	0.07950	0.697	0.00566	0.185
Erable plane	20	<0.0001	4.5	30.9	85.5%	0.06340	1.390	0.00615	0.215
Charme	818	<0.0001	231.2	607.4	61.9%	0.07840	1.001	0.00215	0.048
Erable champêtre	114	<0.0001	21.5	45.0	52.3%	0.04370	1.251	0.00395	0.096
Tilleul	62	<0.0001	11.2	46.6	76.0%	0.05930	1.393	0.00430	0.117
Chêne	80	<0.0001	21.1	62.5	66.2%	0.08520	-0.044	0.00689	0.239
Alisier torminal	39	<0.0001	5.1	10.6	52.4%	0.04690	1.037	0.00735	0.129
Alisier blanc	56	<0.0001	7.4	17.5	57.9%	0.06720	0.737	0.00779	0.135
Divers	5	0.8388	0.7	0.7	1.6%	-0.04690	2.396	0.21170	2.203

* Relation linéaire du diamètre au carré

Tableau V : Données de la régression entre le rayon équivalent du houppier (m) et diamètre à 1,30 m (D_{eq} en cm) pour chaque essence. Figurent dans l'ordre l'effectif (N), le niveau de significativité du modèle complet (p), la somme des carrés résiduelle (SCR), la somme des carrés totale corrigée (SCT), le coefficient de détermination (R^2), l'estimation des paramètres et leur erreur standard.

Le fait que le hêtre nécessite un modèle en D_{eq}^2 alors que le modèle en D_{eq} est bien adapté aux autres espèces a plusieurs explications possibles. Tout d'abord c'est la seule essence pour laquelle nous ayons une telle gamme de diamètre. Les autres essences manifesteraient peut-être la même courbure si nous disposions de la même gamme en ce qui les concerne. Cependant l'érable sycomore et l'érable plane ne semblent pas aller dans ce sens, malgré une gamme de diamètre assez étendue. Une autre explication est que les hêtres des différentes classes de diamètre n'ont pas eu la même histoire du fait du traitement passé en taillis sous futaie. Ainsi les hêtres de diamètre supérieur à 60 cm dominent nettement le reste du peuplement. La faible concurrence latérale qui leur est opposée explique peut-être leur particulièrement grande extension de houppier. Enfin peut-être que la capacité d'extension latérale du houppier des hêtres augmente effectivement avec le diamètre.

L'analyse des résidus (**figure 62**) conforte globalement les hypothèses de régression et indique des modèles non biaisés. Il y a cependant quelques problèmes à signaler. La variance est nettement plus

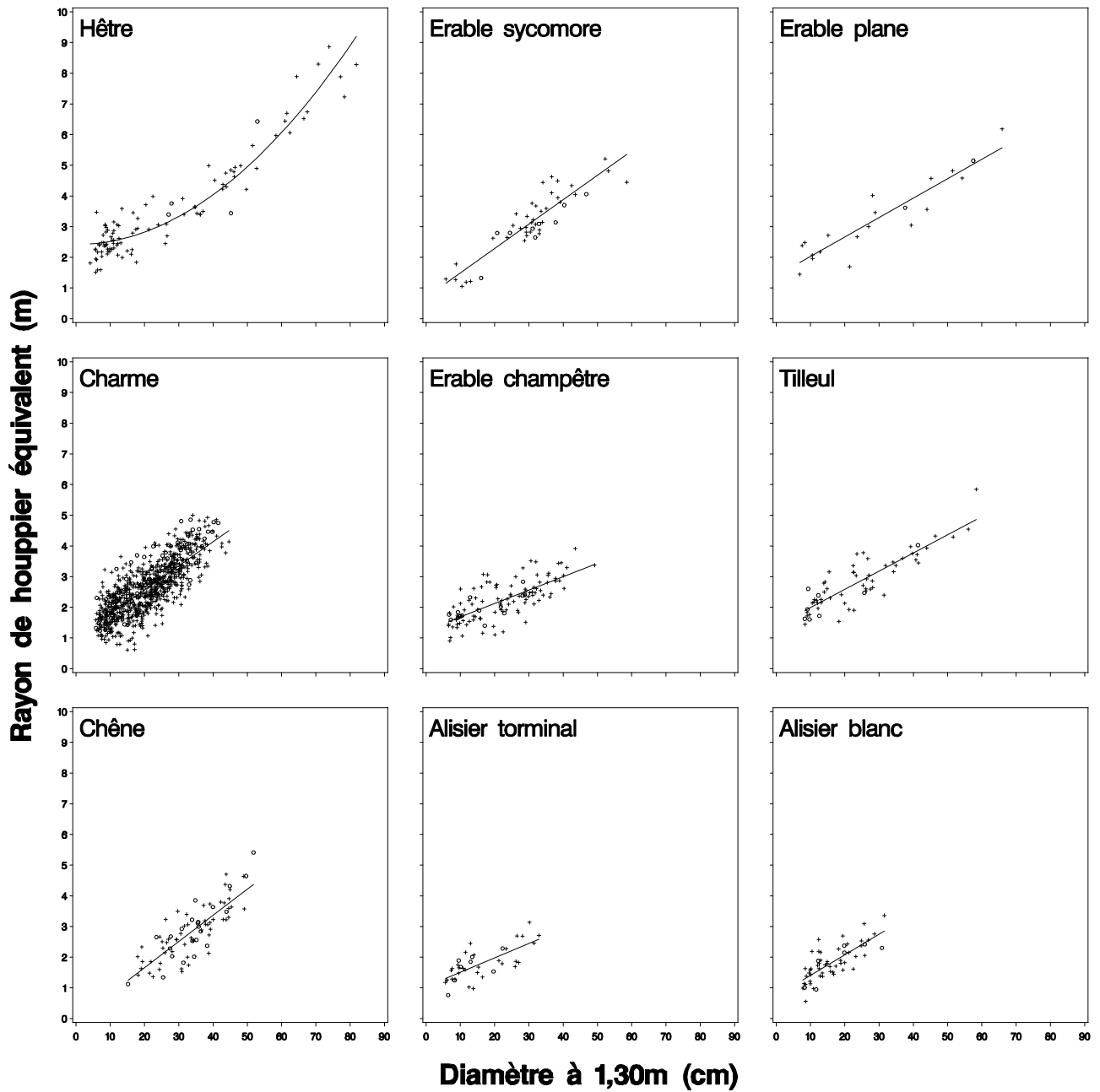


Figure 61 : Rayon équivalent de houppier (m) en fonction du diamètre à 1,30 m (D_{eq} en cm) pour chaque essence. La courbe (pour le hêtre) ou les droites de régression ajustées sont représentées en trait plein. Les plus (+) correspondent aux arbres de la placette 1 et les cercles (o) à ceux de la placette 2.

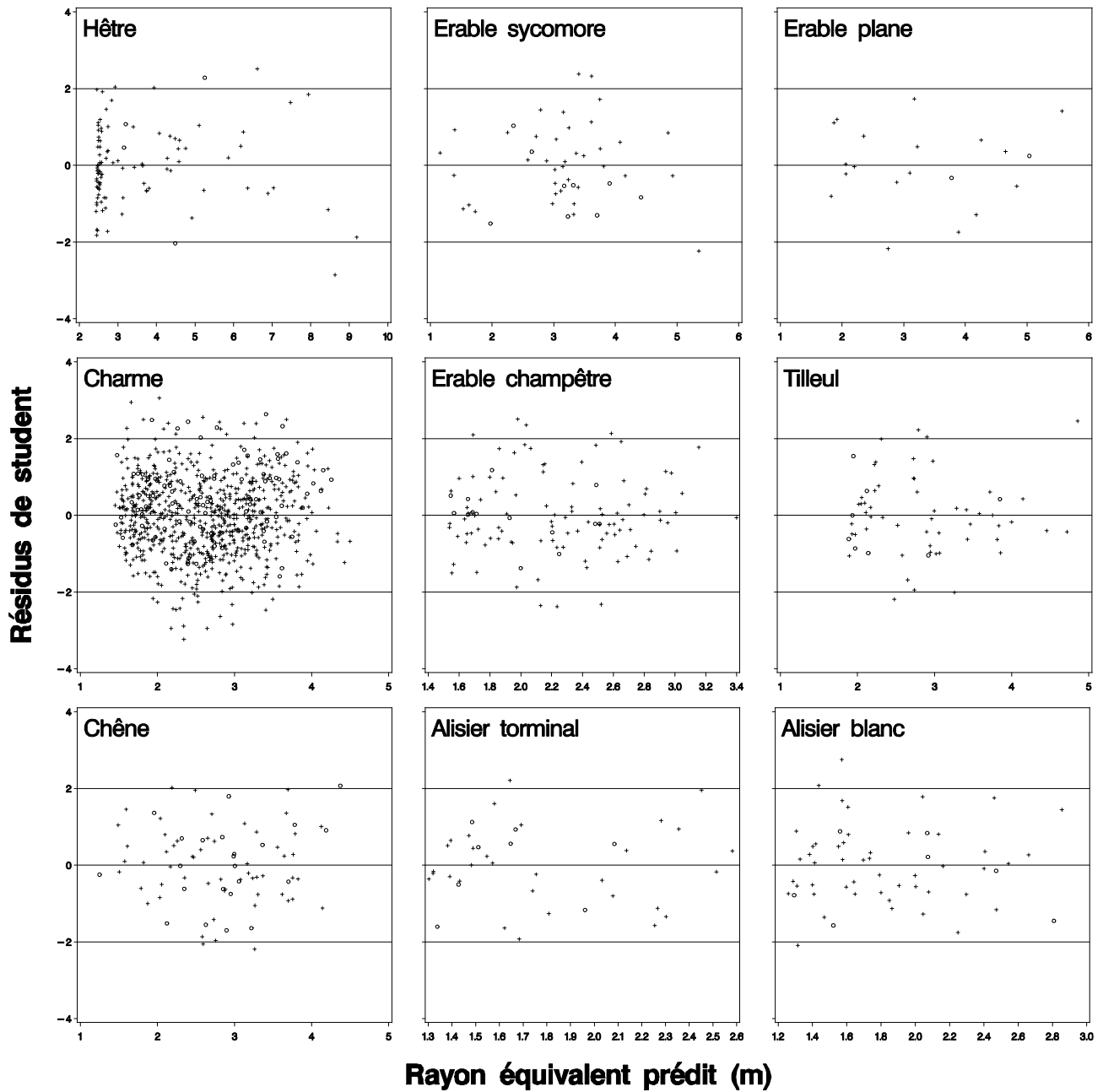


Figure 62 : Résidus de Student en fonction de la variable prédite pour la relation entre rayon équivalent de houppier (m) et diamètre à 1,30 m (D_{eq} en cm). Les plus (+) correspondent aux arbres de la placette 1 et les cercles (o) à ceux de la placette 2.

faible pour les fortes valeurs prédites chez le tilleul. Nous constatons également une légère asymétrie des résidus pour le hêtre, cette fois pour les faibles valeurs prédites. Enfin il semble que les arbres des deux placettes se répartissent différemment pour le charme. Ainsi les charmes de la placette 2 ont un R_{eq} légèrement supérieur en moyenne. Cette différence n'est pas très marquée, nous avons donc gardé un ajustement global.

La précision des paramètres est variable selon les espèces. L'ajustement du chêne semble particulièrement peu fiable pour son ordonnée à l'origine.

La superposition des courbes (**figure 63**) présente un faisceau central composé de l'érable sycomore, de l'érable plane, du charme et du tilleul, ces espèces ayant tout de même des pentes légèrement différentes. Le hêtre se place au dessus, mais est proche du faisceau central pour les diamètres intermédiaires (25-55 cm). Les deux alisiers et l'érable plane ont des R_{eq} nettement inférieurs. La courbe du chêne semble assez singulière.

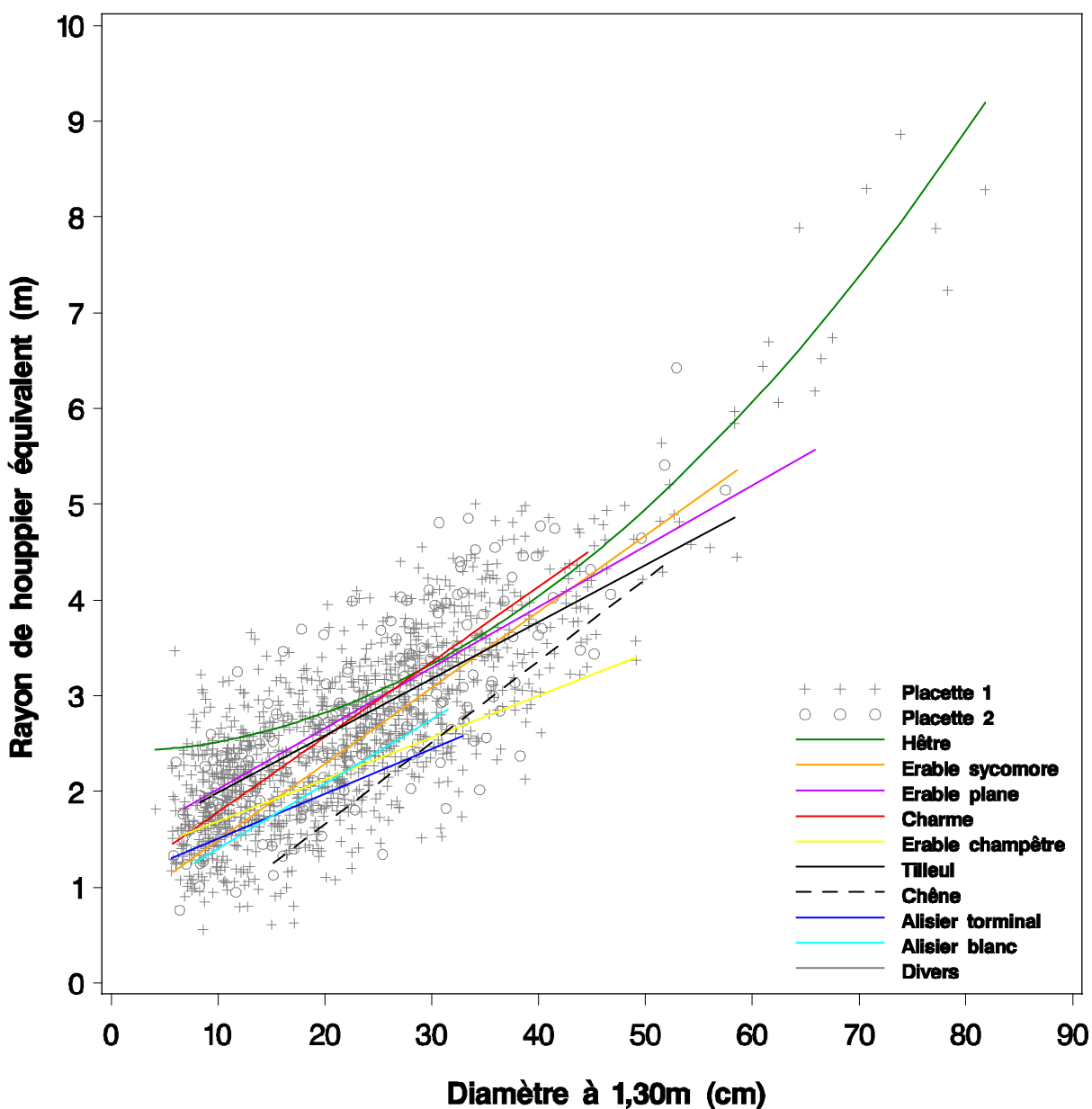


Figure 63 : Superposition des relations entre rayon équivalent de houppier (m) et diamètre à 1,30 m (D_{eq} en cm), obtenues pour les différentes essences. Le nuage de point toutes espèces confondues apparaît en gris en arrière plan.

5. Hauteur de plus grande largeur de houppier (H_m)

Nous avons testé un ajustement linéaire pour H_m . Cependant aucun modèle n'était significatif au seuil de 5 % (**tableau VI**), sauf pour le chêne, et cela est probablement dû à la mauvaise qualité du nuage de points. Les droites de régression sont tout de même indiquées à titre indicatif sur les graphiques (**figure 64**). Les moyennes par espèce sont toutes légèrement supérieures de 0,5 avec un écart type assez homogène entre essences, proche de 0,13.

La variable H_m a donc une grande variabilité. Elle est centrée sur la gamme de ses valeurs possibles et ne dépend pas du diamètre à 1,30 m quelle que soit l'essence.

Espèce	N	p du modèle linéaire	Moyenne	Ecart-type
Hêtre	103	0.9251	0.508	0.133
Erable sycomore	47	0.0762	0.526	0.140
Erable plane	20	0.2299	0.508	0.125
Charme	818	0.5388	0.525	0.143
Erable champêtre	114	0.1832	0.523	0.128
Tilleul	62	0.5781	0.555	0.156
Chêne	80	0.0383	0.505	0.117
Alisier torminal	39	0.2498	0.527	0.136
Alisier blanc	56	0.9518	0.526	0.101
Divers	5	0.1704	0.525	0.157

Tableau VI : Nombre d'arbres, moyenne et écart-type de la hauteur relative de plus grande largeur de houppier (m) pour chaque essence. Le niveau de significativité de la régression linéaire entre cette hauteur et le diamètre à 1,30 m (D_{max} en cm) est également donné pour chaque espèce.

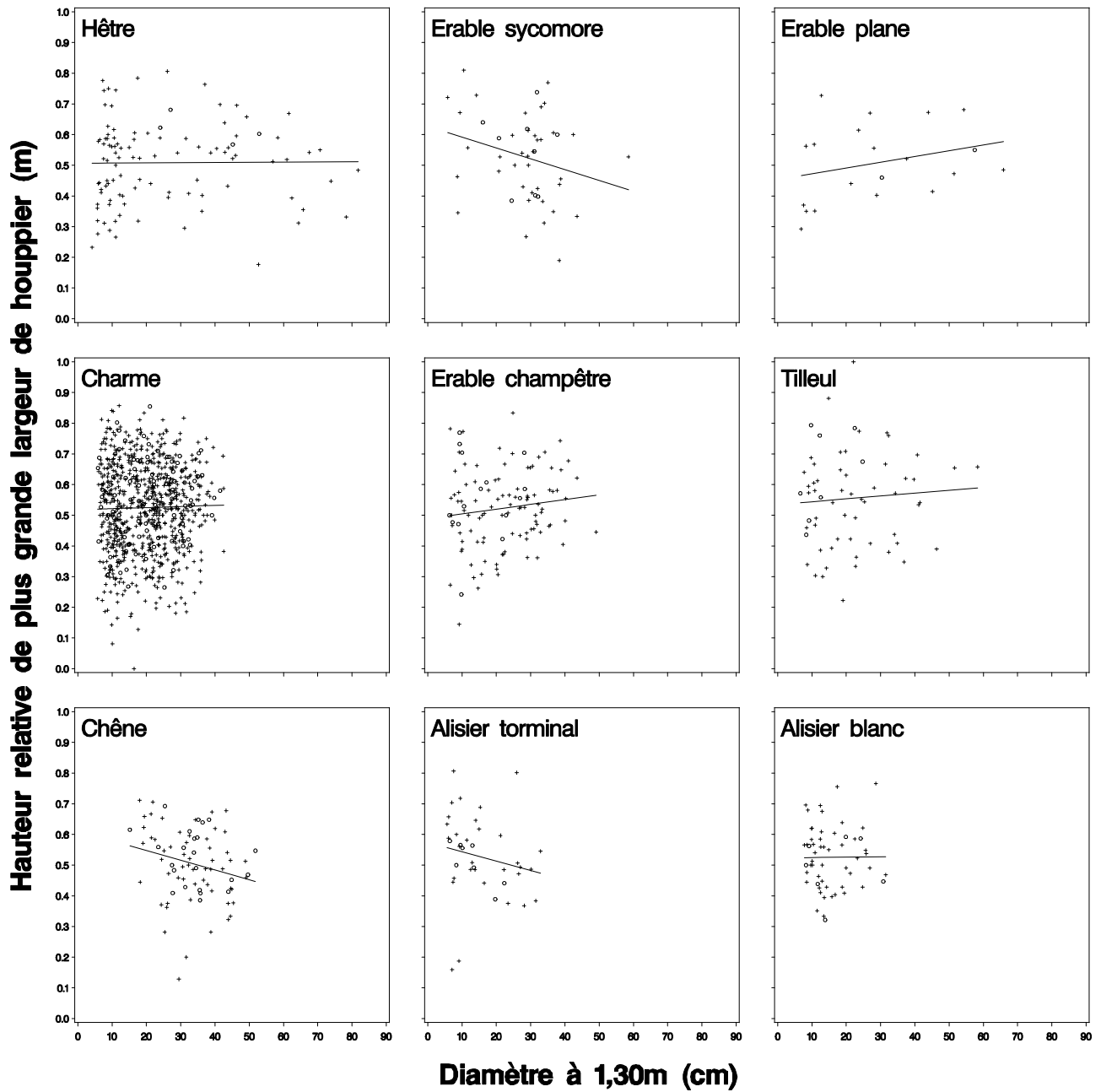


Figure 64 : Hauteur relative de plus grande largeur de houppier (m) en fonction du diamètre à 1,30 m (D_{eq} en cm) pour chaque essence. Les droites de régression ajustées sont représentées en trait plein à titre indicatif (non significatives). Les plus (+) correspondent aux arbres de la placette 1 et les cercles (o) à ceux de la placette 2.

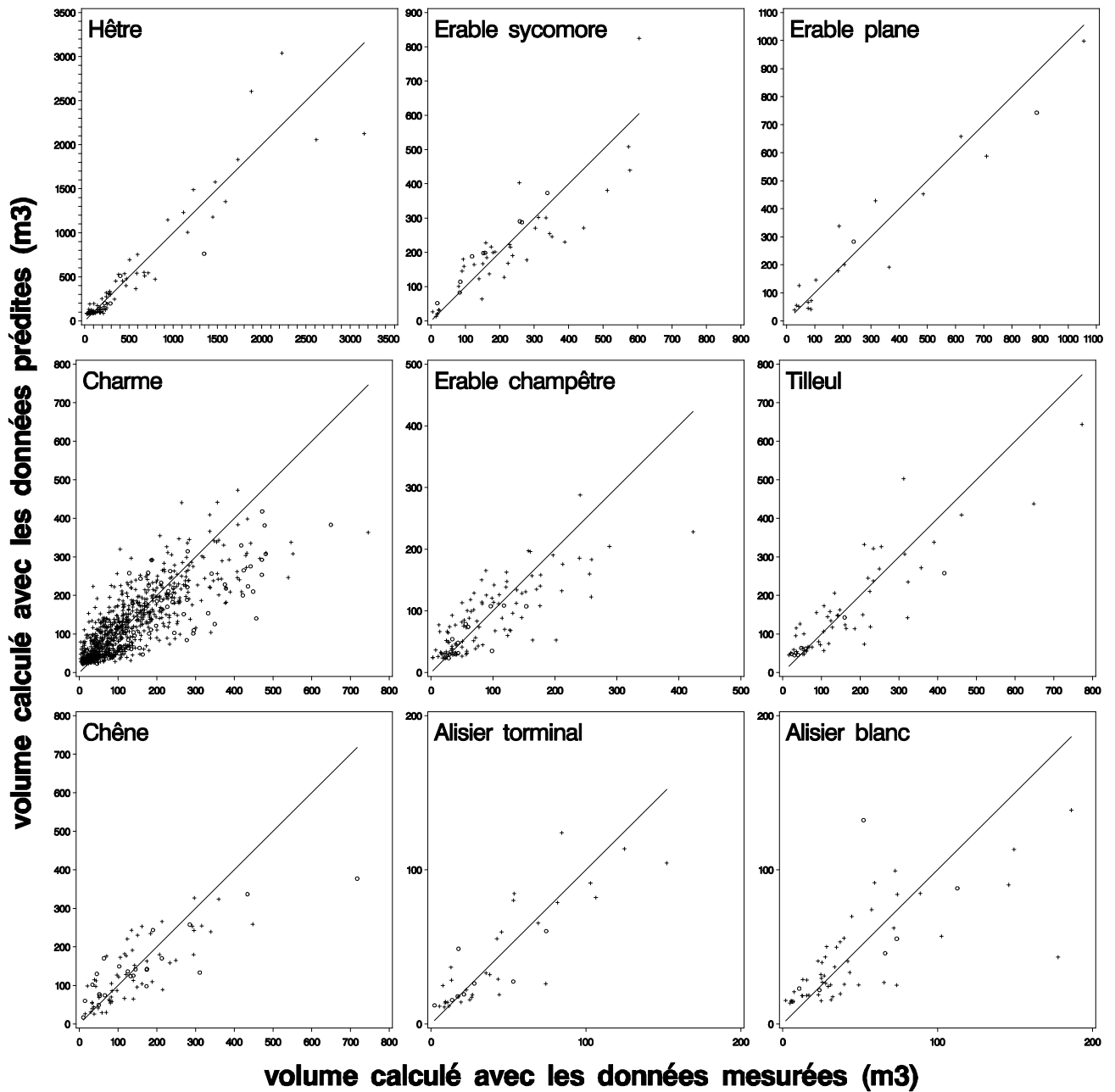


Figure 65 : Volume calculé à partir de la longueur de houppier et du rayon équivalent de houppier prédits en fonction du volume calculé à partir des données mesurées sur les mêmes arbres. La droite identité est représentée en trait plein.

6. Volume résultant du houppier

Nous avons relié séparément la longueur de houppier (LH) et l'extension latérale du houppier (sous la forme de R_{eq}), au diamètre à 1,30 m. Ces données (avec $H_m\%$) permettent de délimiter le volume du houppier dans la représentation géométrique des houppiers utilisée (issue du modèle tRAYci). Il est intéressant de comparer le volume que nous obtenons en utilisant les valeurs prédites de LH , R_{eq} , au volume obtenu à partir des données mesurées sur chaque arbre : la longueur de houppier mesurée, les 8 rayons de houppiers mesurés et H_m mesurée. Le volume issu des valeurs prédites est un ellipsoïde dont l'axe vertical a une longueur LH et dont les deux demi axes horizontaux sont égaux à R_{eq} ($H_m\%$ n'a pas d'influence sur la valeur du volume, seulement sur sa distribution verticale).

La **figure 65** permet d'effectuer cette comparaison, avec comme référence la droite identité. Les nuages de points sont globalement bien centrés. Cependant la variance augmente quand le volume augmente. La sous-estimation du volume par les valeurs prédites semble aussi légèrement plus fréquente, en particulier dans le cas du charme et de l'érable champêtre. Dans le cas du charme, la position relative des points correspondant aux placettes 1 et 2 semble indiquer que cela est dû à la différence entre les deux placettes, que nous avons constaté pour les relations entre R_{eq} et le diamètre à 1,30 m. Pour les autres essences il est difficile de savoir à quel point les déséquilibres apparents sont réels ou bien dus à quelques points particuliers.

D. Caractérisation de l'extension latérale des houppiers

1. Démarche

Dans la partie précédente nous nous sommes intéressés à l'extension latérale moyenne du houppier sous la forme d'un rayon équivalent (R_{eq}). Nous allons maintenant aborder la géométrie de l'extension latérale du houppier et sa variabilité. Pour ce faire nous allons étudier la section du houppier dans le plan horizontal situé à la hauteur de plus grande largeur de houppier. L'aire obtenue est délimitée par les 8 rayons de houppier mesurés depuis son centre, reliés entre eux par des arcs elliptiques, comme spécifié dans le modèle tRAYci. Le contour de cette aire sera nommée « forme du houppier » dans la suite de ce chapitre. En réalité il s'agit aussi de la forme de la projection au sol du houppier.

Nous voulons caractériser l'anisotropie de l'extension latérale du houppier, c'est-à-dire la variabilité des rayons au sein d'un houppier. La représentation à huit rayons n'est pas adaptée à cette analyse, du fait de l'espacement irrégulier des rayons mesurés. En effet ceux-ci ont été placés de façon à caractériser au mieux la forme du houppier, avec seulement huit rayons. Nous avons donc rapproché les rayons lorsque le contour du houppier variait beaucoup et à l'inverse nous les avons écartés quand le contour était régulier. Les rayons obtenus n'ont donc pas le même poids dans la représentation obtenue. Pour caractériser la forme du houppier à partir de la longueur de ses rayons, il fallait au contraire travailler sur des rayons régulièrement répartis afin qu'ils aient un poids identique. Nous les nommerons « rayons systématiques » par opposition aux rayons mesurés dont la position dépend de la forme du houppier. Qui plus est, il fallait un nombre de rayons systématiques suffisamment important pour bien décrire la forme du houppier malgré tout, c'est-à-dire bien encadrer les rayons mesurés. Nous avons donc calculé, pour chaque houppier, la longueur de 32 rayons systématiques du houppier, définis depuis le centre du houppier et régulièrement espacés sur l'ensemble des azimuts (**figure 66**).

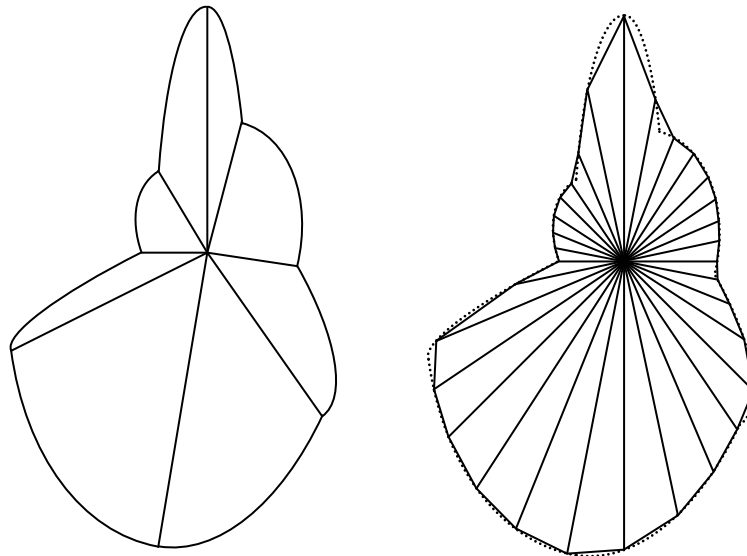


Figure 66 : A gauche : contour d'un houpplier délimités par huit rayons caractéristiques mesurés depuis le centre du houpplier et reliés par des arcs elliptiques. A droite : le même houpplier décrit par 32 rayons systématiques – régulièrement espacés – générés depuis le centre houpplier. Le contour du houpplier est figuré en pointillés. Le polygone délimité par les extrémités des rayons systématiques est représenté en trait continu.

A partir de ces rayons nous avons calculé quatre critères permettant de caractériser la forme du houpplier et son degré d'anisotropie.

Le **coefficient de variation** (cv) de la longueur des rayons systématiques d'un houpplier (cv , en pourcentages) permet d'évaluer l'écart à l'isotropie. Ce critère dépend fortement de la position du centre du houpplier et de la forme du houpplier. Le critère cv permet de mesurer à quel point la forme d'un houpplier est différente d'un cercle – ou d'un polygone régulier ayant 32 sommets – centré sur le centre du houpplier : dans ce cas tous les rayons sont égaux en longueur conduisant à $cv = 0 \%$. Rappelons que le coefficient de variation se calcule de la façon suivante : $cv = (100 \cdot \sigma) / \bar{r}$, avec σ l'écart type et \bar{r} la moyenne de la longueur des 32 rayons systématiques du houpplier.

La **longueur de déplacement relative** (L_D) est fréquemment utilisée dans la littérature pour caractériser des formes de houpplier (Brisson et Reynolds 1994, Muth et Bazzaz 2002, 2003, Umeki 1995, 1997). Elle est définie ici comme la distance entre le centre du houpplier et le centre de gravité du polygone délimité par les extrémités des 32 rayons systématiques du houpplier, divisée par le rayon équivalent R_{eq} . Elle s'exprime en pourcentages. Cette grandeur caractérise le degré d'excentrement du houpplier par rapport à son centre, relativement à sa taille. Une valeur strictement positive de la longueur de déplacement relative indique une asymétrie de la forme du houpplier.

Le **coefficient d'irrégularité** (C_I) est défini comme le rapport de deux périmètres : $C_I = P / P_{eq}$. P est le périmètre du polygone délimité par les extrémités des 32 rayons systématiques du houpplier. P_{eq} est le périmètre qu'aurait un polygone régulier (rayons égaux) de même aire que le polygone précédent. Ce coefficient caractérise le degré de sinuosité du contour du houpplier. Le coefficient augmente quand nous passons d'une forme très régulière à une forme de plus en plus accidentée, avec des renforcements et des diverticules successifs. Il est toujours supérieur ou égal à un. Une valeur de un indique que le polygone est régulier, donc que la forme du houpplier est un cercle.

Le **coefficient d'extension maximale** (C_E) est défini comme le rapport entre le rayon systématique maximal (R_{max}) et le rayon équivalent (R_{eq}) : $C_E = R_{max} / R_{eq}$. Rappelons que le rayon équivalent est le rayon d'un cercle de même aire que le houppier (décrit dans la représentation de tRAYci, par les 8 rayons mesurés). Ce coefficient permet d'évaluer à quel point l'extension du houppier dans une direction particulière est importante par rapport une extension isotrope théorique. Il est toujours supérieur ou égal à un. Une valeur de un indique que le polygone délimité par les 32 rayons systématiques est régulier, donc que la forme du houppier est un cercle.

La **figure 67** permet de visualiser l'influence de la forme du houppier sur ces différents critères. Pour plus de clarté nous avons utilisé dans cette figure des houppiers polygonaux délimités par huit rayons systématiques depuis un centre, en nous affranchissant de la forme du houppier utilisée dans tRAYci. Pour c_v et C_I cette simplification n'induit pas en erreur puisque seules les longueurs des rayons systématiques du houppier sont utilisés dans leur calcul. Par contre dans le cas de L_D et C_E , R_{eq} est utilisé dans le calcul. Or R_{eq} est calculé à partir de l'aire du houppier – dans la représentation de tRAYci avec les huit rayons mesurés – et non celle du polygone délimité par les extrémités des rayons systématiques. Il faut également noter que lorsque le nombre de rayons systématiques augmente, la souplesse de la forme de houppier s'accroît, permettant des formes de plus en plus sinueuses et accidentées.

De nombreux autres critères ont été testés : le minimum, le maximum, l'amplitude, la médiane, la moyenne, le premier quartile, le troisième quartile, le skewness (asymétrie de la distribution) et le kurtosis (aplatissement de la distribution) des longueurs de rayons systématiques du houppier ainsi que divers rapports entre ces grandeurs. Nous avons également testé d'autres indices proches du coefficient d'irrégularité, regroupés sous la notion générale d'excentricité (utilisée dans de nombreux domaines *Brisson et Reynolds 1994, Jagels et Dyer 1983, Peachey et Osborne 1990, Persson 1998*), qui caractérisent l'écart à la circularité. Mais ces critères étaient difficilement interprétables, inadaptés à notre objet d'étude ou redondants avec les critères retenus et ne seront donc pas présentés.

Pour cette analyse nous avons pris en compte les mêmes arbres que pour les relations entre caractéristiques du houppier et diamètre à 1,30 m en excluant la catégorie « divers », dont l'effectif est trop faible. L'échantillon est donc constitué de 1339 houppiers.

Il est possible que le statut social des arbres – dont le diamètre à 1,30 m nous paraît être un bon indicateur – ait une influence sur la forme de leur houppier. Pour chaque coefficient nous avons donc représenté les valeurs obtenues pour chaque houppier en fonction du diamètre à 1,30 m (D_{eq} dans le cas des cépées), pour chaque essence séparément. Sur les graphiques, un point correspond ainsi à un houppier. Dans les graphiques nous avons calculé pour chaque classe de diamètre (de largeur 10 cm) le premier quartile (25 % des observations inférieures de cette valeur), la médiane (50 % des observations inférieures à cette valeur) et le troisième quartile (75 % des observations inférieures à cette valeur). Pour chacune de ces trois variables les valeurs des classes successives ont été reliées par des segments. Ces variables permettent de visualiser qualitativement la distribution du critère étudié et son évolution en fonction du diamètre. Cependant les quartiles et la médiane peuvent avoir un comportement singulier pour la première et la dernière classe de diamètre de chaque espèce – parfois incomplètes – ainsi que pour les classes ayant très peu d'observations. Il conviendra donc d'éviter de sur-interpréter les parties correspondantes des graphiques.

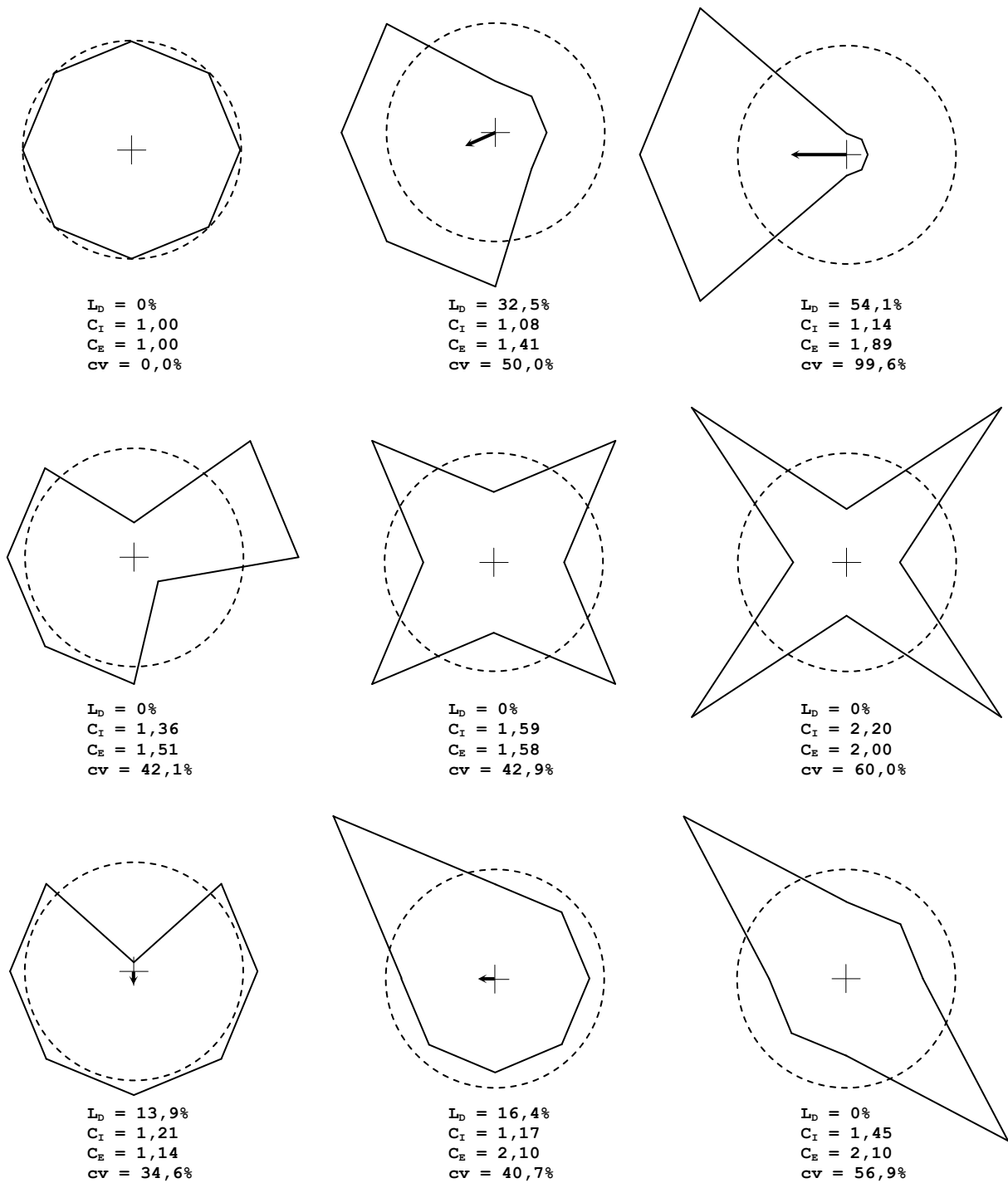


Figure 67 : Illustration de la variabilité potentielle de la forme du houpier dans le cas simplifié où seulement 8 rayons régulièrement répartis sont utilisés. Pour chaque cas sont donnés la longueur de déplacement (L_D en m, symbolisée par des flèches noires), le coefficient d'irrégularité (C_I), le coefficient d'extension maximale (C_E) et le coefficient de variation de la longueur des rayons de houpier (cv en %). La première série (en haut) présente une augmentation de L_D , avec une valeur de C_I restant faible. La seconde série (au milieu) montre une augmentation de C_I à L_D nulle. La troisième série (en bas) illustre le comportement de C_E par rapport aux deux autres indices. Tous les polygones présentés ont exactement la même aire, afin de pouvoir bien comparer le comportement des différents critères. Le cercle en pointillés à un rayon égal à R_{eq} .

2. Coefficient de variation (cv)

La **figure 68** présente le coefficient de variation de la longueur des rayons systématiques d'un houppier en fonction du diamètre à 1,30 m, pour chaque espèce.

En premier lieu nous remarquons que cv est particulièrement élevé. Ainsi sa valeur médiane se situe entre 20 % et 40 %, et les plus petites valeurs rencontrées sont proches de 10 %. Cela semble indiquer que peu de houppiers ont une forme proche du cercle. La forme du houppier semble avoir une certaine plasticité quelque soit l'espèce. Il y a également une grande variabilité de cv , indiquant que cette plasticité correspond à un potentiel plus ou moins exprimé.

De plus, la valeur médiane, la variabilité et la valeur maximale de cv diminuent quand le diamètre augmente pour toutes les espèces sauf peut-être le chêne et l'alisier blanc. Cette tendance est plus marquée chez le hêtre, l'érable sycomore et le plane, c'est-à-dire les espèces pour lesquels nous disposons d'arbres nettement dominants (forts diamètres). La plasticité de la forme du houppier est donc probablement principalement conditionnée par la compétition subie par l'arbre, puisque les arbres dominants (de diamètre plus important) semblent avoir des rayons plus homogènes en longueur.

La variabilité et les valeurs maximales atteintes pour cv varient selon les espèces. Elles semblent particulièrement importantes pour le charme, secondairement pour l'érable champêtre et le tilleul. Ce sont les essences de l'ancien taillis qui sont soumises à des compétitions plus intenses. A l'inverse elle sont plutôt basses pour le hêtre, même pour les faibles diamètres.

Ce critère indique une plasticité importante de la forme du houppier – du point de vue de la variabilité de la longueur de son rayon – d'autant plus forte que les arbres sont dominés (faibles diamètres et arbres de l'ancien taillis). Cependant il ne permet pas de savoir de quelle manière cette plasticité se manifeste en terme de répartition des rayons de houppiers de différentes longueurs.

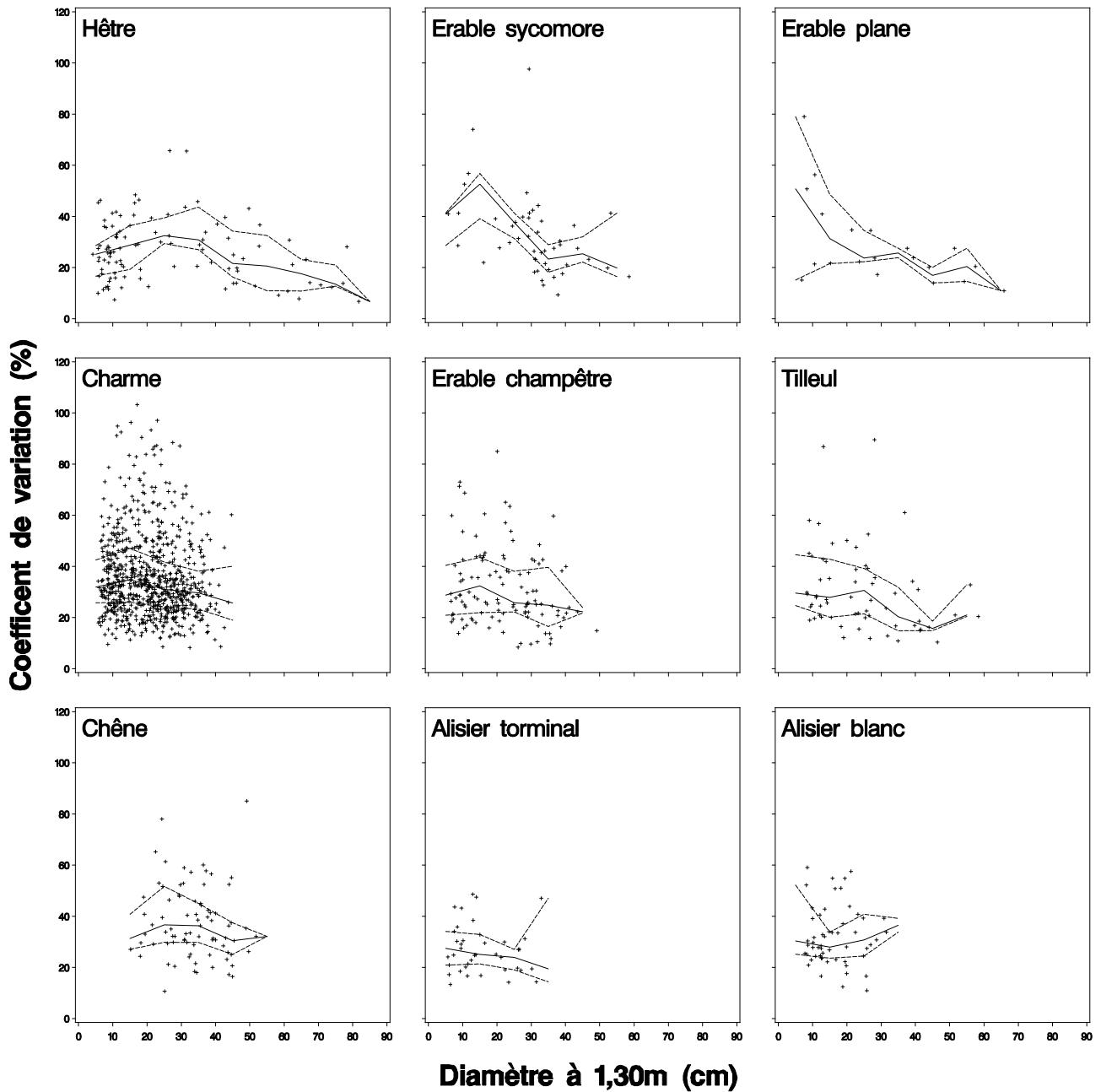


Figure 68 : Coefficient de variation de la longueur des rayons d'un houppier (en %) en fonction du diamètre à 1,30 m (D_{eq} en cm). La ligne continue relie les valeurs médianes du coefficient de variation, pour chaque classe de diamètre. Les lignes pointillées relient les premier (en bas) et troisième (en haut) quartiles pour ces mêmes classes.

3. Longueur de déplacement relative (L_D)

Ce critère permet d'évaluer le décalage entre le centre du houppier et le centre de gravité du polygone délimité par l'extrémité de ses rayons systématiques. Étant donné le grand nombre de rayons choisis (32), ce centre de gravité est très proche du centre de gravité réel du houppier. Le déplacement est calculé relativement au rayon équivalent qui représente l'extension moyenne. La longueur de déplacement relative caractérise la capacité du houppier à s'excentrer pour fuir la compétition de ses voisins. Une valeur de L_D élevée est une cause possible pour un cv élevé. Par un simple effet géométrique une forme de houppier circulaire, mais décalée par rapport au centre du houppier – ayant donc une longueur de déplacement non nulle – conduit à des rayons de longueur variable (**figure 69**). Notons qu'en réalité la représentation géométrique employée (issue de tRAYci) ne permet pas de représenter un cercle parfait avec un nombre fini de rayons depuis un centre de houppier différent de celui du cercle.

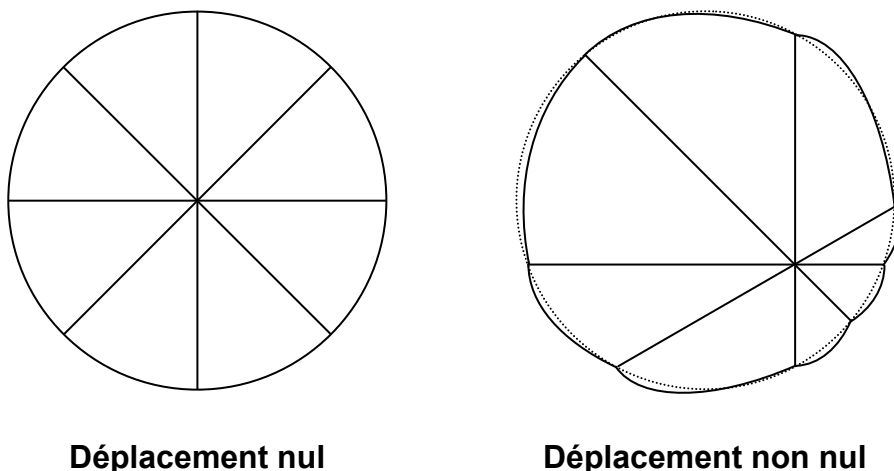


Figure 69 : Effet du déplacement sur la variabilité de la longueur des rayons. Le centre de houppier est matérialisé par le point de convergence des rayons (segments). Les contours en trait plein représentent le contour du houppier dans la représentation de tRAYci, sous l'hypothèse que les huit rayons représentés sont les rayons mesurés. Les pointillés à droite indiquent le cercle passant par les extrémités des rayons.

La **figure 70** présente la longueur de déplacement relative du houppier en fonction du diamètre à 1,30 m pour chaque espèce.

La longueur de déplacement relative est assez variable pour toutes les espèces. Sa valeur médiane se situe entre 10 et 20 %. Nous constatons que des valeurs de 30 à 40 % sont atteintes pour la plupart des essences, ce qui correspond déjà des asymétries assez fortes : le houppier se déporte d'environ un tiers de son rayon équivalent. Le charme présente une gamme de valeur légèrement plus étendue que les autres essences. Pour le hêtre, l'érable sycomore et l'érable plane nous constatons une très nette diminution de la longueur de déplacement relative avec le diamètre à 1,30 m. Cette tendance est également présente, mais de façon beaucoup moins marquée pour le charme et peut-être pour le tilleul. Elle est absente pour les autres essences. Tous cela semble indiquer que les arbres dominants (gros diamètres) ont des déplacements relatifs plus faibles. Par contre les arbres de plus faible diamètre présentent une capacité d'excentrement de leur houppier importante proportionnellement à leur rayon de houppier équivalent.

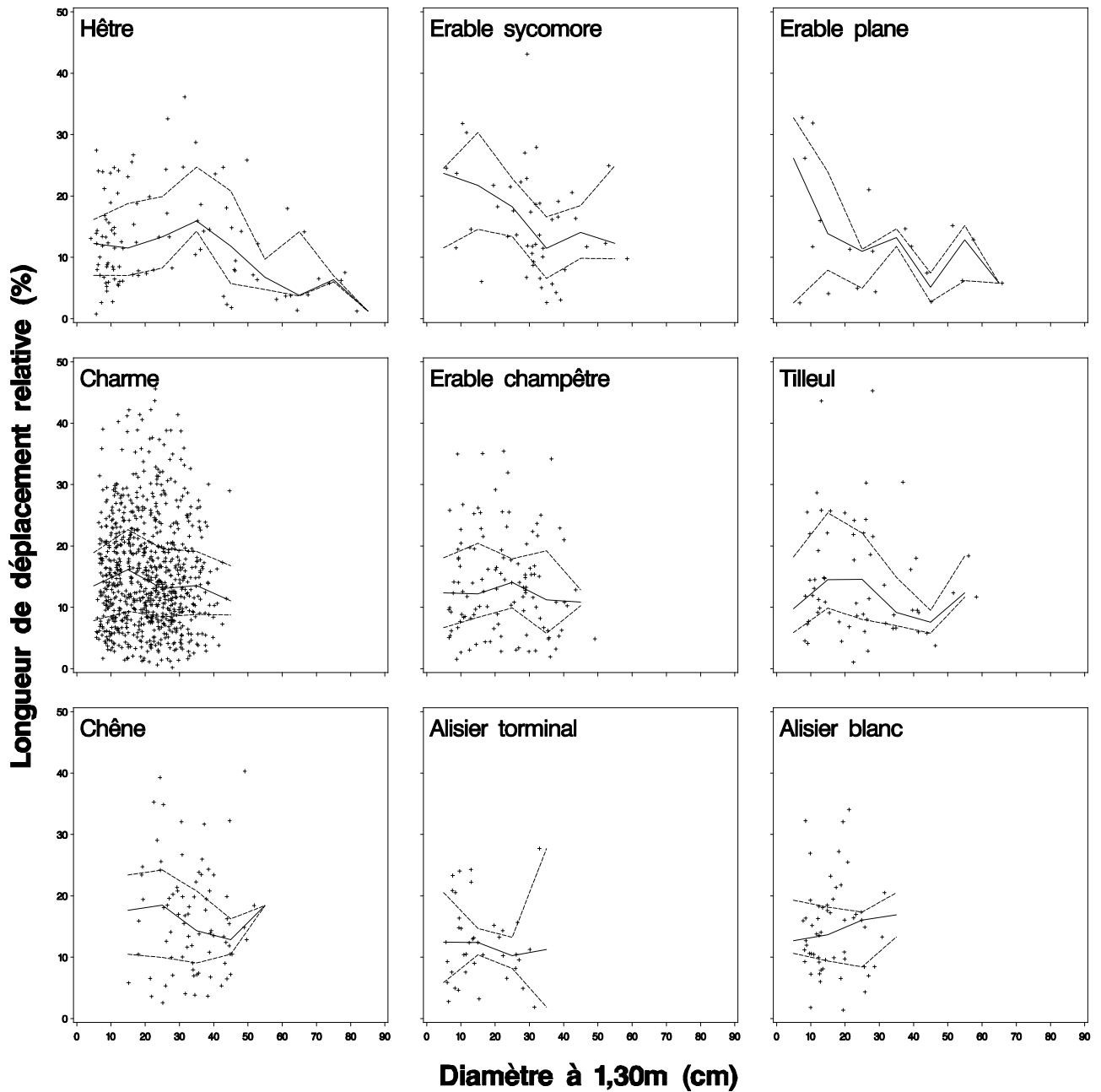


Figure 70 : Longueur de déplacement du houppier (en m) en fonction du diamètre à 1,30 m (D_{eq} en cm). La ligne continue relie les valeurs médianes de la longueur de déplacement, pour chaque classe de diamètre. Les lignes pointillées relient les premier (en bas) et troisième (en haut) quartiles pour ces mêmes classes.

4. Coefficient d'irrégularité (C_I)

Ce critère reflète une autre forme d'anisotropie du houppier : il permet de caractériser le niveau d'irrégularité du houppier, d'évaluer à quel point celui-ci est découpé et/ou aplati. Il augmente en même temps que le déplacement si le houppier présente des creux ou des extensions seulement d'un côté. En revanche, si les irrégularités sont présentes sur tout le pourtour du houppier, le déplacement reste faible mais le coefficient d'irrégularité augmente rapidement. Ce coefficient caractérise donc une souplesse de la forme du houppier mais traduit également la répartition angulaire de la compétition subie. Ainsi une valeur de L_D élevée avec une valeur de C_I faible correspond à la réponse à une compétition unilatérale, alors qu'une valeur de C_I élevée avec une valeur de L_D faible est le signe d'une répartition irrégulière de la compétition, provenant de plusieurs directions.

Dans cette partie nous interpréterons le C_I indépendamment de L_D , à l'aide de **figure 71** qui présente le coefficient d'irrégularité du houppier en fonction du diamètre à 1,30 m pour chaque espèce.

Le coefficient d'irrégularité médian pour les différentes espèces se situe autour de 1,1. Là encore les valeurs extrêmes et la variabilité du coefficient dépendent de l'essence considérée. Le hêtre, l'érable sycomore, l'érable plane, le tilleul et les alisiers dépassent rarement un coefficient de 1,2. L'érable champêtre, le chêne et surtout le charme atteignent des coefficients dépassant 1,5, correspondant à des houppiers plus irréguliers que les autres essences.

Nous constatons une diminution de la valeur médiane et de la variabilité de C_I quand le diamètre augmente, relativement marquée dans le cas de l'érable champêtre, du tilleul et de l'érable plane. Cette même tendance est présente chez le charme mais de façon moins nette, ce qui est probablement dû à une gamme de diamètre moins étendue. Cette variabilité plus forte de C_I pour les diamètres inférieurs à 30 cm correspond aux arbres de l'ancien taillis qui subissent une compétition intense. Le hêtre et l'érable sycomore des valeurs de C_I relativement basse par rapport aux autres essences, même pour les faibles diamètres.

5. Coefficient d'extension maximale (C_E)

Ce dernier critère est d'une nature légèrement différente des précédents. Il caractérise l'extension maximale du houppier par rapport à son extension moyenne. Il ne permet donc pas d'analyser la forme globale du houppier, mais par contre il quantifie la capacité de celui-ci à s'étendre dans une direction particulière. Pourtant une valeur importante de C_E peut être due en partie à une valeur de L_D et/ou de C_I élevée. Et en tout cas l'augmentation de C_E implique obligatoirement l'augmentation de C_I .

Ce critère peut être interprété comme une capacité de fuite de la compétition, dans le cas où cette compétition est intense et ne laisse que quelques directions libres à un houppier pour s'étendre. C'est en quelque sorte une quantification de l'opportunisme du houppier à se frayer un chemin entre ses compétiteurs, lorsque ces compétiteurs existent. Malheureusement, là encore il est difficile d'interpréter des différences entre essences alors qu'elles n'ont pas la même place au sein du peuplement.

La **figure 72** présente le coefficient d'extension maximale du houppier en fonction du diamètre à 1,30 m pour chaque espèce. Le coefficient médian se situe 1,5 pour les différentes espèces. Encore une fois les valeurs maximales atteintes et la variabilité de C_E varient d'une essence à l'autre. Quelque soit l'essence le pourcentage de valeurs supérieures à 2,0 est faible. Même dans le cas du

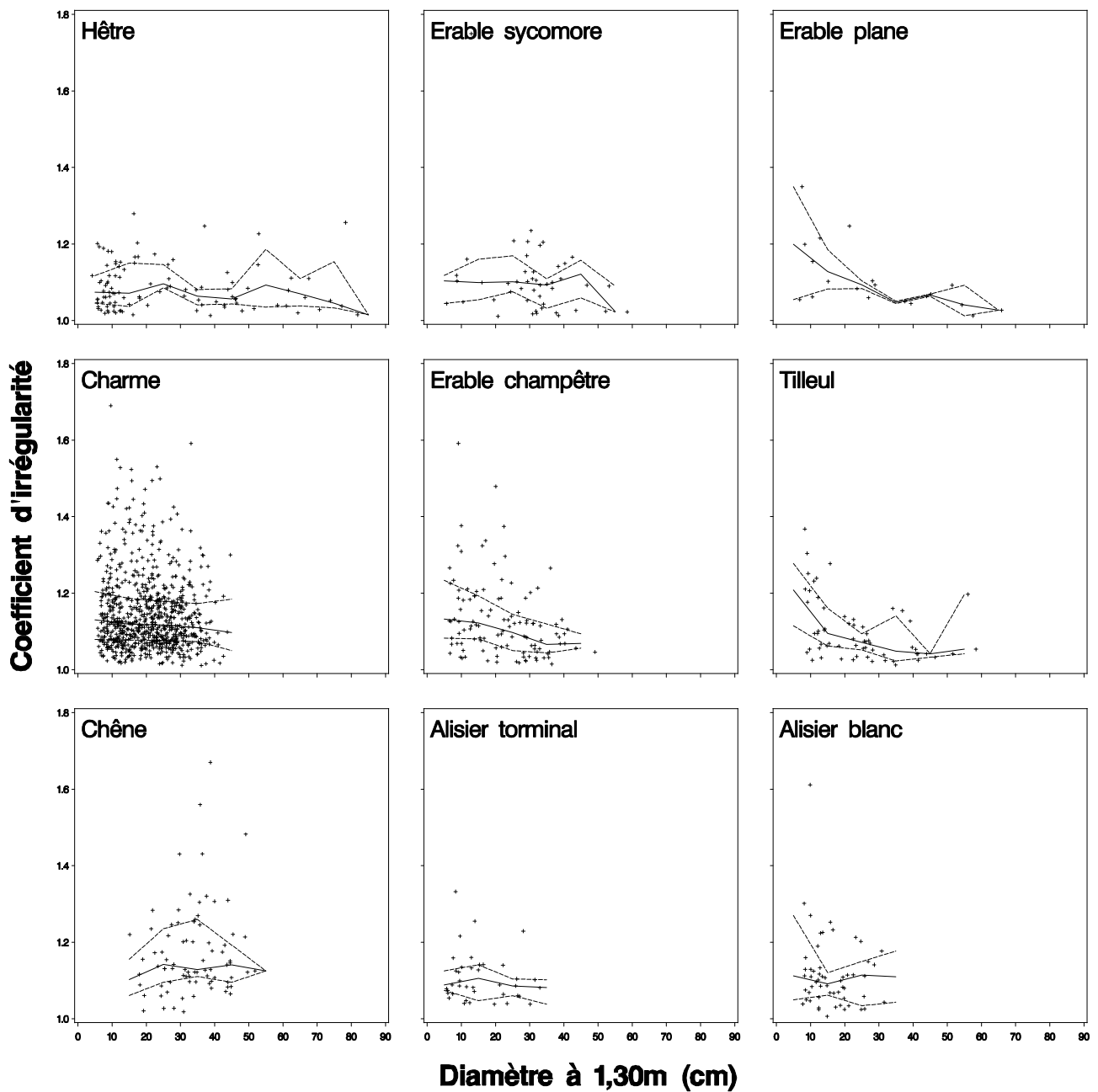


Figure 71 : Coefficient d'irrégularité en fonction du diamètre à 1,30 m (D_{eq} en cm). La ligne continue relie les valeurs médianes du coefficient d'irrégularité, pour chaque classe de diamètre. Les lignes pointillées relient les premier (en bas) et troisième (en haut) quartiles pour ces mêmes classes.

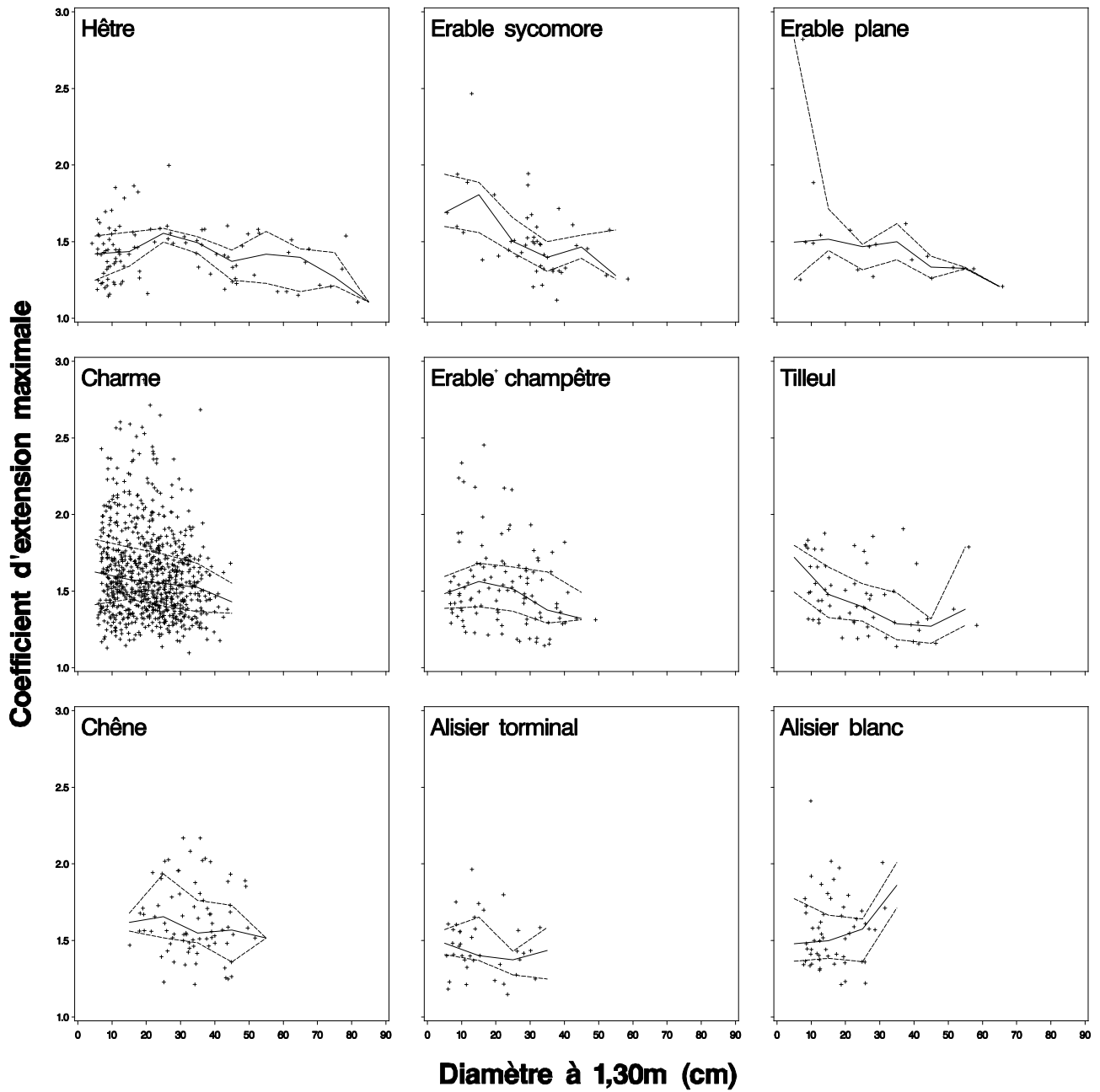


Figure 72 : Coefficient d'extension maximale en fonction du diamètre à 1,30 m (D_{eq} en cm). La ligne continue relie les valeurs médianes du coefficient d'extension maximale, pour chaque classe de diamètre. Les lignes pointillées relient les premier (en bas) et troisième (en haut) quartiles pour ces mêmes classes.

charme, malgré le nombre d'individus nettement supérieur par rapport aux autres essences, les valeurs supérieures à deux restent clairement minoritaires. Pour autant la variabilité entre 1,0 et 2,0 est grande pour toutes les espèces sauf le hêtre et l'érable plane qui semblent plus présents dans la gamme 1,0 – 1,5.

Nous constatons que la variabilité de C_E est plus grande (pour une essence donnée) pour les arbres dont le diamètre est inférieur à 30-40 cm, en particulier chez le hêtre. Ce phénomène est probablement plus marqué pour le hêtre du fait que cette essence est présente sur une gamme de diamètre nettement plus étendue que les autres essences.

E. Bilan

Nous allons tenter ici de faire une synthèse des données que nous avons présentées dans ce chapitre, en insistant sur les différences entre essences et en fonction du diamètre. Cela dit il faut garder à l'esprit que le dispositif n'a pas été conçu pour étudier les relations de compétition entre essences, et que par conséquent il sera difficile de tirer des conclusions sur le comportement des essences sachant qu'elles ont des places différentes au sein du peuplement, des gammes de diamètre variées et que le nombre d'individus mesurés pour chacune est très variable.

Les analyses de recouvrement des houppiers et celles concernant leur forme indiquent que les houppiers tendent à éviter au maximum les chevauchements effectifs. Cela se traduit concrètement par peu de recouvrement à une hauteur donnée et par une plasticité importante de la forme des houppiers (forte variabilité de la longueur de houppier, du rayon équivalent et des critères de forme).

Les quatre critères indiquent une plasticité potentielle qui diminue avec le diamètre des arbres. Plus un arbre est dominant, moins la forme de houppier semble s'écarter d'une forme isotrope. La compétition semble donc être le moteur principal de la souplesse de forme des houppiers, les arbres de plus gros diamètres, dominants, imposant leur loi aux autres. Il y a peut-être aussi un effet mécanique : un même niveau d'asymétrie (relative) compromet probablement plus la stabilité d'un gros houppier que celle d'un petit.

La variabilité potentielle des houppiers apparaît même fortement liée à la stratification verticale du peuplement. L'analyse des surfaces de houppiers à différentes hauteurs et les relations entre hauteur et diamètre nous conduisent à définir quatre grandes strates théoriques qui forment en réalité un continuum.

Une **strate sur-dominante** composée de très gros hêtres peu fréquents mais ayant une hauteur nettement supérieure (autour de 25 m) aux autres arbres et une extension de houppier particulièrement importante. Ce sont les vieilles réserves de l'ancien taillis sous futaie. Cette première strate n'existe pas en placette 2. Les hêtres de la strate sur-dominante sont globalement circulaires avec des faibles valeurs pour les quatre critères étudiés. C'est assez logique du fait de la forte dominance de ces arbres, qui imposent leur loi aux autres.

Une **strate dominante** comprenant le hêtre, l'érable plane, l'érable sycomore et quelques charmes (anciennes réserves intermédiaires). Ces arbres ont des hauteurs de 20 m environ et un houppier bien développé verticalement et horizontalement. Les arbres de la strate dominante ont des formes plus variables avec en particulier un cv plus élevé. Cependant les critères C_L , C_E et L_D sont plutôt dans leur fourchette basse pour cette strate, même s'ils présentent une certaine variabilité. L'érable

sycomore semble avoir une forme un peu plus variable, peut-être du fait d'une position légèrement dominée par rapport à ses deux partenaires.

Une **strate co-dominante** composée en particulier de l'ancien taillis, plus des arbres des mêmes essences que la strate dominante (anciennes jeunes réserves). Nous y trouvons le hêtre, l'érable sycomore, l'érable plane, le charme, le tilleul, l'érable champêtre. C'est dans cette strate que la surface de houppier à une hauteur donnée est la plus importante. C'est l'étage où la compétition entre arbres de même statut social est la plus marquée. A cela s'ajoute la compétition des deux strates supérieures, dont la partie inférieure des houppiers cohabite avec ceux de la strate co-dominante. Cette strate est très majoritairement occupée par le charme. Les arbres de la strate co-dominante présentent la variabilité de forme la plus forte sur tous les critères. Le charme ayant de loin la plus forte variété de formes sur les quatre critères. Le hêtre par contre semble y avoir un comportement singulier (voir les commentaires concernant les hêtres de faible diamètre). En effet il présente un coefficient de variation des rayons de houppiers important ainsi qu'un coefficient d'irrégularité faible par rapport aux autres essences. Sa longueur relative de déplacement et son coefficient d'extension maximale du houppier sont par contre dans la norme des autres essences de l'étage. Le houppier des hêtres semblent donc moins s'adapter au voisinage que les autres essences. Est-ce à dire que les houppiers de hêtre exercent une plus forte pression de compétition que les autres essences, étant gagnant lorsqu'il y a concurrence pour l'espace ? Il est difficile de conclure avec l'échantillonnage dont nous disposons. Quoiqu'il en soit les valeurs du déplacement relatif et du coefficient d'extension maximale laissent penser que cela n'empêche pas le hêtre de faire preuve d'opportunisme en occupant des espaces laissés libres à son voisinage.

Une **strate dominée** composée d'arbres de toutes les espèces citées auparavant ainsi que les deux alisiers, quasiment exclusivement présents dans cette strate. La compétition dans cette strate est forte, avec une pression importante des strates situées au dessus. Les arbres de la strate dominée présentent à peu près les mêmes caractères que l'étage précédent. Il est d'ailleurs impossible de discriminer ces deux strates pour l'analyse des essences qui leur sont communes, c'est-à-dire toutes sauf les deux alisiers. Ceux-ci présentent pour tous les critères une grande variabilité.

Le chêne a une place un peu particulière dans tout cela. Il est clairement situé en strate dominante, pour la placette 2. En placette 1 par contre, il se positionne plutôt au sommet de strate co-dominante avec des individus très compressés et souvent dépérissants.

Les données présentées dans ce chapitre ont été analysées ici en terme de structure du peuplement. Mais elles présentent un autre intérêt majeur. Les relations entre les caractères du houppier et le diamètre à 1,30 m seront utilisées pour alimenter les modèles de reconstruction des houppiers présentés dans le chapitre IV. Les critères de forme du houppier y seront également utilisés à des fins de validation.

Chapitre IV : Reconstitution des houppiers à partir des caractéristiques dendrométriques du couvert

A. Démarche

1. Problématique

L'objectif de ce chapitre est de proposer une méthode permettant d'alimenter le modèle de lumière tRAYci avec un jeu de données restreint, sans compromettre la qualité globale de l'estimation de l'éclairement relatif. Notre approche consiste à reconstituer les houppiers à partir des données facilement accessibles, à savoir la position des arbres et leur diamètre à 1,30 m. Dans ce chapitre, nous nous placerons dans le cadre de la représentation des houppiers fournie par tRAYci, décrite au chapitre II.

L'interception du rayonnement est déterminée par la répartition de la surface foliaire dans l'espace. Dans le modèle tRAYci, cette surface foliaire est regroupée au sein de volumes représentant les houppiers individuels des arbres. L'hypothèse de base de notre approche est que l'interception du rayonnement dépend principalement de l'agencement relatif des houppiers à l'échelle du couvert. C'est-à-dire que le critère déterminant est de bien localiser dans l'espace les volumes contenant des feuilles et ceux où il n'y en a pas. Dans cette hypothèse, le positionnement correct des volumes de feuillage dans l'espace prévaut sur la finesse de représentation du feuillage lui-même. De la même façon nous abordons le volume comme une quantité à l'échelle du couvert. Il y a donc une hiérarchisation des ordres de grandeur : nous cherchons à bien répartir les volumes dans leur ensemble, et non à connaître la délimitation précise des contours de chaque houppier. Ce dernier point correspond au choix d'un modèle où le houppier est représenté par une unique enveloppe de forme relativement simple, mais qui permet une souplesse importante en terme d'extension verticale et latérale.

Cette approche se fonde sur la nature anisotrope de la répartition du rayonnement sur l'hémisphère céleste (principalement du fait de la part directe de l'éclairement). Pour un rayonnement provenant d'une direction donnée il est important de savoir quel volume foliaire est traversé. De plus la nature exponentielle de la loi d'interception du rayonnement, issue de l'analogie avec les milieux turbides, a des conséquences importantes du fait de la non additivité de la fonction exponentielle. Cela oblige en effet à calculer séparément l'interception du rayonnement provenant de chaque direction de l'hémisphère céleste. Ainsi ce qui est important ce n'est pas la longueur moyenne de trajet au sein des houppiers, mais bien la longueur de trajet spécifique à chaque direction. Dans un peuplement à une seule strate homogène, la longueur de trajet au sein des houppiers est relativement stable et en tout cas peu dépendante de la position sous couvert. Dans un peuplement hétérogène, la position relative des houppiers prend une grande importance, puisque leur stratification verticale et leurs extensions latérales relatives font varier la longueur de trajet de façon considérable d'une direction à l'autre de l'hémisphère céleste et selon le point considéré (**figure 73**). Cependant, du fait de la forme exponentielle de la loi d'extinction, il y a un effet de seuil. A LAD fixé, à partir d'une certaine longueur, le rayonnement est presque complètement éteint. A partir de ce point la traversée

de houppiers supplémentaires n'a qu'une influence très restreinte puisqu'il ne reste quasiment plus rien à intercepter. Cela nous conduit à la conclusion qu'il est très important de bien déterminer la position des zones où la longueur de trajet au sein des houppiers est faible (les espaces entre houppiers) car c'est là que l'essentiel de la lumière peut être transmise sous couvert.

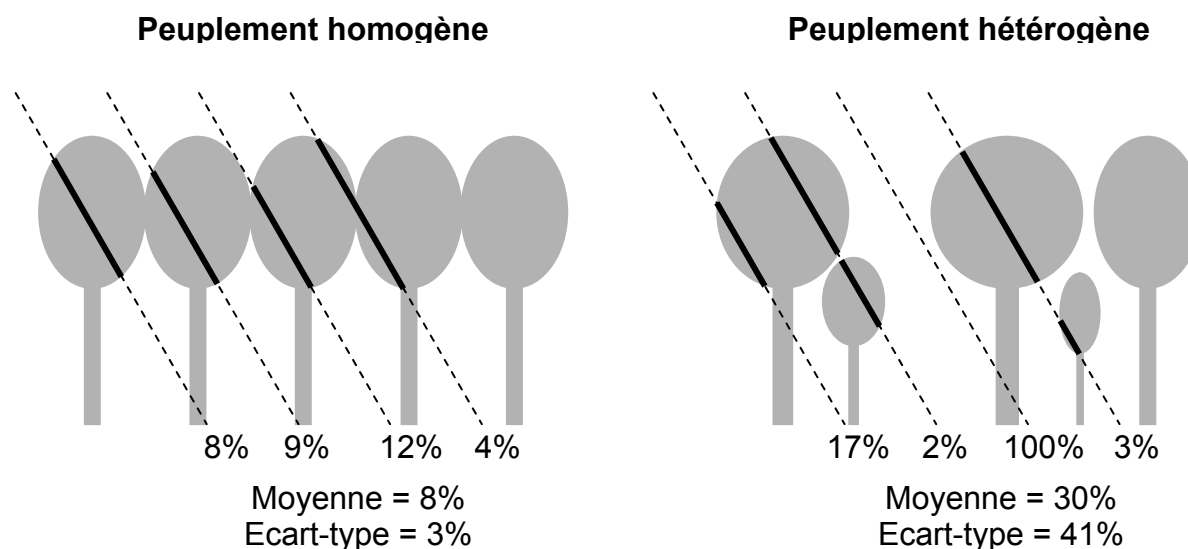


Figure 73 : Illustration des différences entre peuplements homogène et hétérogène, en ce qui concerne l'interception du rayonnement incident. Nous ne considérons ici qu'une direction incidente pour les rayons lumineux (en pointillés). Les longueurs de trajet au sein des houppiers sont figurées en trait gras. L'éclairement relatif sous couvert est donné pour différents points (calculé en fonction de la longueur de trajet, avec une même valeur de LAD pour tous les arbres). Nous constatons que les différences de distribution des houppiers conduisent à de grandes différences en termes de moyenne et d'écart type de l'éclairement sous couvert. Dans cet exemple l'interception par les troncs n'est pas prise en compte.

Dans tRAYci, la forme générique des houppiers est déterminée par des paramètres espèce-dépendants. Chaque volume individuel de houppier est ainsi clairement délimité dans l'espace à l'aide d'une représentation relativement réaliste à l'échelle de l'arbre. Les limites verticales du volume d'un houppier sont définies par deux variables de hauteur, la hauteur totale (H_t) et la hauteur de base de houppier (H_b , c'est-à-dire $H_t - LH$, LH étant la longueur de houppier). Ses limites horizontales sont les rayons de houppiers, qui déterminent l'extension latérale du houppier. Ce sont ces différentes limites qui déterminent l'occupation de l'espace par les volumes foliaires.

Dans notre approche visant à reconstituer les données du houppier à partir des données prises sur le tronc, nous allons maintenant préciser comment nous comptons obtenir les différentes caractéristiques du houppier.

2. Détermination des paramètres espèce-dépendants

Les paramètres E_{sup} (paramètre de forme de la partie supérieure du houppier), E_{inf} (paramètre de forme de la partie inférieure du houppier), L_{sup} (paramètre d'épaisseur de feuillage de la partie supérieure du houppier) et L_{inf} (paramètre d'épaisseur de feuillage de la partie inférieure du houppier) caractérisent la forme de l'enveloppe du houppier. Le fait de les fixer aboutit à une simplification de la représentation des houppiers. Nous considérerons que les valeurs adoptées (E_{sup}

= $E_{inf} = 2$, $L_{sup} = 100$ % et $L_{inf} = 0$ %) définissent une forme de houppier adaptée à notre sujet d'étude : la représentation d'arbres de forêt hétérogène feuillue. Nous ne nous intéresserons donc pas à leur variation.

Le paramètre $H_m\%$ (hauteur relative de plus grande largeur de houppier) est un autre critère de forme des houppiers, mais que nous avons mesuré. Les analyses précédentes (chapitre III) nous ont appris que ce paramètre est très variable, mais que sa valeur moyenne est assez stable (environ 0,5) quelle que soit l'essence. Des tests, non présentés ici, nous ont permis de vérifier que ce paramètre a finalement peu d'influence sur le résultat des simulations de l'éclairement, en tout cas en fixant les autres paramètres de forme comme nous l'avons fait. A priori l'utilisation d'une valeur de 0,5 pour $H_m\%$ quelle que soit l'espèce serait tout à fait acceptable, n'entraînant que des différences minimales sur les simulations.

Le dernier paramètre, le LAD (densité de surface foliaire) a une place particulière, du fait que c'est le seul paramètre qui soit défini à l'échelle de l'espèce qui ne caractérise pas la forme du volume de houppier, mais la quantité de feuillage par unité de volume. Cependant le LAD a une forte interaction avec le volume de houppier. En effet, la surface foliaire totale d'un houppier est obtenue par le produit de son volume par le LAD . Dans notre cas nous avons adopté une unique valeur quelle que soit l'espèce, d'une part parce que nous n'avons pas de méthode efficace permettant de le mesurer dans notre contexte de forêt mélangée et d'autre part parce que les espèces dont nous disposons ne semblent pas profondément différentes de ce point de vue (sauf peut-être le chêne, assez peu présent). Dans ce chapitre nous utiliserons donc la valeur déterminée au chapitre II ($1,6 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$), et nous n'étudierons pas l'effet de ce paramètre sur les simulations. Cependant il faut garder à l'esprit que dans notre cas nous avons calibré ce paramètre en comparant les simulations de lumière obtenues avec différentes valeurs pour le LAD à des méthodes de référence. Il est peu probable que la valeur adoptée soit utilisable dans d'autres contextes et pour toute essence. Toute utilisation dans un autre contexte des méthodes présentées dans la suite ne peut donc être envisagée qu'à la condition d'avoir une valeur de LAD (voire plusieurs valeurs correspondant à des espèces différentes) adaptée au peuplement analysé.

3. Reconstitution des variables de hauteur

Au chapitre III, nous avons constaté que les variables de hauteur étaient bien reliées au diamètre à 1,30 m, malgré une variabilité parfois importante. Nous avons ainsi établi des relations pour la hauteur totale (H_t), et la longueur de houppier (LH) en fonction du diamètre à 1,30 m. Nous sommes donc en mesure de reconstituer ces données ainsi que la hauteur de base de houppier (H_b , obtenue à partir de H_t et LH) pour chaque arbre, en connaissant uniquement son espèce et son diamètre.

A la fin de cette étape, nous avons donc défini pour chaque houppier sa forme générique (à l'aide des paramètres espèce-dépendants) et obtenu ses limites verticales à partir du diamètre à 1,30 m. Il reste donc à définir les limites de l'extension latérale du houppier, les autres données du houppier étant fixées. C'est ce que nous allons aborder en détail dans la partie suivante.

B. Reconstruction de l'extension latérale du houppier

Dans la représentation choisie, il n'y a qu'une valeur de H_t et de H_b pour chaque arbre. L'extension verticale du houppier est donc complètement définie par ces deux données. En revanche, la forme utilisée pour représenter le houppier permet une grande variabilité de l'extension latérale du houppier. Au chapitre III, nous avons relié le rayon de houppier équivalent (R_{eq} , le rayon d'un

cerle de même surface que la section du houppier à sa hauteur H_m) au diamètre à 1,30 m de l'arbre, de la même façon que pour les paramètres de hauteur. Nous pouvons donc reconstituer le volume du houppier à partir du diamètre à 1,30 m, mais il faut encore déterminer la forme exacte du contour du houppier, connaissant son volume et son extension verticale.

Nous proposons deux méthodes alternatives (**figure 74**) pour reconstituer l'extension latérale du houppier à partir de R_{eq} et des variables de hauteur :

- L'approche isotrope consiste à négliger les variations de l'extension latérale du houppier, et avoir un rayon constant égal à R_{eq} . Cette méthode a l'avantage d'être très simple, et correspond finalement à la démarche adoptée par les modèles de lumière utilisant des solides de révolution pour représenter les houppiers. Elle sera considérée comme un point de comparaison.
- L'approche anisotrope s'appuie sur une méthode de reconstruction des houppiers par minimisation du recouvrement que nous avons mise au point. Elle permet de reconstituer l'extension latérale d'un houppier en fonction de la position des houppiers voisins. Son objectif est d'obtenir des houppiers qui se partagent l'espace de façon réaliste à l'échelle du couvert, et ainsi d'avoir une meilleure description de l'occupation de l'agencement relatif des houppiers. Cela devrait permettre une meilleure simulation de l'interception du rayonnement incident que dans le cas de l'approche isotrope.

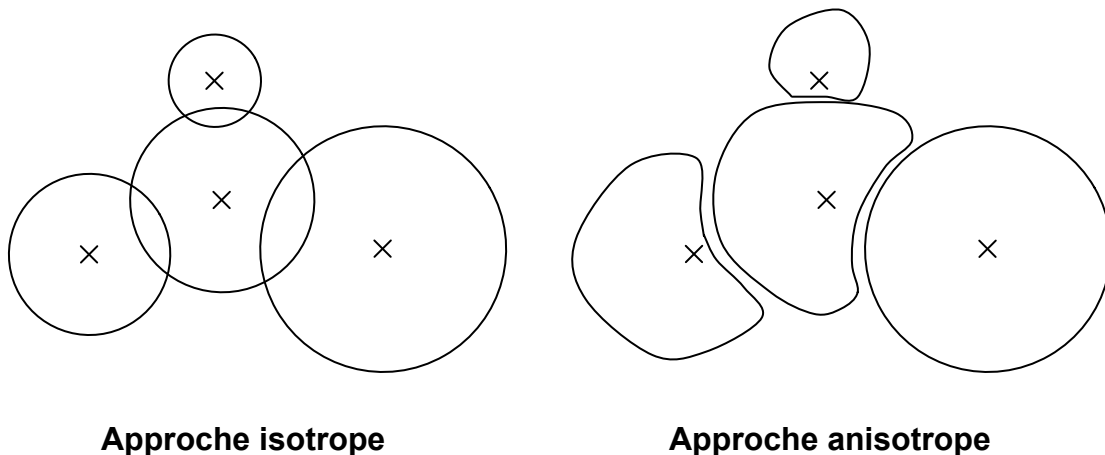


Figure 74 : Résultat schématique de la reconstruction des houppiers (représentés en trait plein) par les deux méthodes, pour les mêmes arbres. Les centres de houppiers sont représentés par des croix.

1. Approche isotrope

Pour cette approche, les houppiers ont une symétrie axiale autour du centre de houppier : tous les rayons sont égaux à R_{eq} . Chaque houppier est un ellipsoïde de révolution. Le demi-axe vertical de cet ellipsoïde est alors égal à la moitié de la longueur de houppier LH . Et ses deux demi-axes horizontaux sont égaux à R_{eq} .

Cette méthode est intéressante car elle permet d'obtenir directement toutes les caractéristiques du houppier à partir du diamètre à 1,30 m. Cependant elle présente plusieurs inconvénients.

Tout d'abord elle néglige complètement l'effet de la compétition sur la forme du houppier. Ainsi si nous reprenons les critères de forme utilisée au chapitre III, nous obtenons les mêmes valeurs pour tous les houppiers : le coefficient de variation du rayon de houppier (cv) est nul, la longueur de

déplacement (LD) est nulle, le coefficient d'irrégularité (CI) vaut un et le coefficient d'extension maximale (CE) vaut un. Cette représentation simplifiée ne tient donc pas du tout compte de la forte variabilité observée pour ces différents critères.

De plus, en négligeant l'agencement des houppiers entre eux, cette approche conduit à des recouvrements artificiels entre houppiers.

2. Approche anisotrope : reconstruction des houppiers par minimisation du recouvrement

a. Objectif

L'objectif de cet algorithme est d'obtenir des houppiers dont le recouvrement effectif en 3D (et non celui de leur projection au sol) est minimal. Chaque houppier tente d'avoir une extension latérale la plus isotrope possible, mais s'adapte en fonction des houppiers voisins. Plus la compétition subie par un houppier est irrégulièrement répartie, plus celui-ci aura tendance à avoir une extension variable.

Au début de l'algorithme, pour chaque houppier à reconstruire nous disposons de :

- La position du centre de houppier sous la forme de coordonnées (x, y) .
- La hauteur totale du houppier (H_t).
- La hauteur de base de houppier (H_b).
- La hauteur H_m , calculée grâce à la valeur $H_m\%$ de l'espèce.
- Du rayon équivalent R_{eq} du houppier.

Rappelons que la longueur de houppier est définie ainsi : $LH = H_t - H_b$.

A la fin de l'algorithme, nous devons obtenir pour chacun d'eux 8 rayons de houppiers (sous la forme d'un azimut et d'une longueur), avec des angles séparant deux rayons successifs n'excédant pas 90 degrés.

b. Principes et hypothèses fondatrices

L'algorithme repose sur les cinq principes suivants :

1. A la fin de l'algorithme, chaque houppier doit atteindre un volume cible. Le volume cible du houppier V_c est calculé comme le volume d'un ellipsoïde dont la longueur de l'axe vertical est LH , et la longueur des deux demi axes horizontaux est R_{eq} . Ce volume est donné par la formule suivante : $V_c = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{LH}{2} \cdot R_{eq}^2$. Ce volume est identique à celui obtenu pour le même houppier par l'approche isotrope.
2. H_t , H_b et H_m sont fixés au début de l'algorithme pour chaque houppier. Le volume cible ne peut être atteint que par l'ajustement des rayons de houppier R_i . Cependant un paramètre permet de spécifier une condition d'extension maximale, pour éviter qu'un rayon donné soit trop grand par rapport aux autres.
3. Les arbres de plus gros diamètre sont considérés comme dominants et ont donc priorité sur les arbres plus petits pour l'occupation de l'espace par leur houppier.

4. Chaque arbre a une extension minimale isotrope de houppier, fonction de son diamètre, qui ne peut être réduite, même par des arbres plus gros. Cela permet de s'assurer que le centre de houppier est inclus dans le houppier, condition obligatoire dans la représentation utilisée.
5. Les chevauchements entre houppiers sont évités au maximum par l'ajustement de la longueur des rayons de houppiers dans les différentes directions. Cependant lorsque aucun ajustement supplémentaire n'est possible sans recouvrement, alors un recouvrement également réparti dans les différentes directions est possible, afin d'atteindre le volume cible.

Ces principes correspondent à des hypothèses sur le développement du houppier et la compétition inter-arbres en peuplement feuillu :

1. Le diamètre à 1,30 m est très corrélé à la taille du houppier d'un arbre. Par conséquent le volume de houppier est supposé invariant pour un diamètre à 1,30 m et une essence donnée, en tout cas au sein d'un peuplement (cf. principe 1.).
2. Nous avons supposé que la plasticité des arbres est principalement générée par l'extension latérale de leur houppier (cf. principe 2.). La plasticité verticale a été mise en évidence au chapitre III avec l'importante variabilité de *LH*, mais aussi dans la littérature (*Frech et al. 2003*) et particulièrement dans le cas de lisières (*Muth et Bazzaz 2002*). Cependant nous avons considéré la plasticité de l'extension horizontale du houppier comme prédominante. De plus celle-ci est supposée pouvoir compenser une sous-estimation éventuelle de la plasticité verticale en terme de volume de houppier. Afin d'être plus réaliste, des développements futurs de l'algorithme pourraient prendre en compte également la plasticité verticale des houppiers. Cependant, dans ce cas, il faudrait envisager d'utiliser un modèle de lumière permettant de gérer des houppiers ayant une extension verticale variable, comme par exemple celui proposé par *Cescatti 1997*.
3. Nous avons supposé que les arbres dominants ont tendance à « imposer leur loi » aux arbres plus petits et que par conséquent ils ont des houppiers globalement plus circulaires (cf. principe 3.). L'analyse de la forme des houppiers, réalisée au chapitre III, nous conforte dans cette hypothèse.
4. Nous avons supposé que les houppiers avaient une extension minimale depuis leur centre géométrique (axe d'insertion des branches maîtresses) quelle que soit la compétition environnante (cf. principe 4).
5. Nous avons supposé que des arbres voisins évitaient au maximum que leurs houppiers se chevauchent (cf. principe 5.). En d'autres termes il ne devrait idéalement pas y avoir deux houppiers au même endroit. Nous avons également supposé que les houppiers sont capables de s'étendre de façon accentuée dans une direction sans concurrence pour compenser la présence d'un houppier compétiteur dans une autre (*Muth et Bazzaz 2002, 2003*). Nous n'avons pas considéré de différences entre espèces de ce point de vue. Pourtant le chapitre III suggère qu'elles existent, même s'il est difficile de distinguer le potentiel propre des espèces de leur position hiérarchique dans le peuplement. Des différences de plasticité entre espèces ont également été constatées par *Frech et al. 2003*. Là encore, ce pourrait être une voie d'amélioration de l'algorithme que de prendre en compte des plasticités différentes selon les espèces.

Globalement l'algorithme consiste à considérer successivement les houppiers, du plus gros au plus petit. Pour chacun, nous partons d'un houppier minimal. Celui-ci est défini par un grand nombre de rayons (32) afin que la forme du houppier soit suffisamment souple. Lors d'un processus itératif (boucle), le houppier voit son extension latérale augmenter progressivement. L'extension latérale dans une direction donnée s'interrompt lorsqu'une intersection avec un autre houppier se produit, pour l'une des hauteurs testées. L'extension se poursuit jusqu'à ce que le volume cible soit atteint ou bien que le houppier ne puisse plus s'étendre dans aucune direction sans qu'une intersection se produise. Dans ce cas les rayons sont ajustés pour atteindre malgré tout le volume cible. Enfin la

représentation de chaque houppier est simplifiée pour correspondre à la représentation souhaitée (seulement 8 rayons).

c. Paramètres

L'algorithme proposé utilise les paramètres suivants.

- dH est la distance verticale séparant deux plans horizontaux successifs où le recouvrement entre houppiers est évalué. Quand dH tend vers zéro l'évaluation des surfaces de recouvrement à différentes hauteurs entre houppiers se rapproche d'une évaluation du recouvrement de leurs volumes, mais le temps de calcul tend vers l'infini. Si dH est fixe, les hauteurs utilisées sont quant à elles relatives à la valeur de H_m pour chaque houppier. Pour les simulations, nous avons utilisé $dH = 2,5$ m.
- dR est l'accroissement élémentaire des rayons de houppiers R_i à chaque itération. Plus dR est faible, plus l'ajustement de l'extension latérale des houppiers est fin, mais là encore le temps de calcul augmente en conséquence, du fait d'un plus grand nombre d'itérations nécessaires. Pour les simulations, nous avons utilisé $dR = 0,5$ m.
- K_r est un coefficient permettant d'obtenir le rayon de houppier minimum R_{min} d'un houppier donné, à partir de la relation : $R_{min} = K_r \cdot d$, où d est le diamètre à 1,30 m de l'arbre exprimé en mètres. Ce coefficient détermine l'extension irréductible de chaque houppier. Pour permettre à l'algorithme de fonctionner pleinement, il faut éviter de donner à K_r une valeur trop élevée, sous peine de se rapprocher d'une approche isotrope. Pour les simulations nous utiliserons $K_r = 2$.
- $C_{E,max}$ est le coefficient d'extension maximale du houppier, défini de la même façon qu'au chapitre III (C_E). La seule différence, c'est que dans ce cas $C_{E,max}$ ne correspond pas à la valeur d'un houppier, mais à une valeur limite que les houppiers ne peuvent pas franchir. Ainsi pour chaque rayon R_i la « **condition d'asymétrie** » suivante doit toujours être respectée : $R_i \leq C_{E,max} \cdot R_{eq}'$, où R_{eq}' est le rayon équivalent courant c'est-à-dire défini comme le rayon d'un cercle dont l'aire est égale à l'aire actuelle du houppier dans le plan situé à la hauteur H_m . Dans ce cas, contrairement à R_{eq} , l'aire considérée est celle du houppier au début de l'itération en cours. Cette aire augmente progressivement quand le houppier s'accroît, pour atteindre en fin d'algorithme l'aire effective du houppier. Pour les simulations nous utiliserons $C_{E,max} = 2$. Ce choix a été fait à partir de l'observation des valeurs observées dans le peuplement (chapitre III). En effet l'immense majorité des houppiers a une valeur de $C_{E,max}$ inférieure à 2. Nous n'avons pas pris une valeur plus grande qui aurait permis d'obtenir les cas observés les plus extrêmes car le nombre de houppiers ayant une valeur mesurée au dessus de 2 est très faible. Cela a pour conséquence d'éviter un effet « tentaculaire » excessif des houppiers, lorsque de très faibles espaces existent dans une direction donnée.
- R_{max} est le rayon de houppier maximum autorisé. C'est un paramètre permettant d'éviter que le houppier ne s'allonge indéfiniment dans une direction donnée. Dans la plupart des cas la condition d'asymétrie limite l'extension du houppier bien avant R_{max} . Ce paramètre est également utilisé pour déterminer quels sont les voisins d'un houppier en cours de reconstruction. Ainsi les intersections entre deux houppiers ne sont calculées que si leurs centres sont distants d'au plus $2 \cdot R_{max}$. Il est préférable de choisir une valeur élevée pour ce paramètre, supérieure au rayon maximal rencontré sur le terrain. Ce paramètre permet d'accélérer les calculs en prenant en compte uniquement les arbres potentiellement intéressants (étant suffisamment proches pour se chevaucher). Pour les simulations nous avons utilisé $R_{max} = 20$ m.

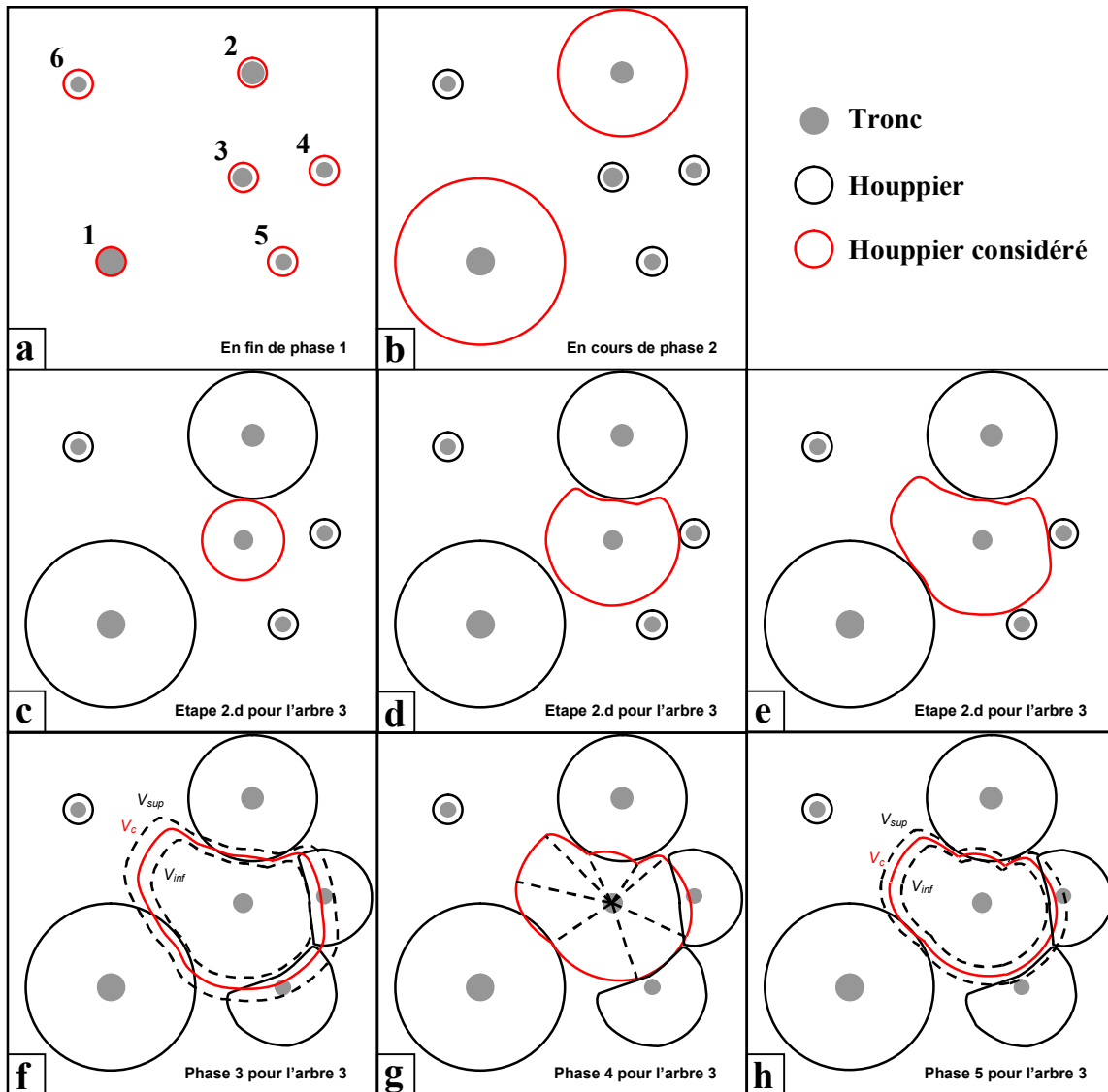


Figure 75 : Enchaînement des différentes phases de l'algorithme de reconstruction des houppiers par minimisation des recouvrements. L'exemple présenté est simplifié : toutes les intersections sont considérées à une unique hauteur, pour tous les arbres. Les arbres sont numérotés et traités par ordre décroissant de diamètre. **a** : Un houppier irréductible est créé pour chaque arbre. **b** : Les houppiers des arbres n°1 et 2 ont terminé leur phase d'expansion (phase 2) : ils ont atteint ou dépassé leur volume cible. **c**, **d** : Les rayons de l'arbre n°3 sont augmentés tant qu'il n'y a pas d'intersections avec les houppiers voisins et que son volume cible n'est pas atteint. **e** : La phase d'expansion se termine pour le houppier de l'arbre n°3, soit parce qu'il a atteint (ou dépassé) son volume cible, soit parce qu'il ne peut plus s'étendre sans qu'une intersection se produise. **f** : Pour chaque arbre, les 32 rayons du houppier sont ajustés par dichotomie, de façon à ce que celui-ci atteigne exactement son volume cible. Les bornes inférieures (volume V_{inf}) et supérieures (volume V_{sup}) permettant d'encadrer le volume cible (V_c), sont représentées en pointillés. L'espacement entre ces bornes est très exagéré sur le schéma. **g** : Le nombre de rayons de chaque houppier est réduit de 32 à 8. Les huit rayons de l'arbre n°3 sont indiqués en pointillés. **h** : les rayons sont de nouveau ajustés pour obtenir exactement le volume cible pour chaque houppier.

d. Description de l'algorithme

Rappelons que nous travaillons dans la représentation des houppiers définie précédemment (issue du modèle tRAYci, voir la **figure 39** au chapitre II). C'est-à-dire que tous les rayons d'un houppier R_i sont situés dans un même plan horizontal à la hauteur H_m de ce houppier. Si n est le nombre de rayons du houppier, son volume est constitué de $2n$ demi secteurs d'ellipsoïdes. Chaque paire de rayons successifs R_i et R_{i+1} délimite les bords communs de deux demi secteurs d'ellipsoïdes de même section accolés verticalement, l'un pour la partie supérieure du houppier et l'autre pour la partie inférieure. Dans le plan horizontal passant par H_m , la section du houppier est donc représentée par n secteurs d'ellipse, chacun étant délimité par deux rayons successifs et formant la base des deux demi secteurs d'ellipsoïde accolés correspondants. De la même façon, pour toute hauteur h , nous pouvons définir une section horizontale de houppier, constituée de n secteurs d'ellipse limités par des rayons parallèles aux rayons du houppier et dont la longueur est obtenue à l'aide de l'équation des arcs elliptiques reliant les extrémités des rayons du houppier à H_t et H_b . Les rayons de houppier à la hauteur h , calculés à partir des rayons de houppiers (R_i , tous situés à la hauteur H_m) seront notés $r_{h,i}$. Si et seulement si $h = H_m$, alors les $r_{h,i}$ sont identiques aux rayons de houppiers R_i .

L'algorithme est décomposé en cinq phases successives (**figure 75**) :

1. La création des houppiers irréductibles.
2. L'expansion des houppiers.
3. Une première correction du volume des houppiers.
4. La réduction du nombre de rayons de houppier.
5. Une seconde correction du volume des houppiers.

Phase 1 : Création des houppiers irréductibles.

Chaque houppier est créé initialement avec 32 rayons de houppiers régulièrement espacés en azimuth (soit un angle entre deux rayons successifs de 12,5 grades). La longueur de chaque rayon est fixée à une valeur R_{min} calculée pour chaque houppier à partir du diamètre à 1,30 m de l'arbre et du paramètre K_r . Le nombre de 32 rayons a été choisi suffisamment grand, de façon à permettre une forte plasticité de la forme du houppier, mais suffisamment faible pour avoir des temps de calcul raisonnables. Il faut noter que lorsque R_{min} est supérieur à R_{eq} (situation rarissime si K_r est raisonnablement faible, comme dans notre cas), le volume cible ne pourra pas être atteint car il est dépassé dès le début. Dans ce cas le houppier final sera isotrope de rayon R_{min} , et ce houppier ne variera plus jusqu'à la phase 4.

A la fin de cette phase, le recouvrement entre houppiers est négligeable, sauf si K_r est exagérément élevé.

Phase 2 : Expansion des houppiers.

Les houppiers sont traités successivement par ordre décroissant de diamètre à 1,30 m de leur tronc (D_{eq} dans le cas des cépées) lors d'une boucle. Pour chacun des houppiers quatre étapes successives sont réalisées.

Étape 2.a : Recherche des voisins

Une liste des houppiers situés à une distance inférieure à $2 \cdot R_{max}$ du houppier considéré est créée : ce sont les voisins du houppier considéré. Seuls ces houppiers seront pris en compte lors de l'expansion du houppier considéré. Parmi les houppiers voisins, certains ont déjà subi leur expansion, d'autre en sont encore au stade de leur houppier irréductible initial. En fait il y a même

une troisième possibilité. Il est possible de définir des houppiers préexistants. Ce sont des houppiers mesurés, mais qu'on ne souhaite pas reconstruire. Ces houppiers ne sont pas traités dans l'algorithme, mais sont pris en compte comme voisin pour les houppiers reconstruits. C'est comme cela que nous avons procédé lorsque nous avons reconstitué les zones tampon II et III, en tenant compte des houppiers mesurés, mais sans les modifier.

Étape 2.b : Détermination des niveaux de hauteur

Une série de niveaux de hauteurs (h) sont définis (**figure 76**). Le niveau central est défini par la hauteur de plus grande largeur de houppier H_m du houppier considéré. Des niveaux de hauteurs successifs, espacés verticalement de dH sont placés, depuis H_m , vers le haut jusqu'à la hauteur totale (H_t) et vers le bas jusqu'à la hauteur de base de houppier (H_b). Ainsi pour chaque niveau de hauteur h , nous avons :

$$h = H_m \pm k \cdot dH, \text{ avec } k \text{ un entier positif.}$$

Il faut noter que les valeurs de h dépendent de H_m , et varient donc en fonction du houppier en cours d'expansion.

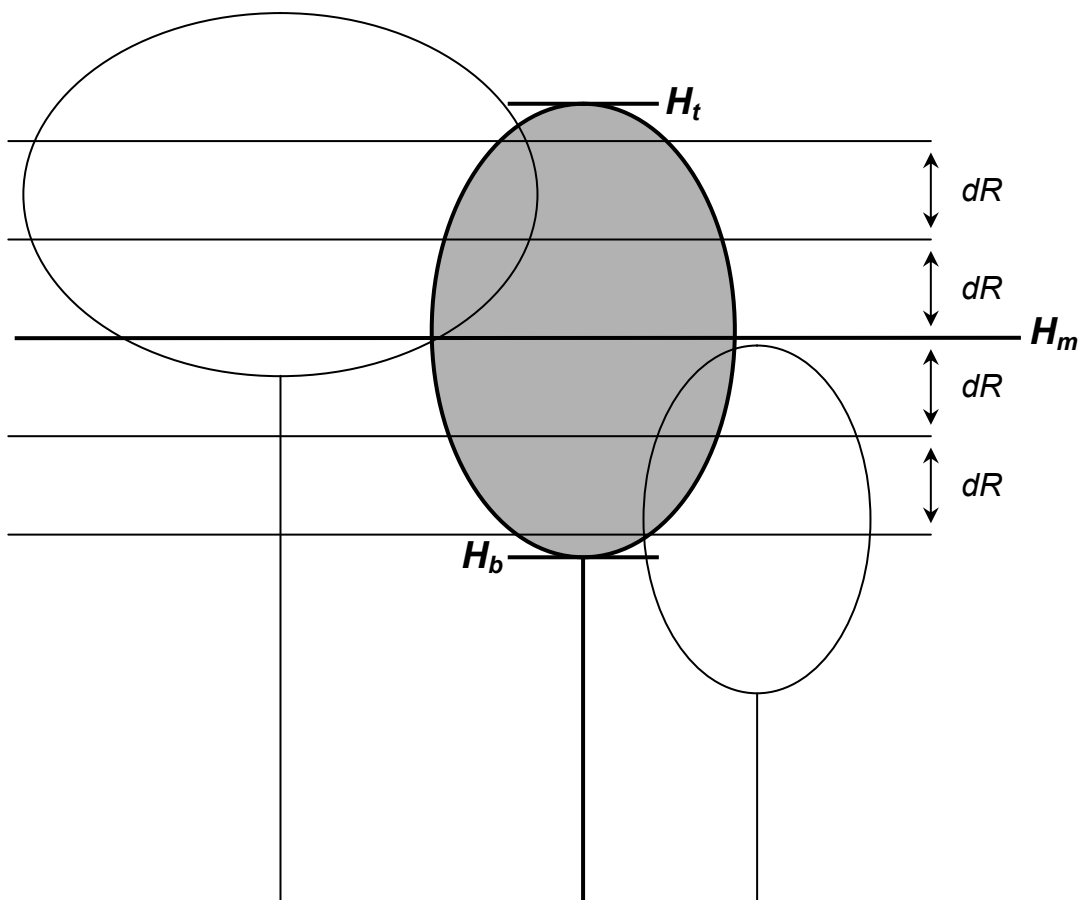


Figure 76 : Détermination des niveaux de hauteur lors de l'expansion d'un houppier (en gris et trait gras). Deux houppiers voisins sont également représentés. Les niveaux sont calculés depuis la hauteur de plus grande largeur de houppier (H_m) de l'arbre considéré, par intervalles successifs de longueur dR , sur la gamme de hauteurs comprise entre la hauteur de base de houppier (H_b) et la hauteur totale (H_t) de cet arbre. Nous remarquons que les niveaux obtenus ne dépendent que des caractéristiques de l'arbre considéré et non des voisins.

Étape 2.c : Calcul des sections de houppier pour les voisins

Pour chaque niveau de hauteur h , et pour chacun des voisins, la section du houppier dans un plan horizontal situé à la hauteur h est calculée. Pour chaque houppier voisin et pour chaque hauteur h une liste des 32 secteurs d'ellipses qui composent cette section est stockée.

Étape 2.d : Expansion du houppier

Au début de cette étape, une liste des rayons expansibles est créée. Elle est initialement constituée de tous les rayons du houppier considéré. Ensuite une boucle, composée de quatre sous-étapes est lancée. Cette boucle continue tant qu'il y a au moins un rayon dans la liste des rayons expansibles et que le volume du houppier considéré est strictement inférieur au volume cible. Dès que l'une de ces conditions n'est plus vérifiée, cette phase prend fin, et la phase 3 débute. Les quatre sous-étapes de chaque itération de la boucle sont les suivantes.

Sous-étape 2.d.i : expansion élémentaire des rayons

Tous les rayons de la liste des rayons expansibles voient leur longueur augmentée de dR . Si, ce faisant un rayon excède R_{max} , ou bien viole la condition d'asymétrie (définie dans la description du paramètre $C_{E,max}$), alors l'accroissement du rayon en question est annulé, et ce rayon est immédiatement retiré de la liste des rayons expansibles.

Sous-étape 2.d.ii : calcul des sections du houppier considéré

Pour chacun des niveaux de hauteur h , la section du houppier considéré dans un plan horizontal situé à la hauteur h est calculée, en utilisant la valeur courante de la longueur des rayons. Notons que la longueur des rayons de la liste des rayons expansibles a augmenté depuis l'itération précédente, alors que celle des autres rayons n'a pas changé. Pour chaque hauteur h la liste des 32 secteurs d'ellipses qui composent la section de houppier correspondante est stockée.

Sous-étape 2.d.iii : calcul des intersections

Pour chaque niveau de hauteur h , les intersections entre d'une part les secteurs d'ellipse du houppier considéré et d'autre part les secteurs d'ellipse de tous les houppiers voisins, sont calculées. Le calcul d'intersection élémentaire est réalisé dans un plan horizontal (à une hauteur h donnée) entre deux secteurs d'ellipses, un pour le houppier considéré, et un pour un des houppiers voisins. Un calcul élémentaire est réalisé pour chaque combinaison d'un secteur d'ellipse du houppier considéré et d'un secteur d'ellipse d'un des houppiers voisins.

Nous réalisons donc une approximation de l'intersection en trois dimensions de volumes de houppiers par des intersections en deux dimensions de sections de houppiers dans des plans régulièrement espacés de dH . Plus dH est faible, plus l'approximation est juste, mais plus le nombre d'intersections en deux dimensions augmente, ainsi que le temps de calcul.

Lorsqu'une intersection est rencontrée pour un niveau de hauteur h , le secteur d'ellipse impliqué pour le houppier en cours d'expansion est considéré. Ce secteur d'ellipse est défini par deux rayons calculés à la hauteur h , $r_{h,i}$ et $r_{h,i+1}$. Ces rayons calculés correspondent à deux rayons de houppiers R_i et R_{i+1} à la hauteur H_m . Rappelons que ce sont ces derniers rayons qui définissent le contour du houppier et qui sont traités par le présent algorithme. La longueur courante des rayons R_i et R_{i+1} a conduit à l'intersection du secteur d'ellipse considéré. Pour chacun de ces deux rayons, s'il fait partie de la liste des rayons expansibles, alors son dernier accroissement est annulé et il est retiré de la liste. Il se peut que l'un des rayons n'ait pas été augmenté à cette itération, et que l'intersection

n'ait été provoquée que par l'accroissement de l'autre. Dans ce cas il reste inchangé, étant donné que l'annulation de l'accroissement de l'autre rayon suffit à éviter l'intersection.

Dans de rares cas il se peut qu'un rayon ayant sa longueur initiale (R_{min}) conduise déjà à des intersections. Dans ce cas on néglige l'intersection, et le rayon reste inchangé mais est retiré de la liste des rayons expansibles.

Sous-étape 2.d.iv : test des conditions de sortie de la boucle

Si la liste des rayons expansibles est vide, c'est que l'accroissement en longueur de n'importe lequel des rayons du houppier considéré provoquerait une intersection avec un houppier voisin. La boucle est alors arrêtée, puisque le houppier a atteint l'extension maximale à laquelle il peut prétendre sans avoir d'intersection avec les houppiers voisins. Il se peut (et c'est même probable) que le volume cible ne soit pas atteint.

Si le volume cible a été dépassé (ou atteint exactement), il n'est plus nécessaire de poursuivre l'expansion, même s'il reste de la place : la boucle est arrêtée également.

A la fin de la phase 2, il n'y a pas de recouvrement entre les houppiers, en dehors de ceux éventuellement présents dès la phase 1 (normalement négligeables). Le grand nombre de rayons (32) utilisé permet une grande souplesse de la forme des houppiers, autorisant une adaptation fine du houppier à l'espace libre dont il dispose. Il faut tout de même noter que cette « liberté » d'extension anisotrope est conditionnée par la condition d'asymétrie. Plus $C_{E,max}$ est grand, plus l'adaptabilité du houppier est grande.

Phase 3 : Première correction du volume des houppiers.

Au début de cette phase, tous les houppiers à reconstruire ont subi leur phase d'expansion. Nous pouvons les classer en deux catégories :

- Ceux qui n'ont pas atteint leur volume cible. Ce sont les houppiers pour lesquels plus aucun rayon ne pouvait être augmenté sans provoquer d'intersection.
- Ceux qui ont atteint exactement ou bien dépassé leur volume cible.

Cette phase a pour objectif de donner à chaque houppier exactement son volume cible. Elle est composée des trois étapes suivantes.

Étape 3.a : Franchissement du volume cible

Cette étape a pour but que tous les houppiers aient un volume supérieur ou égal au volume cible. Elle ne concerne que les houppiers qui n'ont pas atteint leur volume cible en phase 2.

Une nouvelle boucle est lancée où chacun des houppiers concernés subit une augmentation égale pour tous ces rayons à chaque itération, de valeur dR . La boucle s'arrête dès que le volume cible est atteint exactement ou dépassé.

Cependant, si lors d'une itération l'augmentation devrait conduire pour un rayon donné au dépassement de R_{max} , l'augmentation n'a alors pas lieu, et le rayon concerné n'est plus augmenté. Notons que si R_{max} est choisi trop faible, il se peut qu'un houppier n'atteigne pas son volume cible. Tous ses rayons seront dans ce cas égaux à R_{max} . Ce cas théorique ne devrait normalement pas se produire, puisque R_{max} est censé avoir une valeur nettement supérieure au plus grand rayon rencontré.

Étape 3.b : Encadrement du volume cible

Au début de cette étape, tous les houppiers ont un volume supérieur ou égal à leur volume cible. De plus le franchissement du volume cible (dans le cas d'un volume qui lui est strictement supérieur) a eu lieu à la dernière itération de la boucle de l'étape 2.d ou à celle de la boucle de l'étape 3.a.

Dans le cas où le volume cible est exactement atteint, nous passons directement à la phase 4. Sinon le volume courant est défini comme borne supérieure d'un intervalle contenant le volume cible. A cette borne supérieure, correspondent les longueurs de rayons actuelles.

La borne inférieure pour le volume est ensuite déterminée. Pour cela chaque rayon est réduit de dR . Dans le cas où cette réduction conduirait pour un rayon donné à une longueur inférieure à R_{min} (voir artificiellement négatif si $R_{min} < dR$), la réduction n'a pas lieu pour le rayon concerné (cas particulier). Après cette réduction, nous obtenons obligatoirement un volume inférieur au volume cible, qui constitue la borne inférieure. A cette borne inférieure correspondent des longueurs de rayons plus faibles que celles qu'ils ont pour la borne supérieure. L'écart entre les deux bornes pour chaque rayon est de dR dans le cas général. Pour le cas particulier considéré, les rayons correspondant au cas évoqué plus haut ont une même longueur R_{min} pour les deux bornes.

Étape 3.c : Ajustement dichotomique du volume

A l'étape précédente, le volume cible a été encadré par deux états du houppier :

- Une borne supérieure avec un volume V_{sup} supérieur au volume cible V_c , et des longueurs de houppiers $L_{sup,i}$.
- Une borne inférieure avec un volume V_{inf} inférieur au volume cible V_c , et des longueurs de houppiers $L_{inf,i}$.

Pour certains rayons R_j (cas le moins fréquent) : $L_{sup,j} = L_{inf,j} = R_{min}$. Ces rayons resteront de longueur constante dans cette étape.

Pour tous les autres rayons R_i (cas général) : $L_{sup,i} = L_{inf,i} + dR$. Pour chaque houppier, ces rayons sont ajustés lors d'une boucle dichotomique (divisant l'intervalle par deux à chaque itération), jusqu'à ce que leurs longueurs respectives permettent d'obtenir le volume cible V_c pour le houppier considéré.

A chaque itération de la boucle dichotomique :

- Le houppier est dans l'état de l'une des deux bornes (inférieure lors de la première itération).
- La longueur élémentaire d'ajustement est divisée par deux : $dR = \frac{dR}{2}$.
- Un état intermédiaire est calculé en ajustant les rayons R_i de la nouvelle longueur dR , dans le « bon » sens : $+dR$ si l'état actuel est la celui de la borne inférieure, $-dR$ sinon.
- Le volume intermédiaire V_m est calculé, correspondant aux longueurs de rayon $L_{m,i}$.
- Il y a alors trois cas possibles :
 - Si $V_m > V_c$, alors nous modifions l'intervalle de façon à ce que désormais $V_{sup} = V_m$ et $L_{sup,i} = L_{m,i}$ (pour tout i), V_{inf} et les $L_{inf,i}$ restant inchangés.
 - Si $V_m < V_c$, alors nous modifions l'intervalle de façon à ce que désormais $V_{inf} = V_m$ et $L_{inf,i} = L_{m,i}$ (pour tout i), V_{sup} et les $L_{sup,i}$ restant inchangés.

- Si $V_m = V_c$ alors la boucle s'arrête et les rayons R_i ont des longueurs $L_{m,i}$ à la fin de la phase 3. Du point de vue mathématique cette condition peut se produire au bout d'un nombre d'itérations infini. Cependant du point de vue informatique, les nombres sont représentés avec une précision donnée et par conséquent cette condition d'arrêt est toujours atteinte. En fait la méthode dichotomique permet de converger avec un nombre d'itérations relativement faible. Du point de vue purement mathématique, pour assurer la convergence en un nombre fini d'itérations, il faudrait définir une précision p . Dans ce cas la condition d'arrêt serait $V_m = V_c \pm p$.

A la fin de la phase 3, tous les houppiers ont atteint leur volume cible (sauf cas limites où tous les rayons sont égaux à R_{min} ou R_{max}). Cependant la forme obtenue lors de la phase 2 a été conservée, et l'ajustement de la phase 3 étant réalisé de façon homogène sur tous les rayons, il tend à répartir les recouvrements entre houppiers, induits par l'ajustement du volume, dans toutes les directions. A la fin de cette phase le recouvrement entre houppiers est possible, mais il a été minimisé (pour la représentation et le nombre de rayons choisis) par un évitement réciproque des houppiers (phase 2).

Phase 4 : Réduction du nombre de rayons de houppier.

Le but de cette phase est de passer de la représentation à 32 rayons systématiques, à une représentation utilisable dans tRAYci : 8 rayons (pas forcément également répartis), séparés deux à deux d'un angle toujours inférieur ou égal à 90 degrés.

Pour chaque houppier une boucle est lancée. Chaque itération est constituée des deux étapes suivantes.

Étape 4.a : calcul de l'influence de la suppression de chaque rayon

Pour chaque rayon R_i (tous les rayons sont considérés quelle que soit leur longueur), sont calculés :

- L'angle α_i qui séparerait les rayons R_{i-1} et R_{i+1} si le rayon R_i était supprimé.
- La variation absolue Δ_i du volume de houppier qu'entraînerait la suppression de R_i .

Étape 4.b : suppression du rayon le moins utile

Le rayon, qui vérifie $\alpha_i \leq 90^\circ$ et pour lequel la valeur de Δ_i est minimale, est supprimé. Ainsi nous supprimons le rayon dont l'absence modifie le moins le volume du houppier, sans que sa suppression n'entraîne un angle excessif entre deux rayons successifs.

En tout, à la fin de la boucle, nous avons supprimé 24 rayons de houppier, de façon à ce qu'il n'en reste plus que 8 parmi les 32 d'origine. L'idéal aurait été de calculer le volume obtenu pour toutes les combinaisons de huit rayons valides possibles, et de garder la meilleure. Cependant cela aurait conduit à des temps de calcul considérables pour un résultat très peu différent.

A la fin de la phase 4, tous les houppiers ont une représentation utilisable dans tRAYci. Cependant cette conversion peut avoir (mais pas obligatoirement) pour effet de modifier la forme et donc le volume du houppier.

Phase 5 : Seconde correction du volume des houppiers.

Cette phase permet de réajuster les houppiers pour qu'ils atteignent à nouveau leur volume cible. Elle fonctionne de la même façon que la phase 3, mais l'ajustement en volume est en général beaucoup plus limité.

La démarche utilisée est strictement identique à celle utilisée dans l'étape 3, à une exception près. En effet dans ce cas, le volume du houppier peut être inférieur ou supérieur au volume cible. Il faut donc commencer par déterminer à quelle borne nous nous situons (inférieur ou supérieure). De plus un unique ajustement (de valeur dR) de la longueur des rayons ne garantit pas d'obtenir la borne complémentaire (même si c'est en général suffisant). Il faut donc réaliser des ajustements élémentaires successifs, jusqu'à franchir le volume cible et obtenir la seconde borne (respectivement supérieure ou inférieure).

A la fin de l'algorithme, nous avons donc des houppiers reconstruits compatibles avec le modèle tRAYci, qui ont un volume égal à leur volume cible (sauf les cas limites), et dont la forme potentiellement anisotrope tend à minimiser les recouvrement effectifs entre houppiers.

3. Choix du centre de houppier

Comme nous l'avons vu, l'algorithme se base sur une extension centrifuge plus ou moins importante des différents rayons d'un houppier. Le choix du centre de houppier a donc une importance cruciale dans la reconstruction des houppiers et dans leur capacité à occuper l'espace disponible.

Or plusieurs centres différents peuvent être envisagés pour le houppier reconstruit. Le plus logique est de prendre le centre du houppier que nous avons mesuré sur le terrain. En effet, ce centre a été défini comme le point au sol situé à la verticale du point de convergence des branches structurantes du houppier. Ce point correspond en théorie pour l'arbre, au point de croissance centrifuge du houppier. Il permet donc d'avoir un mode de reconstruction cohérent avec la croissance réelle du houppier. L'inconvénient est qu'il faut le mesurer sur le terrain, ce qui réduit un peu l'intérêt de l'algorithme dont l'objectif est de s'affranchir des mesures sur le houppier. Cela dit même en mesurant cette donnée, nous évitons tout de même la mesure des rayons de houppier, qui est une opération lourde.

Dans une démarche simplificatrice, une autre possibilité est d'utiliser le centre du tronc comme centre de reconstruction des houppiers. Dans ce cas nous n'avons pas besoin de mesurer le centre de houppier sur le terrain. Mais dans le cas d'arbres où les centres du houppier et du tronc sont relativement éloignés, il faut s'attendre à une moins grande efficacité de l'algorithme de reconstruction. Lorsque le centre du tronc sera choisi, pour les cépées nous utiliserons le barycentre des différents brins.

4. Évaluation de l'algorithme du point de vue géométrique

Nous allons ici analyser la géométrie des houppiers obtenus avec l'algorithme de reconstruction par minimisation des recouvrements. Rappelons que son objectif est d'obtenir des houppiers qui se partagent l'espace de façon réaliste à l'échelle du couvert, mais pas forcément au niveau de l'arbre individuel.

Pour cette évaluation nous avons utilisé un peuplement où les houppiers ont été reconstruits en utilisant l'algorithme présenté. Nous avons utilisé la placette de simulation décrite au chapitre II, partie D.2., en ce qui concerne la position, le diamètre et l'essence des arbres. Les houppier des zones tampon II et III y ont été reconstitués en utilisant les relations établies au chapitre III (comme précédemment). Par contre pour les arbres mesurés (zones d'étude et tampon I), nous avons utilisé les valeurs mesurées pour la hauteur totale, la hauteur de bas de houppier et le rayon équivalent (et

par conséquent le volume cible du houppier). Nous nommerons cette version la **version reconstruite anisotrope de base**. Pour ce paragraphe où c'est la seule version utilisée, nous parlerons simplement de version reconstruite. Nous avons fait ce choix afin d'évaluer l'algorithme en lui-même. Ainsi nous pouvons comparer, pour les houppiers mesurés, la représentation utilisant les rayons mesurés à celle utilisant les rayons reconstruits, toutes choses égales par ailleurs.

a. Analyse des critères de forme à l'échelle du peuplement

Nous avons calculé les mêmes critères géométriques qu'au chapitre III (partie D), pour les mêmes houppiers, de la même façon. Les **figures 77, 78, 79 et 80**, présentent ces critères pour les houppiers reconstruits exactement sous la même forme que les **figures 68, 70, 71, 72** du chapitre III, respectivement. Nous n'allons pas faire ici une analyse détaillée de ces critères dans la version reconstruite. Nous nous concentrerons plutôt sur la comparaison des versions mesurée et reconstruite.

Pour le coefficient de variation (cv) de la longueur des rayons (32 rayons systématiques), la longueur de déplacement relative (L_D) et le coefficient d'irrégularité (C_I), nous constatons des distributions globalement proches pour les versions mesurées et reconstruites. Cependant dans le cas de la version reconstruite, la variabilité est plus importante. Ainsi les valeurs minimales et maximales atteintes sont plus extrêmes que pour la version mesurée. De plus les différences entre essences semblent moins marquées dans la version reconstruite. En particulier, pour les hêtres de faible diamètre, la variabilité et les valeurs maximales atteintes pour les trois critères sont très clairement supérieures dans la version reconstruite. Cela est logique du fait que l'algorithme ne différencie par les espèces, alors que l'analyse conduite au chapitre III avait clairement montré un comportement atypique pour ces arbres. De plus nous constatons que, pour les trois critères, les valeurs minimales théoriques (zéro pour cv et L_D , un pour C_I) sont représentées. Cela correspond à des houppiers parfaitement isotropes dans la version reconstruite (sans compétition, ou bien ayant leur rayon minimal), alors qu'il est quasiment impossible de trouver dans la réalité un houppier dont tous les rayons mesurés soient exactement égaux. D'ailleurs ces points minimaux ont une influence forte sur le placement de la médiane et des quartiles. Cependant nous constatons tout de même que la diminution de cv , L_D et C_I quand le diamètre augmente est conservée par la version reconstruite.

Ces trois critères semblent donc indiquer que l'algorithme permet d'obtenir une distribution de forme relativement proche de la version mesurée. Cependant, il permet probablement un peu trop de souplesse aux houppiers ce qui aboutit à des valeurs plus extrêmes pour les critères. De même, la forme spontanément isotrope des houppiers reconstruits si aucun obstacle n'est rencontré, semble peu réaliste. Enfin il serait peut-être utile de pouvoir tenir compte dans l'algorithme des différences entre essences.

Le critère d'extension maximale du houppier (C_E) a une place un peu particulière puisqu'il est utilisé comme paramètre de contrôle dans l'algorithme (fixé à 2 dans notre cas). Ainsi il est logique de ne pas trouver de houppiers reconstruits ayant une valeur pour ce critère supérieur à 2. Nous remarquons un très léger dépassement de cette valeur pour de rares arbres, ce qui est dû aux ajustements des rayons pour obtenir le volume cible (phases 3 et 5 de l'algorithme). En dehors de ces particularités la comparaison des versions mesurée et reconstruite pour ce critère conduit aux mêmes conclusions que pour les trois autres.

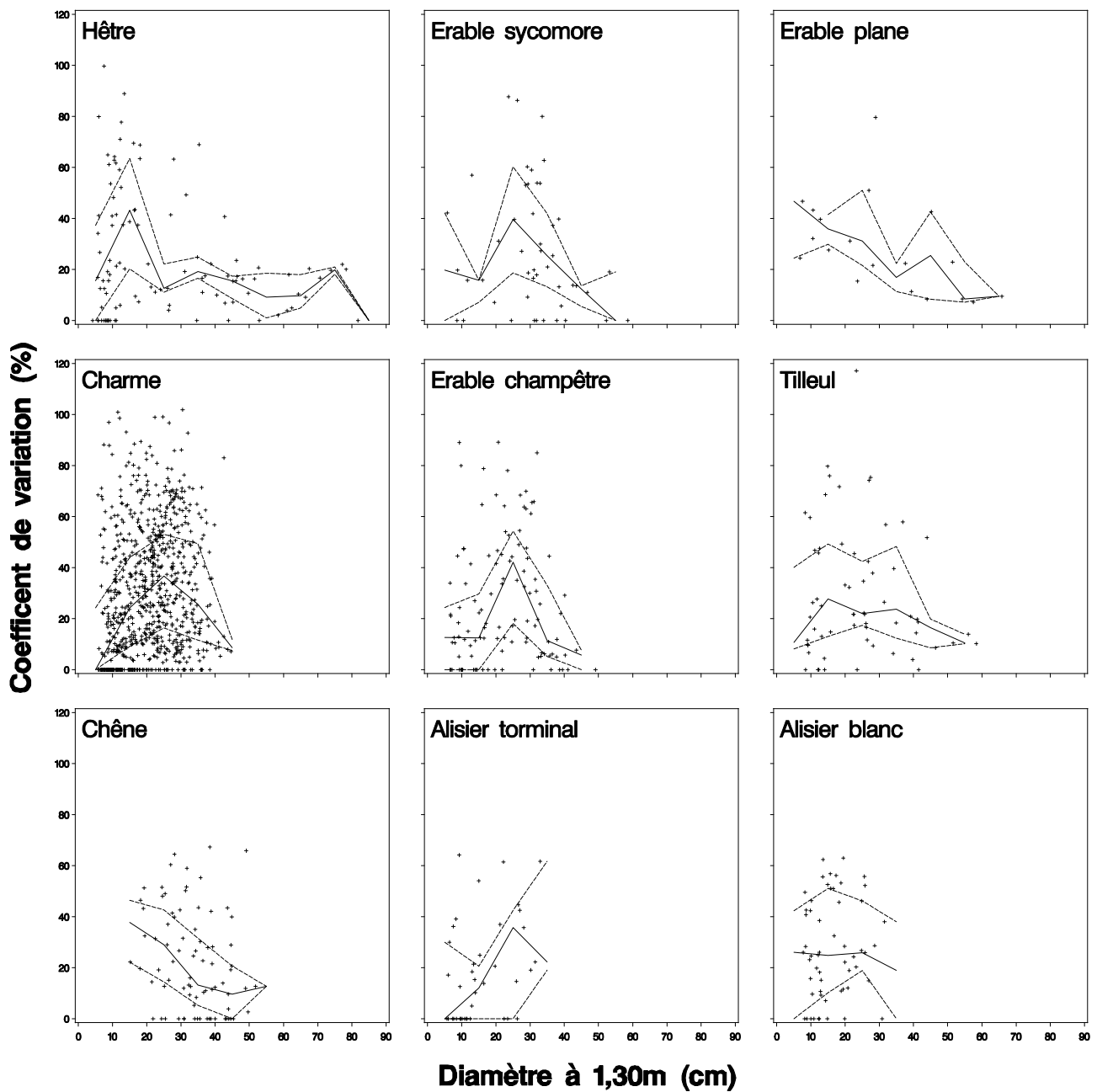


Figure 77 : Coefficient de variation de la longueur des rayons d'un houppier (en %) en fonction du diamètre à 1,30 m (D_{eq} en cm), pour la version reconstruite anisotrope de base du peuplement. La ligne continue relie les valeurs médianes du coefficient de variation, pour chaque classe de diamètre. Les lignes pointillées relient les premier (en bas) et troisième (en haut) quartiles pour ces mêmes classes.

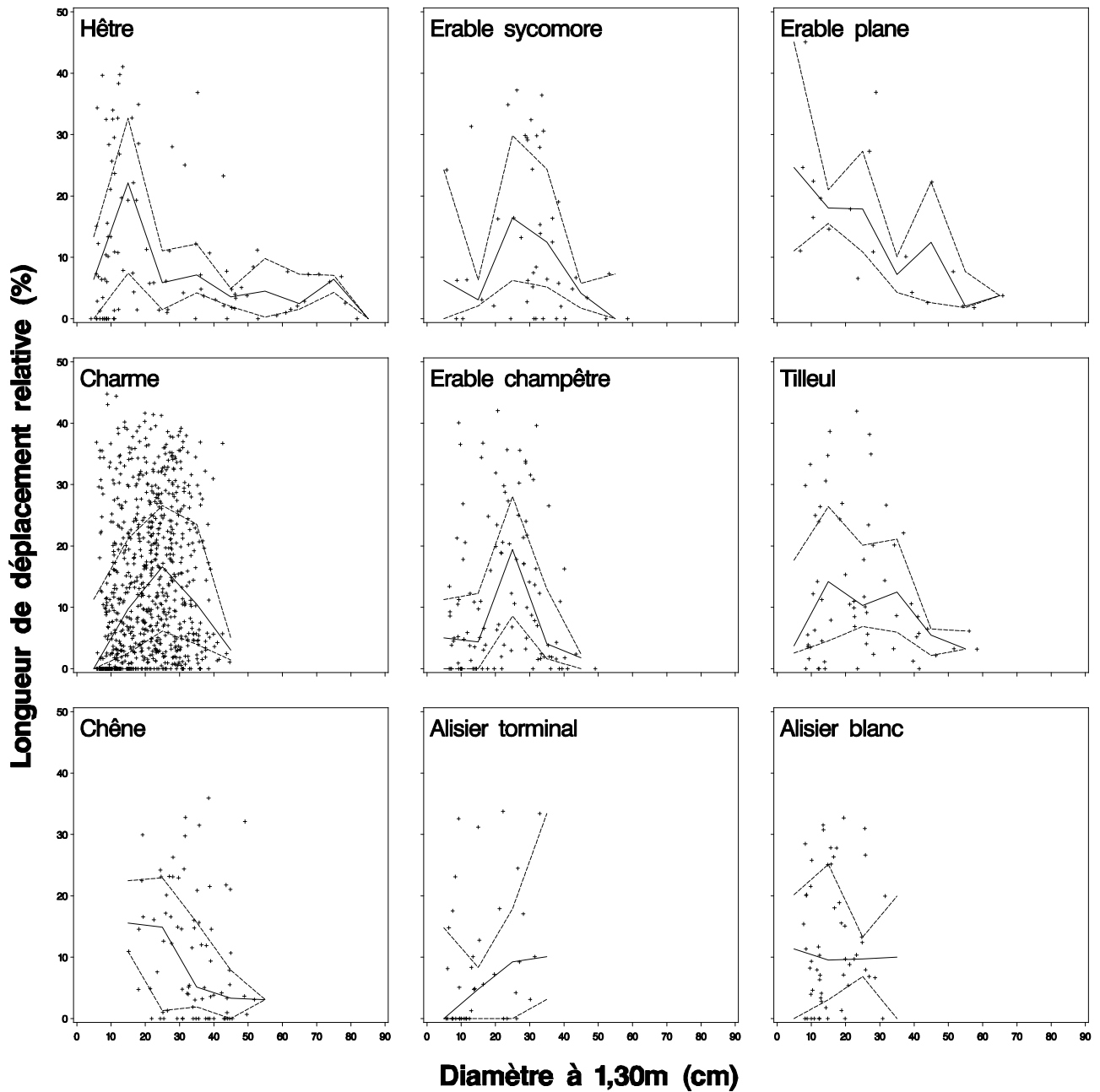


Figure 78 : Longueur de déplacement du houppier (en m) en fonction du diamètre à 1,30 m (D_{eq} en cm), pour la version reconstruite anisotrope de base du peuplement. La ligne continue relie les valeurs médianes de la longueur de déplacement, pour chaque classe de diamètre. Les lignes pointillées relient les premier (en bas) et troisième (en haut) quartiles pour ces mêmes classes.

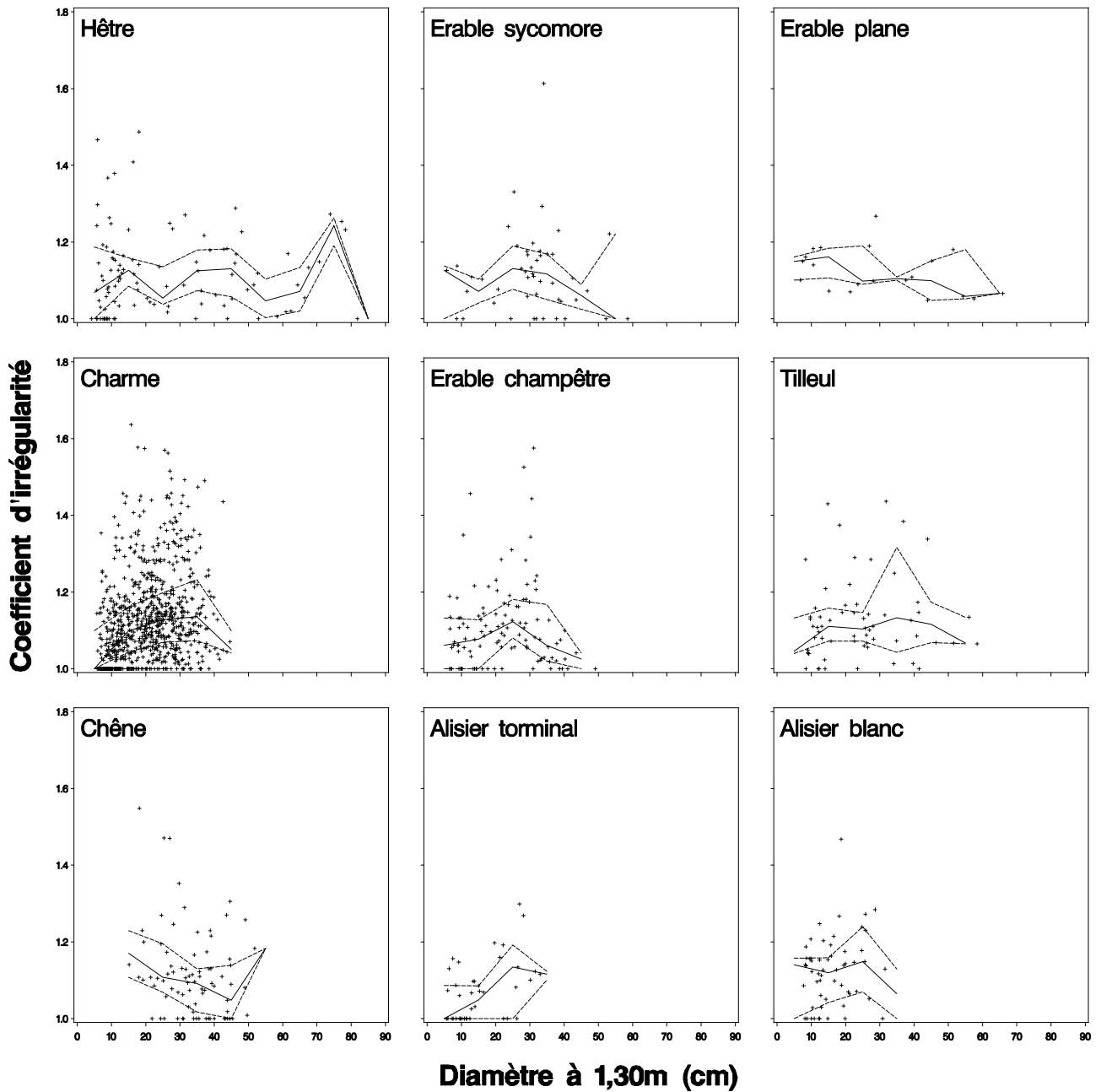


Figure 79 : Coefficient d'irrégularité en fonction du diamètre à 1,30 m (D_{eq} en cm), pour la version reconstruite anisotrope de base du peuplement. La ligne continue relie les valeurs médianes du coefficient d'irrégularité, pour chaque classe de diamètre. Les lignes pointillées relient les premier (en bas) et troisième (en haut) quartiles pour ces mêmes classes.

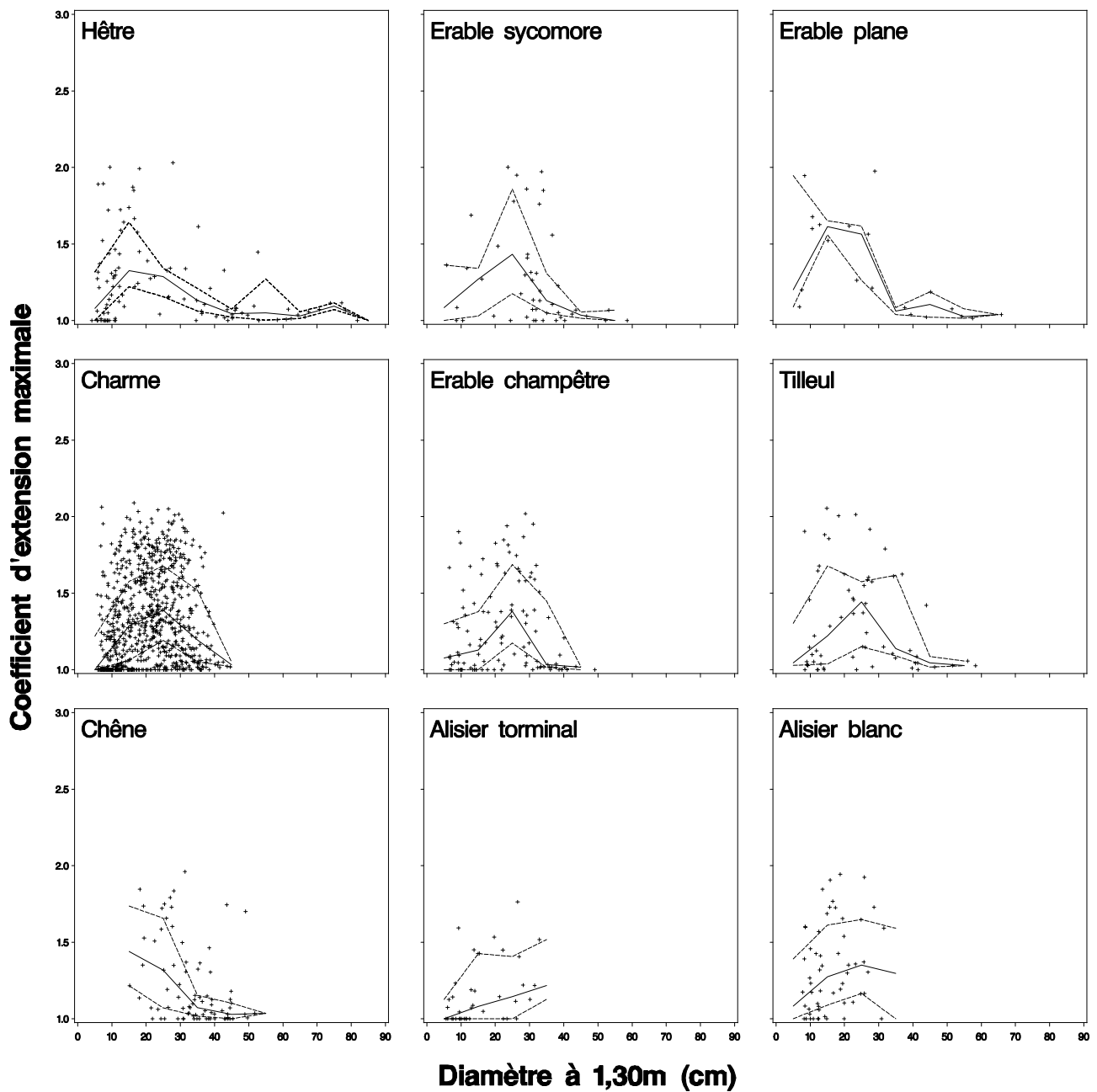


Figure 80 : Coefficient d'extension maximale en fonction du diamètre à 1,30 m (D_{eq} en cm), pour la version reconstruite anisotrope de base du peuplement. La ligne continue relie les valeurs médianes du coefficient d'extension maximale, pour chaque classe de diamètre. Les lignes pointillées relient les premier (en bas) et troisième (en haut) quartiles pour ces mêmes classes.

b. Analyse des critères de forme à l'échelle de l'arbre

Si les versions mesurée et reconstruite sont globalement assez semblables en terme de distribution à l'échelle du peuplement, il est intéressant de vérifier si elles concordent à l'échelle de l'arbre. Pour ce faire nous avons comparé la valeur des quatre critères pour chaque arbre dans les deux versions (**figure 81**). Les nuages de points sont très explicites : il n'y a aucune corrélation positive entre les valeurs des critères des versions mesurée et reconstruite. Le coefficient d'irrégularité montre même une tendance inverse : les houppiers les plus irréguliers dans la version reconstruite font partie des houppiers les moins irréguliers dans la version mesurée. Ainsi si la variabilité de forme des houppiers est globalement bien obtenue (et même dépassée) à l'échelle du peuplement, l'algorithme ne permet pas d'estimer la forme précise d'un arbre donné. Il semble donc qu'en cas de compétition entre arbres, l'algorithme ne soit pas en mesure de déterminer quel(s) houppier(s) adapte(nt) sa(leur) forme(s) à celle des autres. Ainsi le critère de dominance utilisé – le diamètre à 1,30 m – semble insuffisant pour obtenir une bonne représentation à l'échelle de l'arbre.

C. Comparaison des approches isotrope et anisotrope

1. Démarche

Nous avons présenté les deux approches proposées. Aucune des deux ne permet d'obtenir une estimation précise de la forme des houppiers à l'échelle de l'arbre. Cependant notre objectif est que la reconstruction des houppiers conduise à une représentation réaliste à l'échelle du couvert qui permette d'obtenir des simulations de l'éclairement relatif non biaisées à l'aide du modèle tRAYci en l'alimentant avec des houppiers reconstruits. Nous allons donc dans cette partie comparer les peuplements reconstruits par les deux approches sur deux critères d'importance croissante pour notre objectif :

1. Le recouvrement entre houppiers à l'échelle du couvert.
2. Les simulations de l'éclairement relatif sous couvert.

Pour ce faire nous allons utiliser différentes versions reconstruites du peuplement. Dans tous les cas nous utiliserons la même placette de simulation que précédemment (décrite au chapitre II, partie D.2.) en ce qui concerne la position, l'essence et le diamètre à 1,30 m des troncs. Les différentes versions du peuplement utilisées ne diffèrent que par la méthode de reconstruction des houppiers employée.

La **version mesurée**, qui nous servira de référence, est identique à celle utilisée jusqu'à présent (en particulier pour la calibration du paramètre *LAD* au chapitre II, ou l'évaluation réalisée dans la partie B.4 de ce chapitre). Les houppiers des zones tampon II et III sont reconstruits en utilisant la méthode anisotrope et les relations établies au chapitre III. Les houppiers mesurés dans les zones d'étude et tampon I sont utilisés.

Les **versions reconstruites de base** sont identiques à la version mesurée, sauf que les rayons de houppiers ont été reconstitués par l'une des deux approches. Nous distinguons la **version reconstruite isotrope de base** et la **version reconstruite anisotrope de base** (déjà utilisée dans la partie B.4 de ce chapitre), selon l'approche utilisée. Ces versions permettent de comparer les deux approches de reconstruction en elles-mêmes, en s'affranchissant des relations établies au chapitre III.

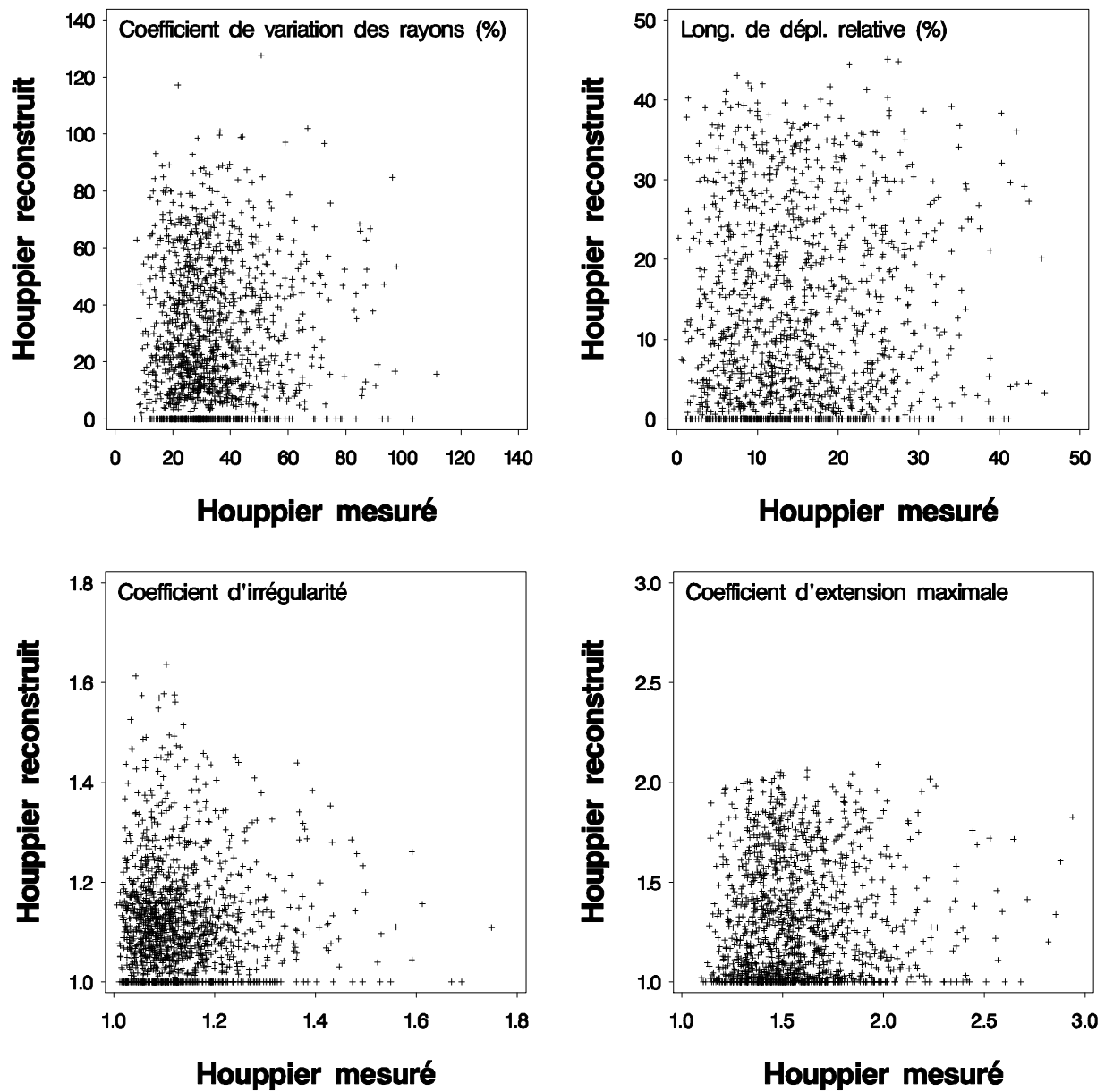


Figure 81 : Relation pour les quatre critères de forme utilisés entre la valeur du houppier reconstruit et celle du houppier mesuré. La version reconstruite anisotrope de base est utilisée.

Pour toutes les autres versions, les relations établies au chapitre III sont utilisées pour estimer la hauteur totale, la hauteur de base de houppier et le rayon équivalent de chaque houppier. Elles diffèrent selon le centre utilisé pour le houppier reconstruit et l'approche utilisée :

1. Les **versions reconstruites isotrope et anisotrope « houppier »** utilisent le centre de houppier mesuré sur le terrain comme centre de houppier pour la reconstruction. Ces deux versions présentent un premier niveau de simplification de la description des houppiers : la suppression de la mesure des rayons de houppier.
2. Les **versions reconstruites isotrope et anisotrope « tronc »** utilisent le centre du tronc (ou barycentre des troncs dans le cas d'une cépée) comme centre de houppier pour la reconstruction. Ces deux versions présentent un second niveau de simplification de la description des houppiers : la suppression de la localisation du centre de houppier sur le terrain.

2. Comparaison des recouvrements entre houppiers

Pour cette comparaison nous réalisons exactement la même opération que dans la partie B.2 du chapitre III, qui nous permet pour chaque hauteur (tous les mètres) de calculer la proportion de la surface considérée comme étant occupée par aucun, un ou plusieurs houppiers, et donc d'évaluer le recouvrement effectif entre houppiers à une hauteur donnée. Rappelons que la surface considérée est celle des zones tampon I amputées d'une épaisseur périphérique de 10 m, afin de ne prendre en compte que des houppiers mesurés. Dans cette partie nous avons réalisé cette opération pour chacune des versions du peuplement, afin d'évaluer l'influence des différents éléments (hauteurs et rayons équivalent prédits ou non, centre de houppier utilisé, approche isotrope ou anisotrope) sur le recouvrement entre houppiers à l'échelle du peuplement.

Dans un premier temps nous allons comparer la version mesurée aux versions reconstruites isotrope et anisotrope de base, afin de comparer les algorithmes en eux-mêmes. La **figure 82** présente des cartes de surfaces de houppiers (en projection au sol et à 15 m), afin de visualiser le résultat des deux approches par rapport au peuplement mesuré. Sur les cartes l'approche anisotrope apparaît beaucoup plus proche de la version mesurée que ne l'est la version isotrope. En particulier la version isotrope semble conduire à plus de recouvrement mais surtout à beaucoup plus d'espaces où aucun houppier n'est présent. La **figure 83**, qui présente les résultats de l'analyse effectuée pour le recouvrement des houppiers, confirme ce diagnostic. La version isotrope conduit à plus de recouvrements effectifs entre houppiers que la version mesurée (quelques pourcents de la surface à 15 m), et à une plus grande surface où aucun houppier n'est présent (environ 5 % de la surface pour la projection au sol). A l'inverse, la version anisotrope présente légèrement moins de recouvrement que la version mesurée, et également un peu moins de zones où aucun houppier n'est présent. Si l'essentiel des recouvrements de la version mesurée est dû à l'imprécision de la représentation utilisée (comme nous le supposons), l'approche anisotrope semble atténuer légèrement le phénomène, et l'approche isotrope, au contraire l'accentue. Cependant, les écarts entre les trois versions sont relativement faibles en terme de recouvrement. Reste à savoir, désormais, si ces différences évoluent lorsque l'on utilise des valeurs reconstituées pour les hauteurs et le rayon équivalent de houppier, et surtout quelle est leur influence sur la qualité de prédiction de l'éclaircissement relatif.

Nous allons maintenant comparer les versions utilisant les relations établies en fonction du diamètre à 1,30 m au chapitre III pour estimer la hauteur totale, la hauteur de base de houppier et le rayons équivalent de houppier. La **figure 84** présente les cartes de surfaces de houppier (en projection au sol et à 15 m), pour les quatre versions reconstruites : isotrope « houppier », isotrope « tronc », anisotrope « houppier » et anisotrope « tronc ». Les versions isotropes semblent avoir, là encore, plus de recouvrement et laisser plus de zones où aucun houppier n'est présent que les versions

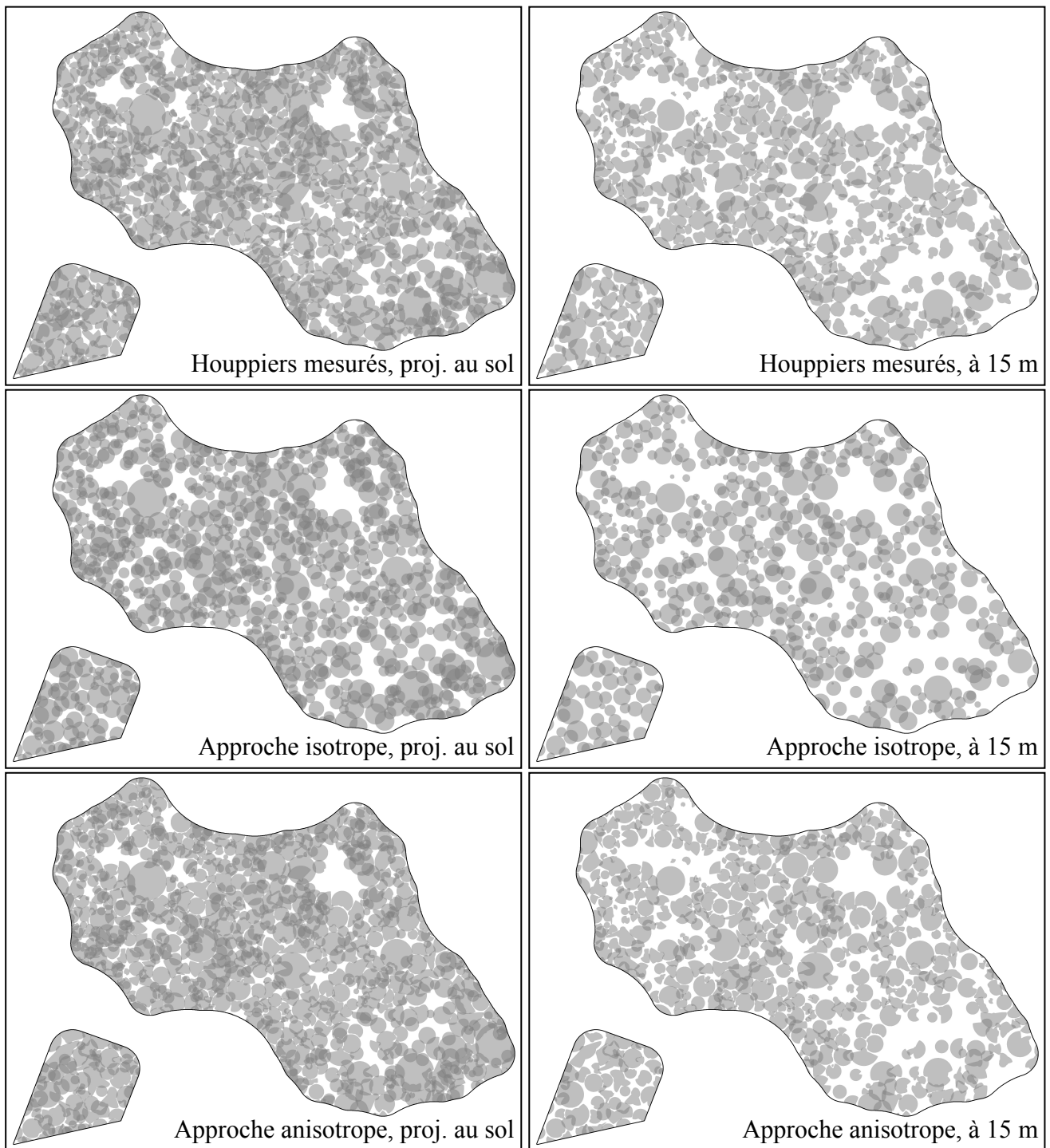


Figure 82 : Carte des projections de houppiers au sol et à 15 m pour la zone utilisée pour les calculs de recouvrement. Trois versions différentes du peuplement sont présentées : la **version mesurée**, la version reconstruite **isotrope de base** et la version reconstruite **anisotrope de base**. Les houppiers ont une transparence de 50 % permettant de visualiser le nombre de houppiers superposés en un point par le niveau de gris résultant (d'autant plus foncé qu'il y a un grand nombre de houppiers superposés). A 15 m, le recouvrement est effectif alors qu'au sol il peut résulter de la stratification verticale des houppiers.

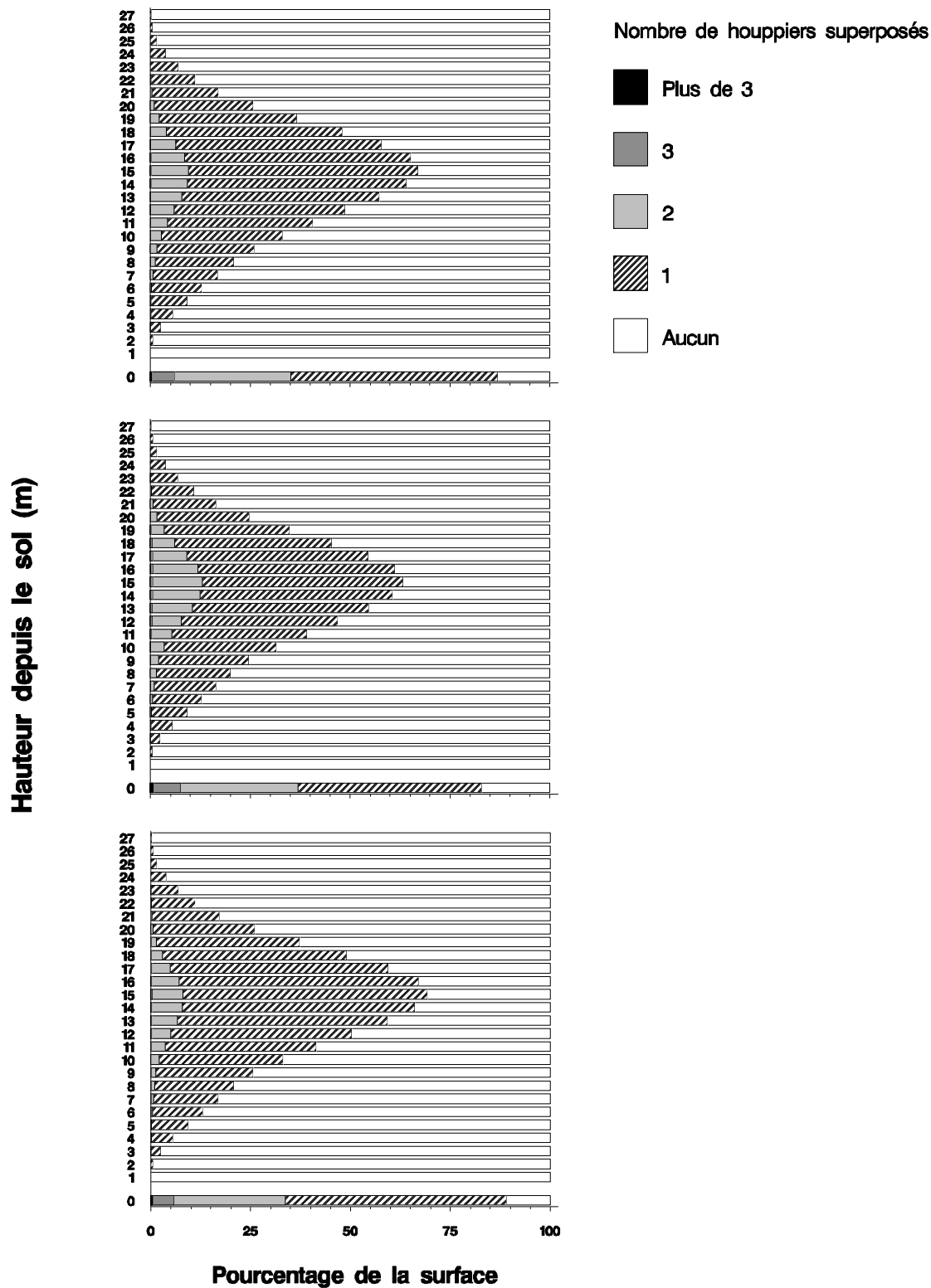


Figure 83 : Recouvrement entre les houppiers pour différentes hauteurs. Pour chaque tranche de hauteur le pourcentage de la surface occupée par 0, 1, 2, 3 ou plus de 3 houppiers est indiqué. La hauteur 0 correspond au recouvrement des projections au sol. Trois versions différentes du peuplement sont présentées : la *version mesurée*, la *version reconstruite isotrope de base* et la *version reconstruite anisotrope de base*.

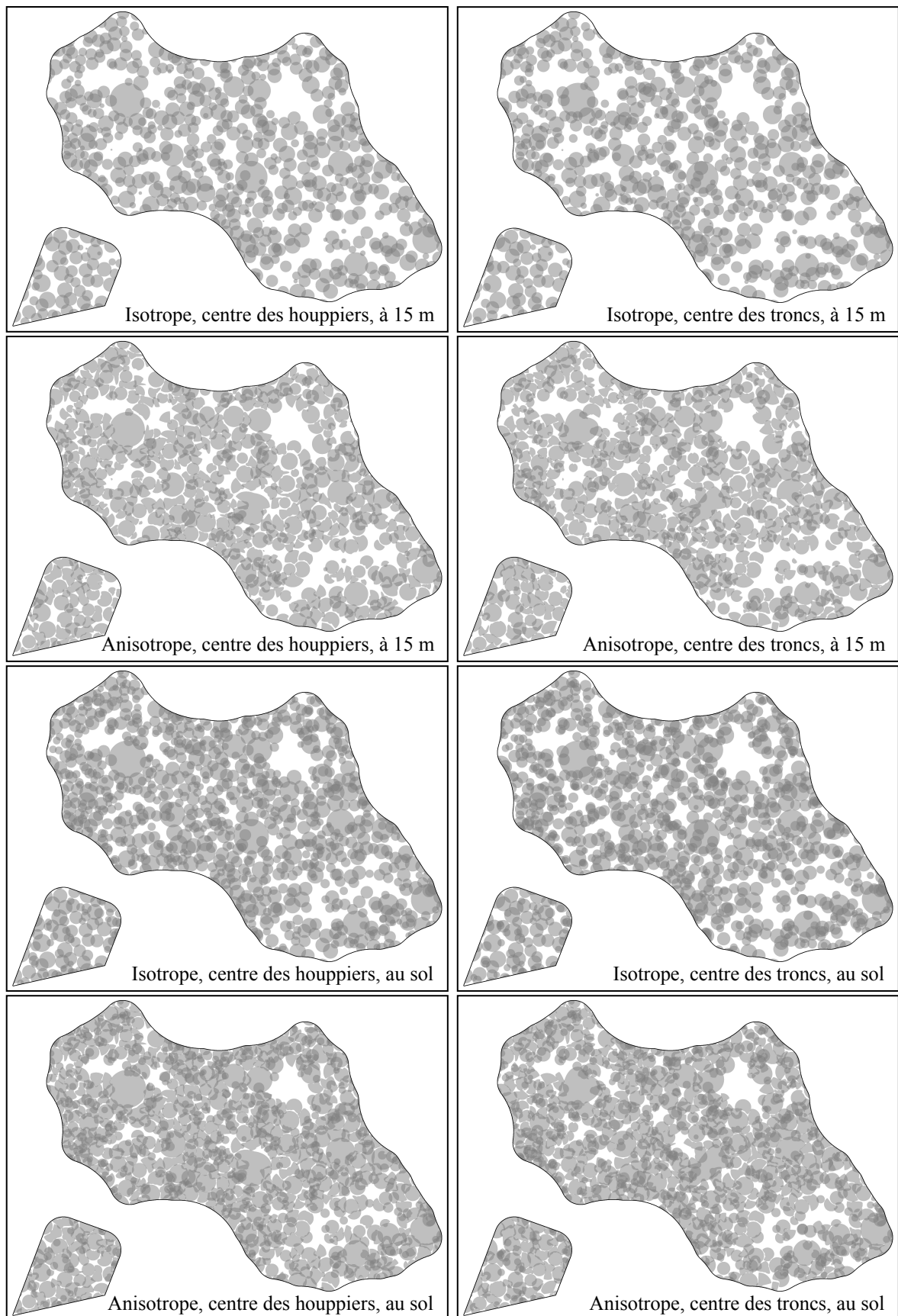
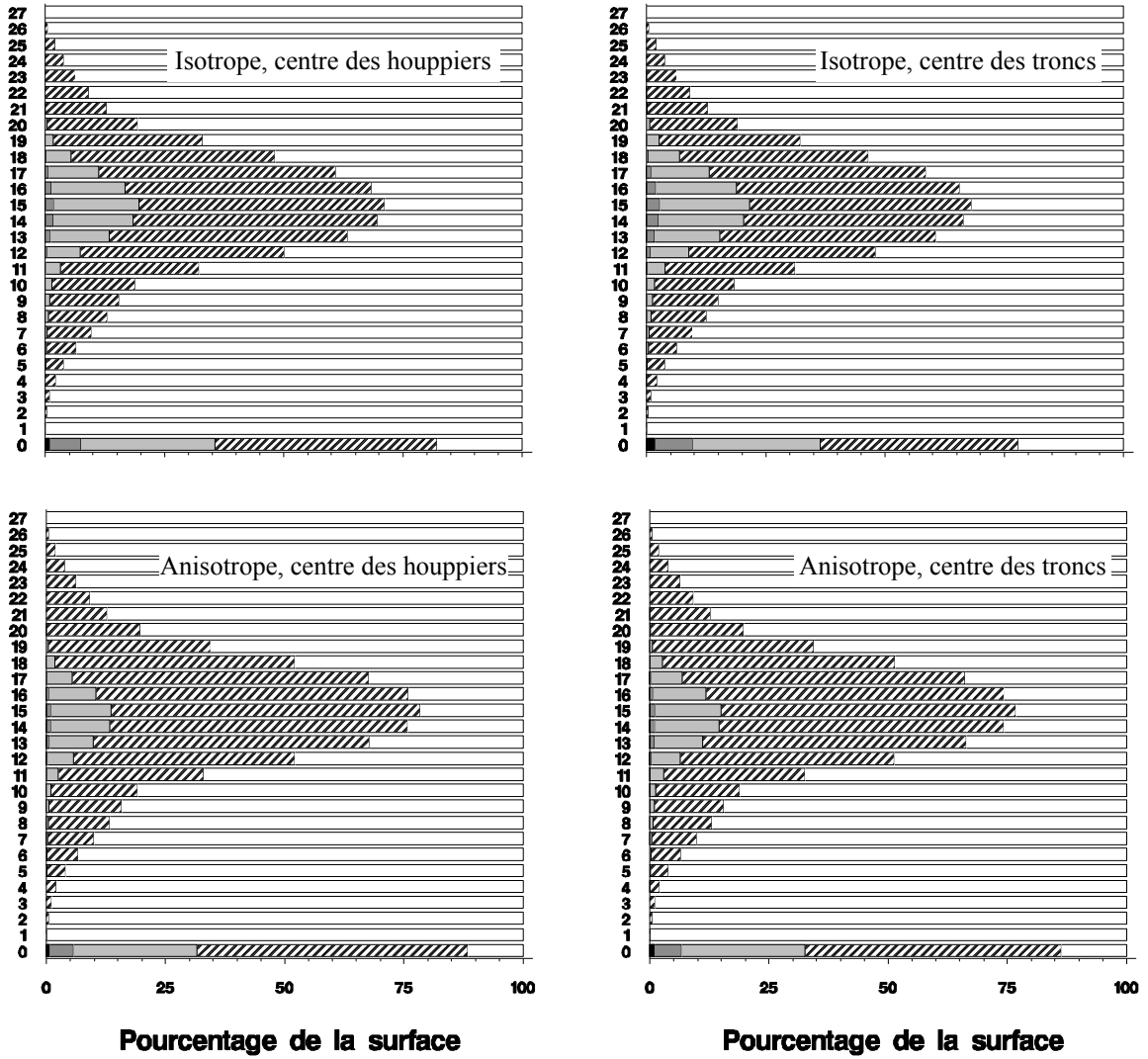


Figure 84 : Carte des projections de houppiers au sol et à 15 m pour la zone utilisée pour les calculs de recouvrement. Quatre versions reconstruites différentes du peuplement sont présentées : les versions **isotropes** « **houppier** » et « **tronc** » et les versions **anisotropes** « **houppier** » et « **tronc** ».

Hauteur depuis le sol (m)



Nombre de houppiers superposés
 ■ Plus de 3 ■ 3 ■ 2 ▨ 1 □ Aucun

Figure 85 : Recouvrement entre les houppiers pour différentes hauteurs. Pour chaque tranche de hauteur, le pourcentage de la surface occupée par 0, 1, 2, 3 ou plus de 3 houppiers est indiqué. La hauteur 0 correspond au recouvrement des projections au sol. Quatre versions reconstruites différentes du peuplement sont présentées : les versions isotropes « houppier » et « tronc » et les versions anisotropes « houppier » et « tronc ».

anisotropes correspondantes. De même les versions « tronc » présentent plus de recouvrement et ménagent plus de zones sans houppier que les versions « houppier ». La **figure 85** confirme ces observations à l'aide des résultats de l'analyse effectuée pour le recouvrement des houppiers, mais donne quelques éléments supplémentaires. Ainsi pour les quatre versions, nous constatons que l'utilisation des relations établies au chapitre III pour les hauteurs et le rayon équivalent de houppier aboutit au regroupement des surfaces de houppiers sur la gamme 11-19 m. Cela est dû au fait que ces relations gomment une grande partie de la variabilité des variables prédites aboutissant à des houppiers plus semblables (pour une espèce donnée). Ainsi des valeurs plus homogènes pour la hauteur totale (H_t) et la longueur de houppier (LH) conduisent à des houppiers moins étendus verticalement. En quelque sorte, l'utilisation des valeurs prédites pour les variables de hauteur ont pour conséquence un peuplement moins stratifié. Ce regroupement des houppiers sur une gamme de hauteur plus restreinte explique le recouvrement plus important entre houppiers reconstruits. Nous constatons que l'utilisation de l'approche anisotrope permet de réduire cet effet par rapport à l'approche isotrope. En fait l'algorithme de reconstruction des houppiers par minimisation du recouvrement compense une partie du groupement vertical en hauteur, par une expansion latérale plus forte des houppiers. D'autre part, l'utilisation du centre de houppier comme point de reconstruction permet également de minimiser le recouvrement par rapport à l'utilisation du centre du tronc. C'est assez logique dans la mesure où l'utilisation du centre du tronc comme centre de houppier conduit à rapprocher des houppiers qui dans la réalité sont plus éloignés (du fait de centres de houppier déportés). Ce rapprochement induit un recouvrement artificiel, cependant minimisé par une approche anisotrope.

Si l'approche anisotrope paraît répondre à son objectif en minimisant les recouvrements entre houppiers, par rapport à une approche isotrope, elle semble encore insuffisante pour complètement éviter les recouvrements artificiels dans les versions reconstruites. Deux facteurs participent à cet effet : d'une part, l'utilisation de relations pour les données de houppier prédites qui provoquent une homogénéisation de variables très hétérogènes et, d'autre part, l'utilisation d'un centre de houppier (celui du tronc) parfois éloigné du centre réel du houppier ce qui rend difficile une reconstruction fidèle des houppiers correspondants.

Reste désormais à voir quelles conséquences ces défauts géométriques à l'échelle des houppiers individuels et du couvert dans son ensemble ont sur la simulation de l'éclairement relatif sous couvert par tRAYci.

3. Comparaison des simulations de l'éclairement relatif sous couvert

Nous avons utilisé les différentes versions reconstruites du peuplement (isotrope « houppier », isotrope « tronc », anisotrope « houppier » et anisotrope « tronc »), dans le modèle tRAYci pour simuler l'éclairement sous couvert. Pour comparer les différentes versions reconstruites entre elles, nous avons adopté deux références distinctes :

- La version mesurée.
- Les capteurs de lumière CBE.

a. Comparaison avec la version mesurée

Pour cette analyse nous avons mis en place une grille de points de simulation, espacés de 2 m, sur l'intégralité des zones d'étude des deux placettes. Tous les points étaient placés à 1 m au dessus du sol. Cela représente un total de 3166 points. Nous avons simulé l'éclairement relatif de tous ces points d'une part avec la version mesurée, et d'autre part avec les quatre versions reconstruites

considérées. Comme période de simulation nous avons choisi la saison de végétation, définie ici du 1^{er} Mai au 31 octobre 2004. Nous avons utilisé la même répartition du rayonnement incident que précédemment (distribution SOC avec $b = 1,23$; $P_{dif} = 48,69$ %). Nous avons désactivé la correction cosinus étant donné qu'il ne s'agissait pas de faire des comparaisons avec des capteurs de lumière.

Les **figures 86** et **87** présentent la comparaison de la version mesurée avec respectivement les versions isotrope et anisotrope. Pour chaque approche, les versions « houppier » et « tronc » sont disposées côte à côte. Pour chaque graphique nous avons individualisé les deux placettes et représenté la droite de régression linéaire obtenue (procédure STAT/REG, *SAS Institute Inc. 2000*) pour l'ensemble du nuage (les deux placettes confondues).

L'approche isotrope conduit dans les deux cas, « houppier » et « tronc », à des simulations clairement biaisées, où l'éclairement relatif est surestimé (**figure 86**). Ce biais est d'autant plus marqué que la valeur de l'éclairement relatif pour la version mesurée est faible. La surestimation est de l'ordre de 5 à 10 % d'éclairement relatif. Dans la version isotrope « houppier », ce biais est plus réduit que dans le cas de la version « tronc ». Cette surestimation est très probablement due à l'augmentation de zones où aucun houppier n'est présent dans la version reconstruite par rapport à la version mesurée. On pourrait croire que l'augmentation concomitante des recouvrements entre houppier pourrait compenser ce phénomène. Mais ce n'est pas le cas, du fait de la nature exponentielle inverse de la loi d'extinction de l'éclairement à travers les houppiers. En effet le fait de densifier un feuillage déjà présent (zones de recouvrement) n'augmente pas de façon importante l'interception du rayonnement. Par contre le fait de remplacer des zones de feuillage représente un fort apport de lumière supplémentaire. Ce biais n'est pas corrigeable *a posteriori*, du fait qu'il est local, et dépend complètement de la répartition relative des houppiers. Par conséquent, l'utilisation de l'approche isotrope conduit à une surestimation non prévisible et localement variable de l'éclairement relatif.

L'approche anisotrope proposée pour surmonter ce problème aboutit à une meilleure simulation de l'éclairement relatif si nous nous référons à la version mesurée (**figure 87**). Ainsi le biais décrit précédemment est à peine présent. Cependant nous constatons en placette 2 une courbure du nuage de points et une légère asymétrie de la variabilité par rapport à l'ajustement pour les faibles valeurs d'éclairement relatif de la version mesurée. Nous remarquerons également une légère surestimation globale de l'éclairement relatif dans les versions reconstruites (décalage de la droite de régression par rapport à la droite identité). Ces défauts suggèrent que le biais est tout de même encore légèrement présent dans les zones où les houppiers sont les plus serrés, c'est-à-dire là où l'algorithme de reconstruction des houppiers par minimisation du recouvrement n'est pas capable d'ajuster complètement les houppiers, et est obligé de recourir au recouvrement entre houppiers. Ce phénomène est amplifié par l'utilisation des relations pour la prédiction des hauteurs et des rayons équivalents des houppiers. Ainsi la réduction de la variabilité des variables considérées réduit l'étagement vertical du volume foliaire. Ce faisant une quantité excessive (par rapport à la réalité) du volume de houppier se retrouve groupée dans une gamme de hauteur limitée. De ce fait, l'algorithme ne dispose pas d'assez d'espace pour obtenir un agencement des houppiers sans recouvrement. Ce problème est encore accentué par l'utilisation du centre des troncs comme centre de houppier, en aboutissant au positionnement de houppier à des endroits où d'autres sont déjà présents. Nous constatons en effet que la simulation obtenue en utilisant les centres de houppiers mesurés sur le terrain est mieux reliée à celle obtenue avec la version mesurée que ne l'est la simulation où les centres de troncs ont été choisis. En dehors du mauvais positionnement global des arbres, l'utilisation du mauvais centre de houppier pose un autre problème. En effet l'algorithme procède par ajustements centripètes successifs. Or si le centre utilisé pour la reconstruction se situe près du bord de l'espace disponible pour l'extension du houppier, la condition d'asymétrie

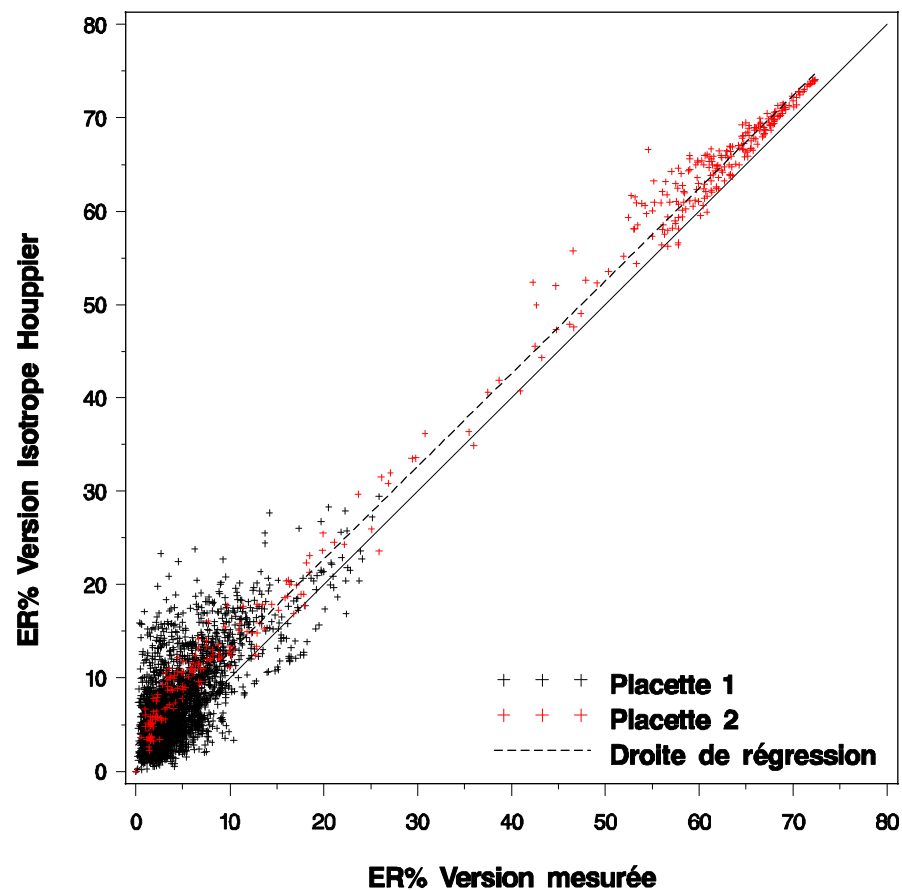
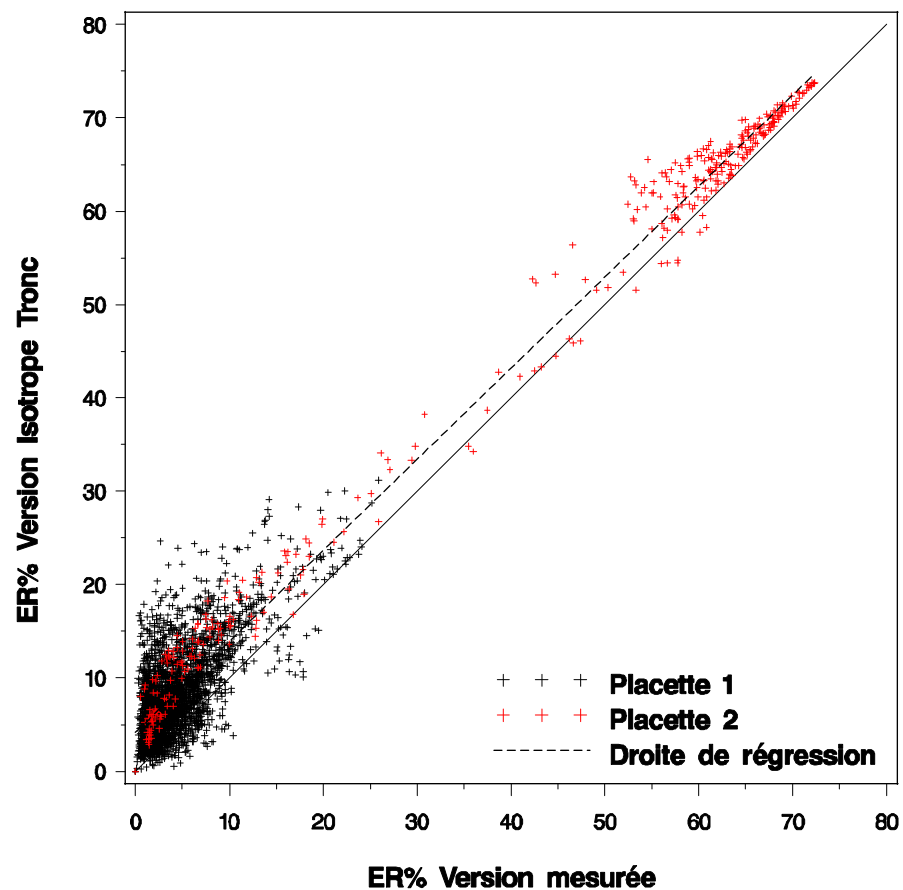


Figure 86 : Comparaison des valeurs d'éclairément relatif simulées par le modèle tRAYci, d'une part avec la **version mesurée** et d'autre part avec les versions reconstruites isotropes « **tronc** » et « **houppier** ». Les simulations sont réalisées sur la période 1^{er} mai – 31 octobre 2004. Une régression linéaire a été établie sur l'ensemble des points (niveau de significativité du modèle $p < 0,0001$ dans les deux cas, R^2 de 0,948 et 0,959 respectivement pour les versions isotropes « **tronc** » et « **houppier** »). La droite identité est représentée en trait continu.

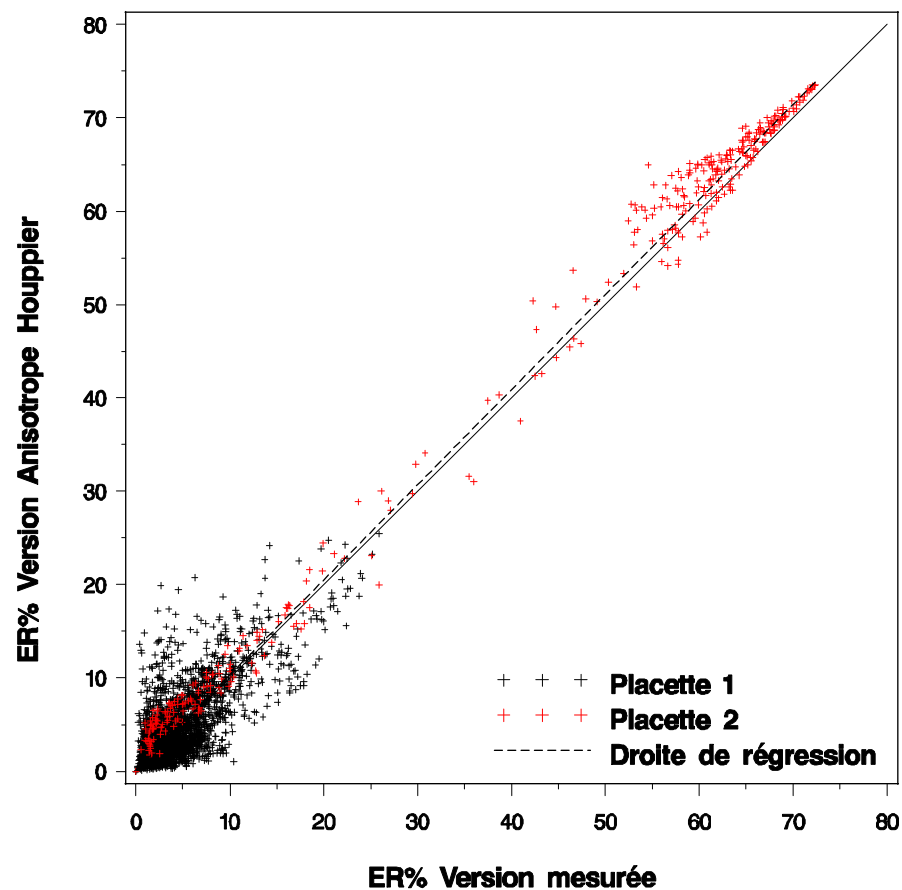
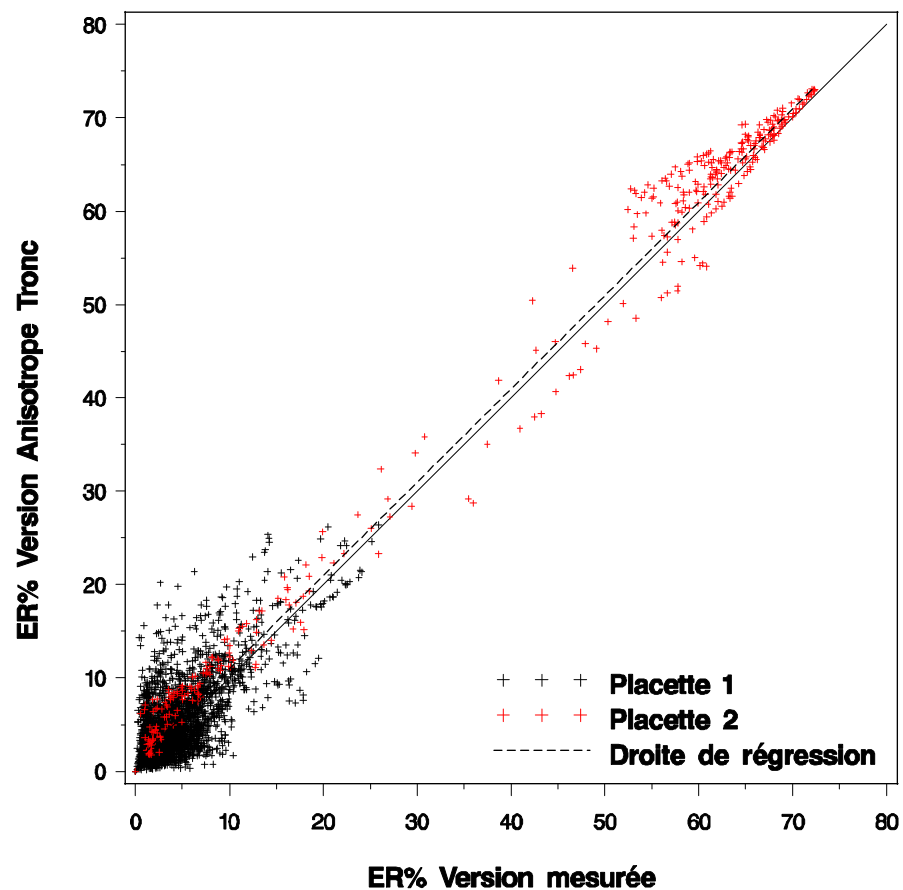


Figure 87 : Comparaison des valeurs d'éclairément relatif simulées par le modèle tRAYci, d'une part avec la **version mesurée** et d'autre part avec les versions reconstruites **anisotropes** « **tronc** » et « **houppier** ». Les simulations sont réalisées sur la période 1^{er} mai – 31 octobre 2004. Une régression linéaire a été établie sur l'ensemble des points (niveau de significativité du modèle $p < 0,0001$ dans les deux cas, R^2 de 0,962 et 0,970 respectivement pour les versions **anisotropes** « **tronc** » et « **houppier** »). La droite identité est représentée en trait continu.

intervient plus tôt que si le centre est situé près du milieu de cet espace. Dans la réalité, il est fréquent qu'un excentrement du centre de houppier par rapport à la base du tronc corresponde à un décalage complet du houppier dans la même direction, sous l'influence d'une forte compétition. Dans ce cas, en utilisant le centre du tronc pour reconstruire le houppier, nous limitons *a priori* les capacités d'excentrement du houppier, du fait de la condition d'asymétrie.

Pour visualiser spatialement les données précédentes nous les avons également représentées sous la forme de cartes d'éclairement. De plus des histogrammes de distribution de la surface par classes d'éclairement relatif, permettent de comparer les simulations à une échelle plus large. La correspondance entre figures et version reconstruites du peuplement est la suivante :

Version	Carte	Histogramme de distribution
Isotrope « Tronc »	Figure 88	Figure 89
Isotrope « Houppier »	Figure 90	Figure 91
Anisotrope « Tronc »	Figure 92	Figure 93
Anisotrope « Houppier »	Figure 94	Figure 95

Ces représentations doivent être comparées à la carte (**figure 47** du chapitre II, partie D.4) et l'histogramme (**figure 48**, *idem*) obtenus avec la version mesurée. Notons que pour chaque histogramme, une courbe (en trait vert continu) indique les valeurs obtenues avec la version mesurée à titre de comparaison.

La comparaison des différentes cartes et histogrammes confirme de façon visuelle l'analyse précédente. En particulier la version anisotrope « houppier » est très proche de la version mesurée, même si localement nous constatons des différences. Du point de vue de la distribution de la surface, les versions isotropes (« houppier » et « tronc ») et dans une nettement moindre mesure la version anisotrope « tronc », modifient assez fortement la forme de l'histogramme de distribution pour les valeurs d'éclairement relatif inférieures à 35 %, par rapport à la version mesurée. La version anisotrope « houppier » est très proche de la version mesurée pour la placette 1. En placette 2, la concordance est bonne sauf pour les classes 0-5 et 5-10 % : une bonne partie de la surface de la classe 0-5 % pour la version mesurée est déplacée dans la classe 5-10 % de la version anisotrope « houppier ». Ce phénomène correspond sans doute à la courbure du nuage de points pour la placette 2 (**figure 87**). Ainsi il semble que la reconstruction des houppiers autour des points concernés soit localement de moins bonne qualité. Mais globalement, à l'échelle du dispositif, la répartition de la surface par classes d'éclairement relatif semble très bonne avec la version anisotrope « houppier ». Il faut signaler également que la version anisotrope « tronc » donne de meilleurs résultats que les versions isotropes.

b. Comparaison avec les capteurs CBE

Pour cette analyse nous avons utilisé les positions des capteurs de lumière. Les capteurs 21, 22 et 23 ont été exclus étant donné qu'ils étaient situés au sein d'un environnement de régénération dense, non pris en compte dans les simulations avec le modèle tRAYci. Nous avons donc 37 points de

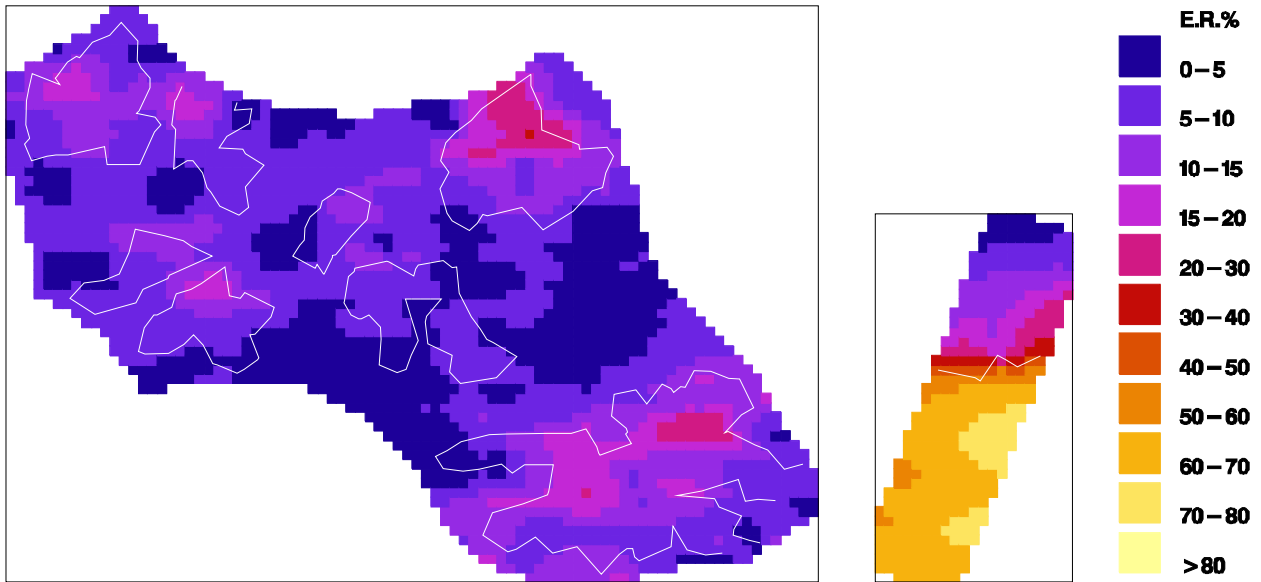


Figure 88 : Carte de répartition de l'éclairage relatif à un mètre de hauteur, sur les zones d'études des placettes 1 (à gauche) et 2 (à droite). Simulation réalisée par le modèle tRAYci, avec la version reconstruite *isotrope* « tronç » du peuplement. Chaque pixel élémentaire de la carte représente la valeur moyenne des points simulés à ses quatre sommets. Le contour des trouées est délimité en trait blanc.

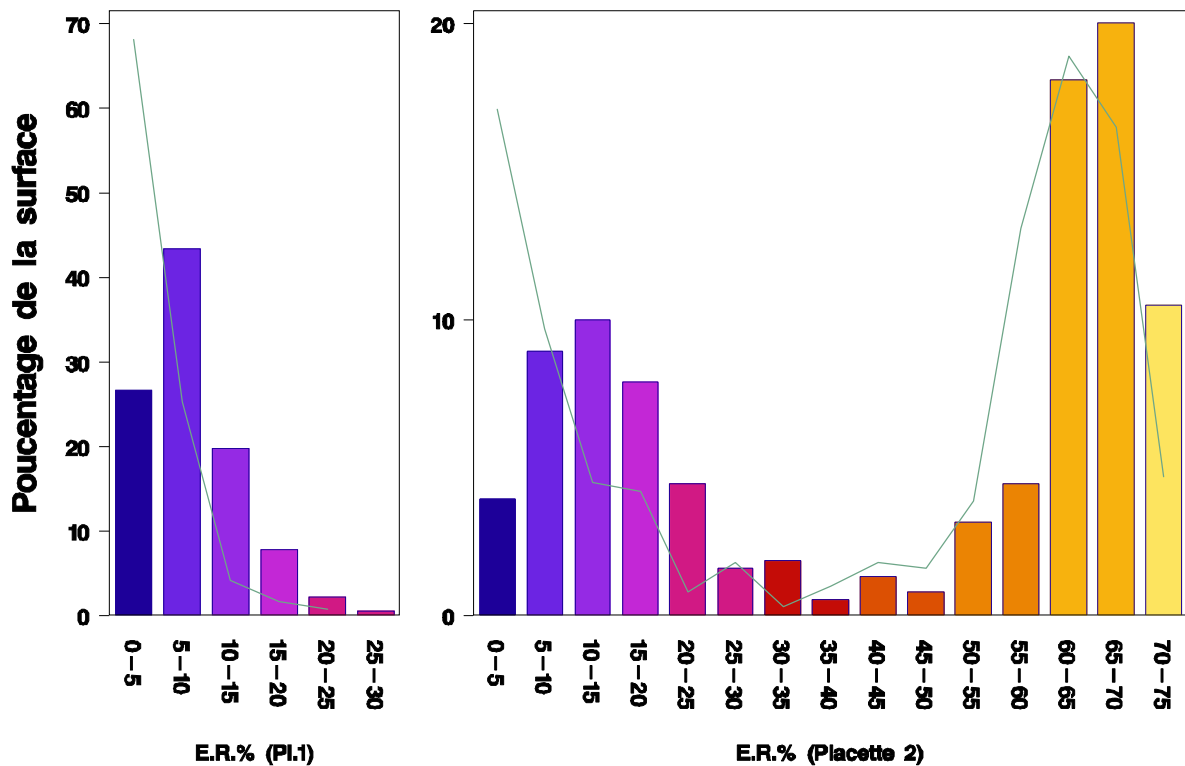


Figure 89 : Distribution de la surface par classes de 5 % d'éclairage relatif, pour les placettes 1 (à gauche) et 2 (à droite). Simulation réalisée par le modèle tRAYci, avec la version reconstruite *isotrope* « tronç » du peuplement. A titre de comparaison les valeurs de la version mesurée sont reliées par un trait vert continu.

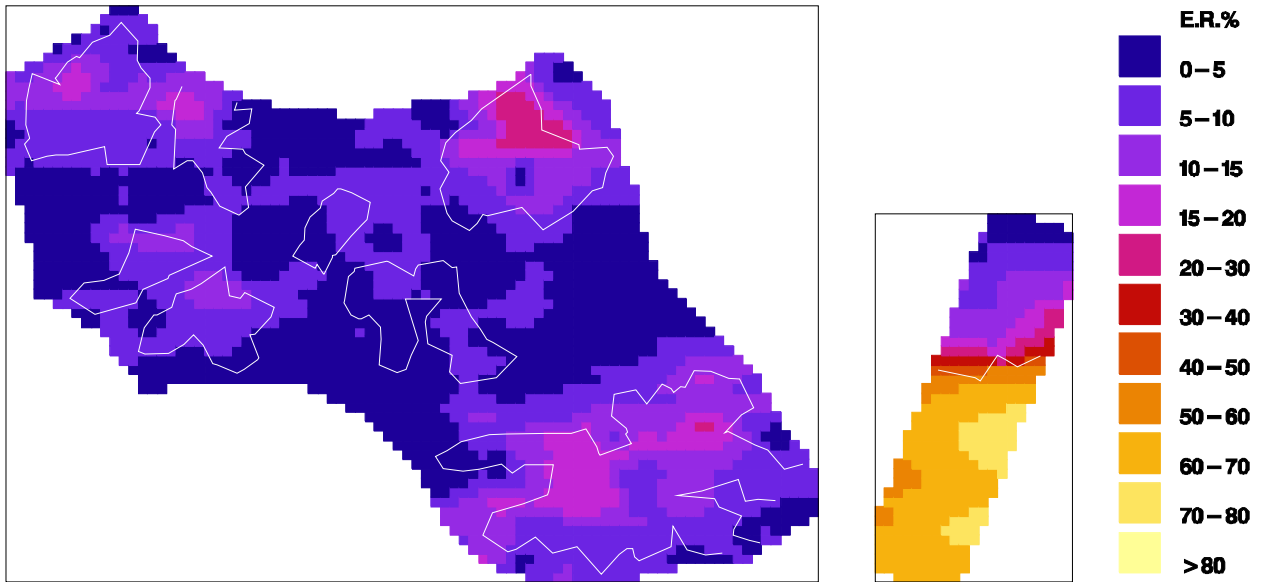


Figure 90 : Carte de répartition de l'éclairage relatif à un mètre de hauteur, sur les zones d'études des placettes 1 (à gauche) et 2 (à droite). Simulation réalisée par le modèle tRAYci, avec la version reconstruite *isotrope* « *houppier* » du peuplement. Chaque pixel élémentaire de la carte représente la valeur moyenne des points simulés à ses quatre sommets. Le contour des trouées est délimité en trait blanc.

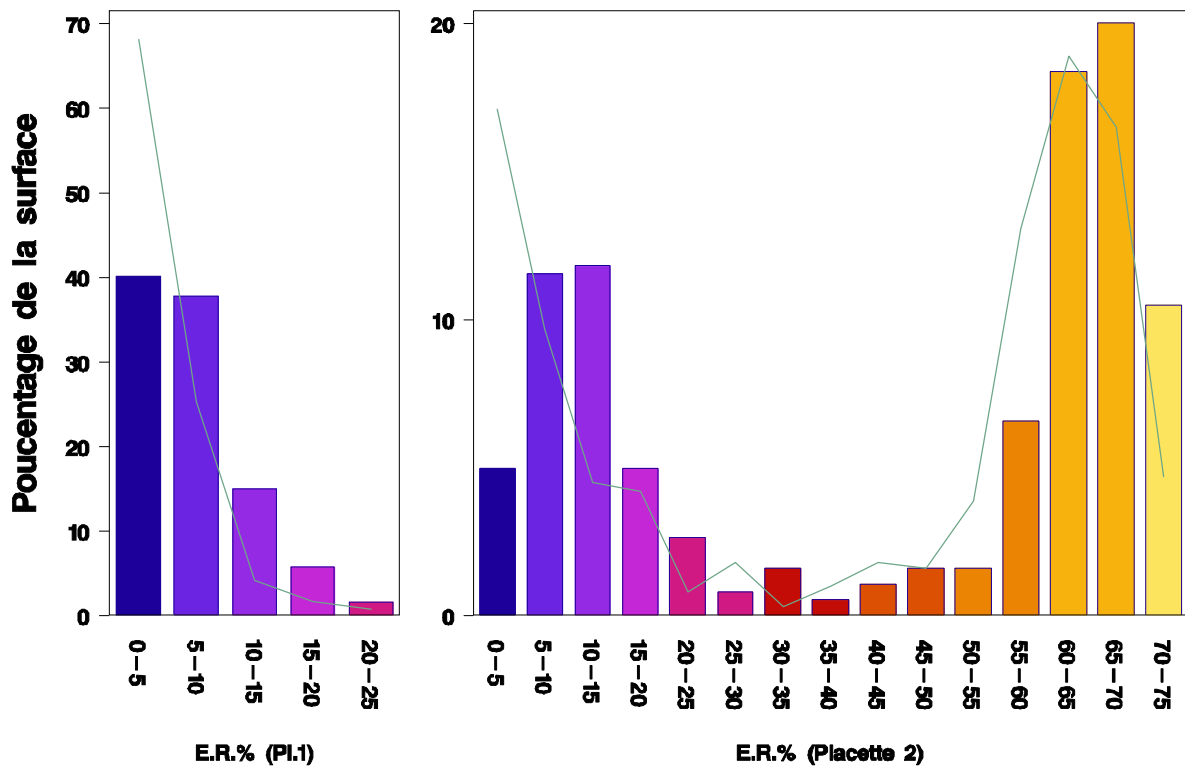


Figure 91 : Distribution de la surface par classes de 5 % d'éclairage relatif, pour les placettes 1 (à gauche) et 2 (à droite). Simulation réalisée par le modèle tRAYci, avec la version reconstruite *isotrope* « *houppier* » du peuplement. A titre de comparaison les valeurs de la version mesurée sont reliées par un trait vert continu.

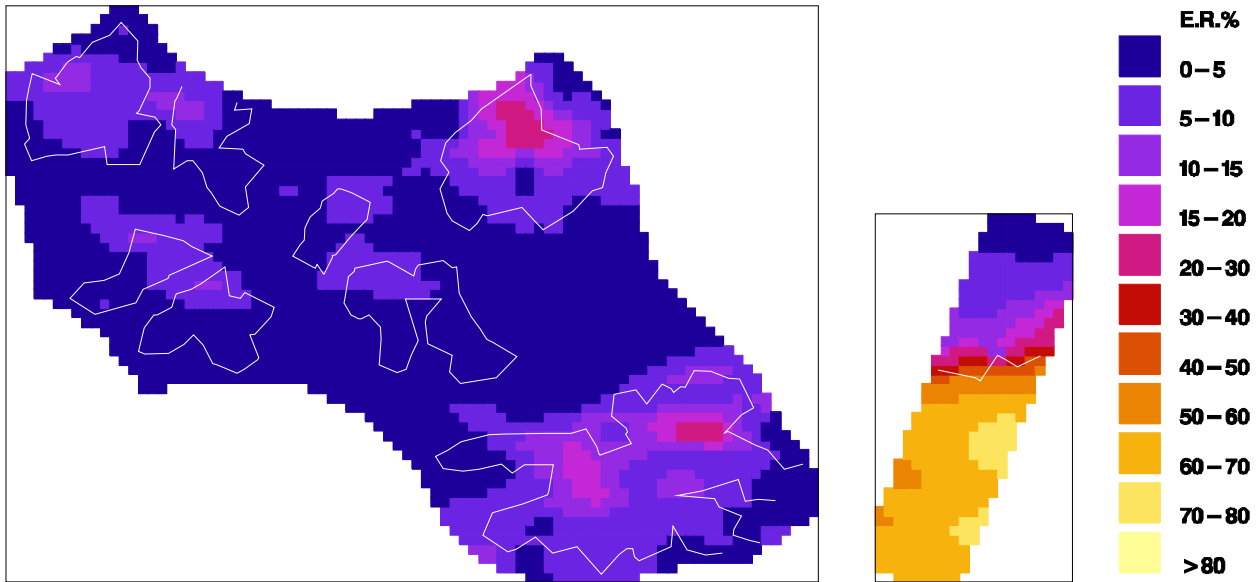


Figure 92 : Carte de répartition de l'éclairage relatif à un mètre de hauteur, sur les zones d'études des placettes 1 (à gauche) et 2 (à droite). Simulation réalisée par le modèle tRAYci, avec la version reconstruite **anisotrope** « **tronc** » du peuplement. Chaque pixel élémentaire de la carte représente la valeur moyenne des points simulés à ses quatre sommets. Le contour des trouées est délimité en trait blanc.

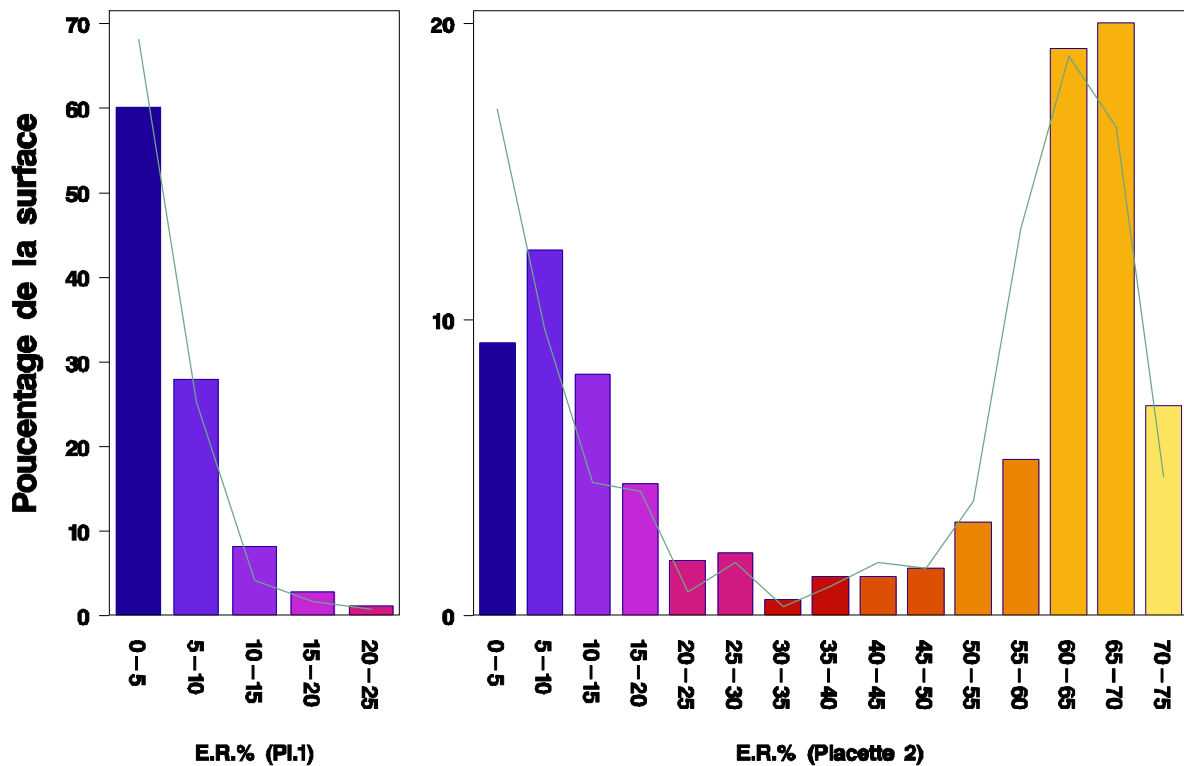


Figure 93 : Distribution de la surface par classes de 5 % d'éclairage relatif, pour les placettes 1 (à gauche) et 2 (à droite). Simulation réalisée par le modèle tRAYci, avec la version reconstruite **anisotrope** « **tronc** » du peuplement. A titre de comparaison les valeurs de la version mesurée sont reliées par un trait vert continu.

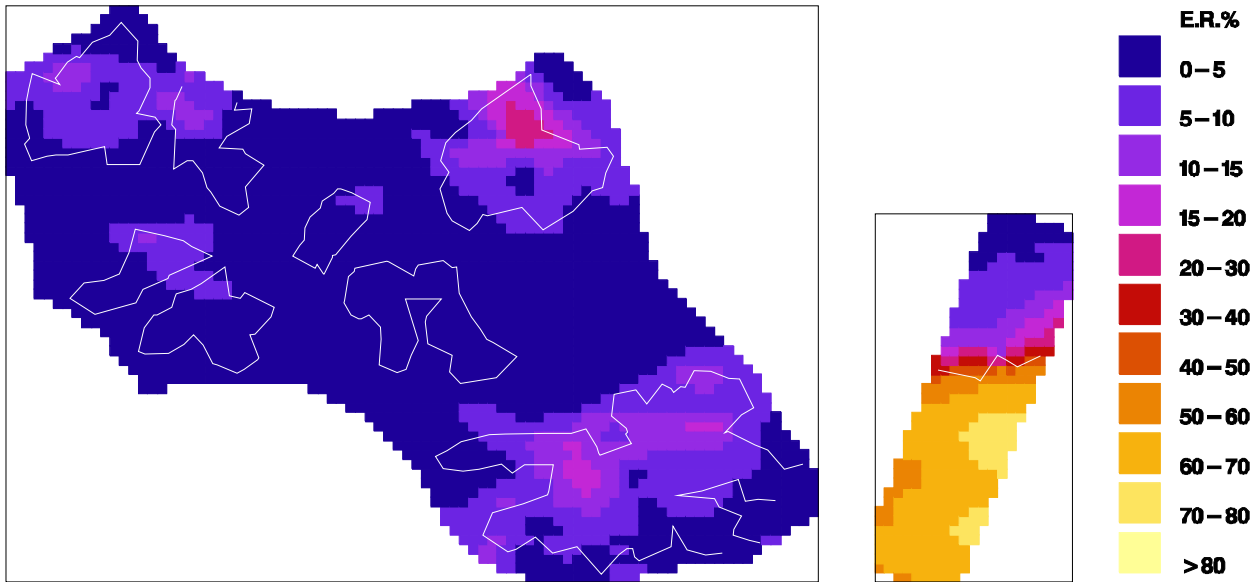


Figure 94 : Carte de répartition de l'éclairage relatif à un mètre de hauteur, sur les zones d'études des placettes 1 (à gauche) et 2 (à droite). Simulation réalisée par le modèle tRAYci, avec la version reconstruite **anisotrope** « **houppier** » du peuplement. Chaque pixel élémentaire de la carte représente la valeur moyenne des points simulés à ses quatre sommets. Le contour des trouées est délimité en trait blanc.

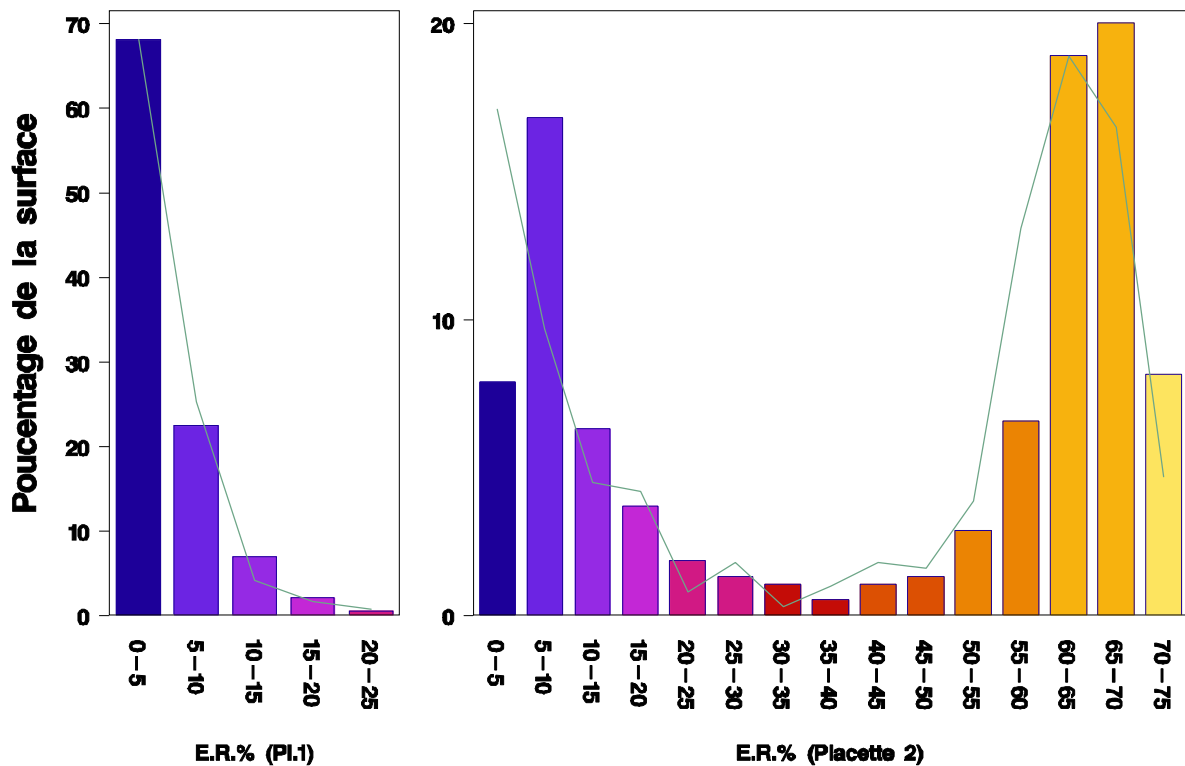


Figure 95 : Distribution de la surface par classes de 5 % d'éclairage relatif, pour les placettes 1 (à gauche) et 2 (à droite). Simulation réalisée par le modèle tRAYci, avec la version reconstruite **anisotrope** « **houppier** » du peuplement. A titre de comparaison les valeurs de la version mesurée sont reliées par un trait vert continu.

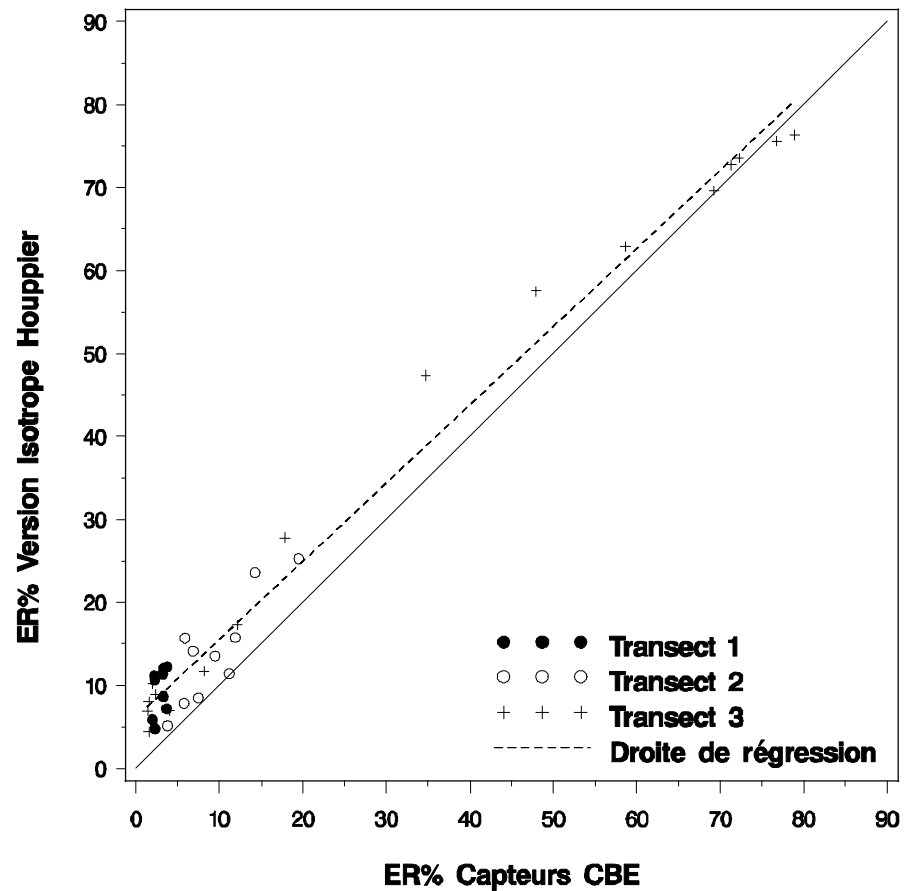
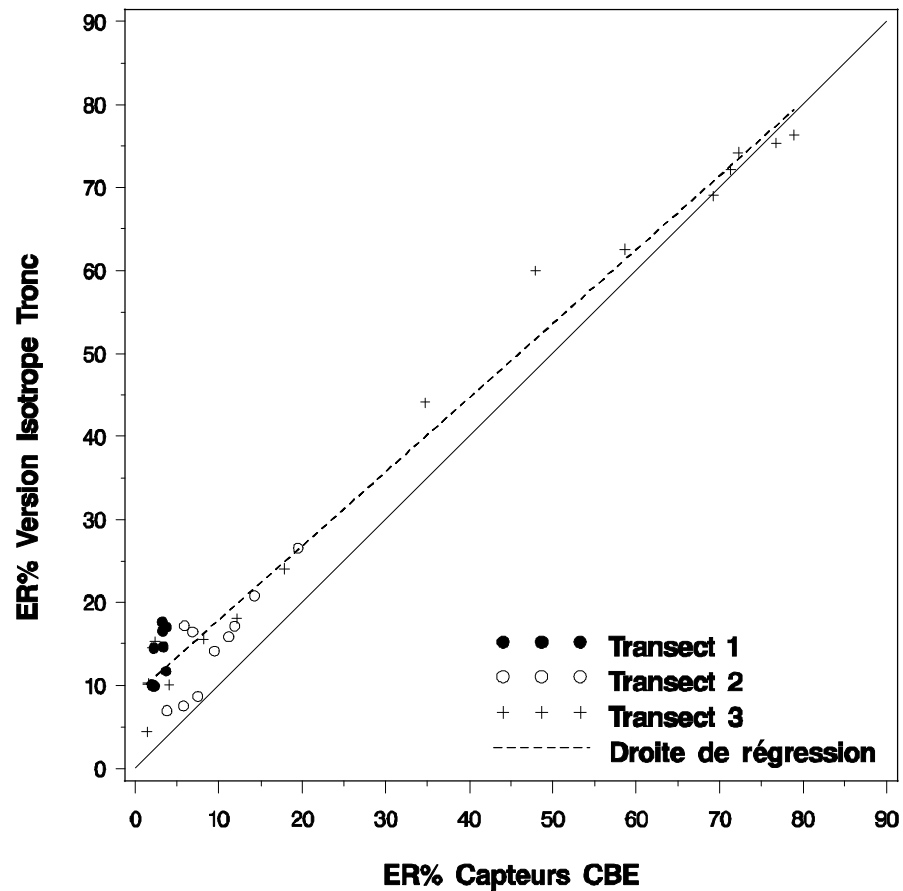


Figure 96 : Éclairement relatif simulées par le modèle tRAYci avec les versions reconstruites isotropes « tronc » et « houppier », en fonction des valeurs d'éclairement relatif mesurées par les capteurs. Les simulations sont réalisées sur la période 25 juin – 18 août 2004. Une régression linéaire a été établie sur l'ensemble des points (niveau de significativité du modèle $p < 0,0001$ dans les deux cas, R^2 de 0,977 et 0,982 respectivement pour les versions isotropes « tronc » et « houppier »). La droite identité est représentée en trait continu.

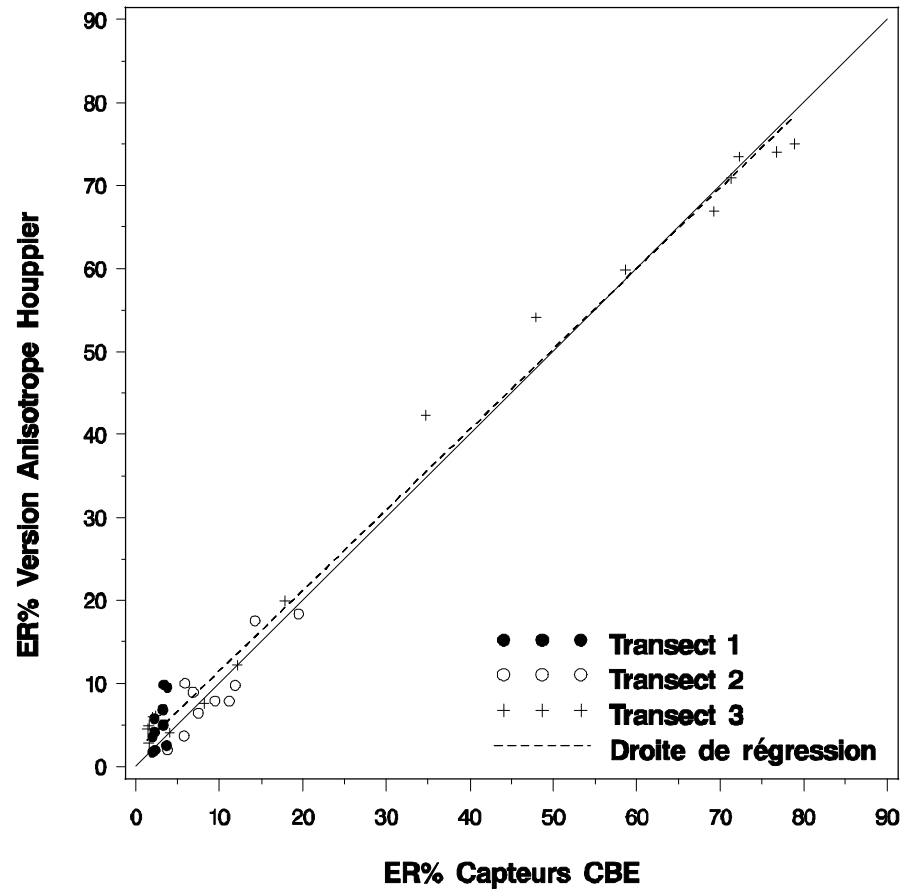
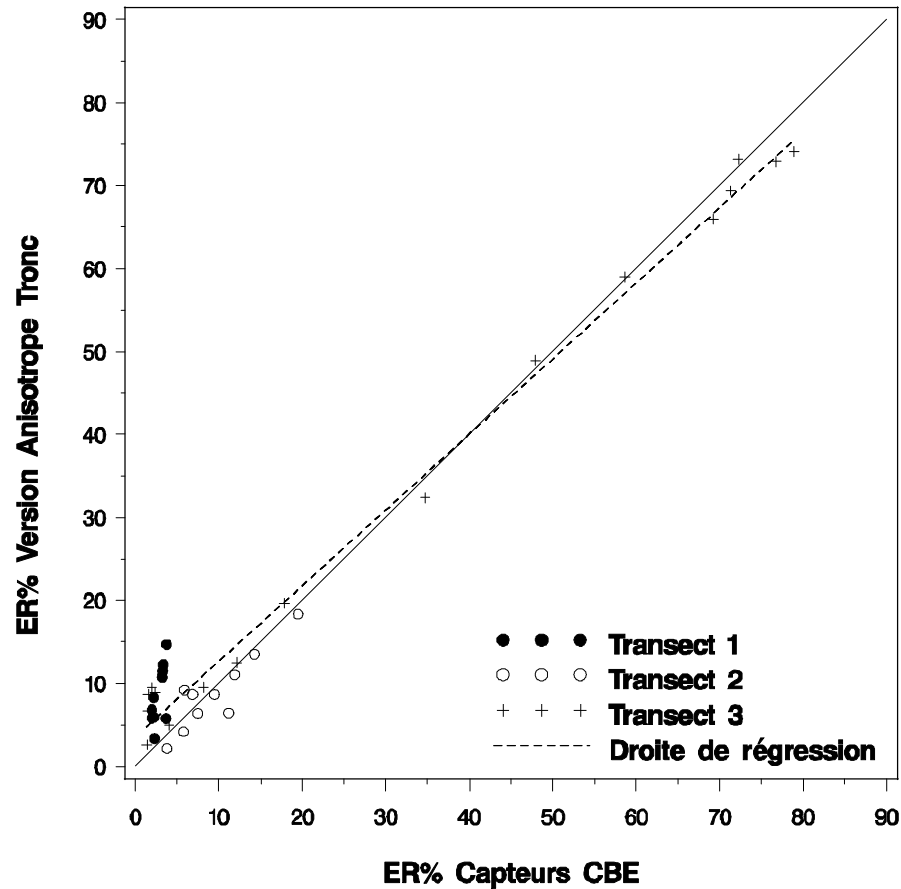


Figure 97 : Éclairage relatif simulé par le modèle tRAYci avec les versions reconstruites *anisotropes* « *tronc* » et « *houppier* », en fonction des valeurs d'éclairage relatif mesurées par les capteurs. Les simulations sont réalisées sur la période 25 juin – 18 août 2004. Une régression linéaire a été établie sur l'ensemble des points (niveaux de significativité du modèle $p < 0.0001$ et $p = 0,02$, ainsi que des R^2 de 0,979 et 0,987 respectivement pour les versions *anisotropes* « *tronc* » et « *houppier* »). La droite identité est représentée en trait continu.

comparaisons. Pour les capteurs nous avons utilisé les valeurs d'éclairement relatif calculées précédemment (chapitre II). Nous avons simulé l'éclairement relatif de tous ces points avec les quatre versions reconstruites considérées. Comme période de simulation nous avons choisi la période de mesure des capteurs, c'est-à-dire du 25 juin au 18 août 2004. Nous avons utilisé la même répartition du rayonnement incident que précédemment (distribution SOC avec $b = 1,23$; $P_{dif} = 48,69$ %). Nous avons activé la correction cosinus étant donné que les simulations étaient comparées à des mesures réalisées à l'aide de capteurs de lumière.

Les **figures 96** et **97** présentent la comparaison des valeurs mesurées par les capteurs avec celles obtenues respectivement pour les versions isotrope et anisotrope. Pour chaque approche, les versions « houppier » et « tronc » sont disposées côte à côte. Pour chaque graphique nous avons individualisé les trois transects et représenté la droite de régression linéaire obtenue (procédure STAT/REG, *SAS Institute Inc. 2000*) pour l'ensemble du nuage (les trois transects confondus). Là encore les versions isotropes paraissent clairement biaisées. La version anisotrope « tronc » est globalement très bien reliée aux valeurs issues des capteurs CBE, sauf pour les faibles valeurs d'éclairement relatif mesurées (moins de 5 %). Malheureusement dans cette faible gamme d'éclairement mesuré (0-5 %), les valeurs d'éclairement relatif simulées sont systématiquement surestimées et s'étendent sur près de 15 % d'éclairement relatif (0-15 %). De ce fait l'utilisation de cette version pour l'estimation de l'éclairement pose un problème de précision pour les éclaircissements faibles. Ce biais est fortement réduit par l'utilisation de la version anisotrope « houppier », qui présente une erreur bien répartie. Il reste peut-être un léger biais résiduel pour les faibles valeurs d'éclairement relatif mesurées, mais il est difficile de trancher avec le faible nombre de points dont nous disposons.

Il est intéressant de constater que la version anisotrope « houppier » donne un résultat globalement comparable à la version mesurée par rapport aux capteurs (la comparaison entre version mesurée et capteurs est présentée dans la **figure 46** du chapitre II, partie D.4).

D. Bilan

Dans ce chapitre nous avons proposé deux méthodes permettant d'alimenter le modèle tRAYci avec un jeu restreint de données. L'approche isotrope correspond à la démarche la plus simple. L'approche anisotrope, que nous avons mise au point permet d'aller plus loin, et propose une reconstruction qui vise à obtenir une représentation plus réaliste des houppiers à l'échelle du couvert de façon à obtenir des simulations de l'éclairement non biaisées. Pour ce faire elle s'appuie sur un algorithme de reconstruction, qui tente de minimiser le recouvrement effectif entre houppiers.

La comparaison des deux approches nous a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- Aucune des approches ne permet d'avoir une reconstitution précise de la forme précise des houppiers.
- A l'échelle du couvert, l'approche anisotrope aboutit à une reconstruction de meilleure qualité. Cependant dans tous les cas, le fait de prédire la hauteur totale, la hauteur de base de houppier et le rayon équivalent du houppier, sans tenir compte de la variabilité relativement forte de ces variables, conduit à une représentation légèrement faussée (moins stratifiée verticalement que dans la version mesurée). Cela a pour effet d'augmenter les recouvrements artificiels entre houppiers.
- Du point de vue de la simulation de l'éclairement relatif, l'approche isotrope est clairement biaisée. L'approche anisotrope permet d'obtenir des simulations pas ou peu biaisées. En

particulier elle permet une bonne reconstitution de la distribution de la surface par classes d'éclairement relatif à l'échelle du dispositif.

Chapitre V : Relation entre caractéristiques dendrométriques du peuplement et éclairage relatif

A. Démarche

De nombreux auteurs se sont intéressés à la relation entre structure du couvert et éclairage relatif dans le cadre de peuplements relativement homogènes. Une approche classique consiste en l'utilisation l'indice foliaire (LAI, leaf area index) pour quantifier le régime lumineux, mais cette approche n'est pas toujours très fiable (*Van Pelt et Franklin 2000*) et met souvent en œuvre des méthodes similaires aux méthodes indirectes de mesure de l'éclairage. Une autre démarche consiste à utiliser des relations de forme exponentielle inverse de la surface terrière (*Comeau 2000* sur des peuplements de trembles de moins de 40 ans, *Hale 2003* dans des plantations d'épicéa de Sitka âgées de 46 ans, *Sonohat et al. 2004* sur des peuplements purs de Douglas, d'épicéa, de mélèze et de pin, d'âges variant de 18 à 96 ans). Cette méthode semble bien adaptée à la quantification de l'éclairage relatif moyen sous couvert homogène à l'échelle de la parcelle. Des relations faisant intervenir l'âge, la composition, la densité ou la hauteur du peuplement ont également été utilisées (*Comeau et Heineman 2003*, *Montgomery et Chazdon 2001*, *Parker et al. 2002*, *Sonohat et al. 2004*, *Weisberg et al. 2003*). Il faut noter que toutes ces références sont récentes, ce qui traduit un champ de recherche très actif actuellement.

Cependant en peuplement hétérogène la valeur moyenne de l'éclairage relatif n'est pas significative des conditions variées rencontrées sur une parcelle (*Parker et al. 2002*). En effet la distribution des arbres (*Pukkala et al. 1991*) et la présence de trouées (*Canham et al. 1990*, *Pritchard et Comeau 2004*, *Weiss 2000*) conduisent à une forte variabilité de l'éclairage relatif. Dans ce cas, ce n'est pas la valeur moyenne qui est importante mais la variabilité sous la forme d'une distribution de la surface de la parcelle au sein des différentes classes d'éclairage, ou de cartographies de l'éclairage relatif. Cela est particulièrement vrai lorsque l'on s'intéresse à la régénération forestière, qui réagit fortement à cette variabilité.

Pour dépasser cette difficulté certains auteurs ont proposé des méthodes pour simuler l'éclairage relatif dans une trouée à partir de sa géométrie (*Canham 1988b*, *Dai 1996*, *Yoshida et al. 1998*). Si ces approches sont fiables pour décrire la distribution du rayonnement au sein d'une trouée spécifique, elles sont difficiles à utiliser dans un peuplement comportant un mélange de zones fermées et de trouées de différentes tailles. De même elles ne sont pas bien adaptées au cas de trouées aux contours mal définis ou très irréguliers, ainsi qu'à des trouées comportant des arbres isolés. Les modèles de lumière constituent en quelque sorte une généralisation de ces approches « trouées », à l'échelle du peuplement dans son ensemble. Ainsi les modèles de lumière permettent de s'affranchir de la notion de trouée : au lieu de délimiter des espaces vides dans un couvert homogène, ils positionnent des volumes foliaires (houppiers) dans un espace libre.

Dans le chapitre précédent nous avons utilisé un modèle de lumière, tRAYci, pour simuler l'éclairage sous couvert en peuplement feuillu hétérogène. Afin de rendre plus accessibles ces simulations, qui nécessitent une description spatiale précise des houppiers, nous avons adopté une démarche visant à réduire la quantité de mesures à réaliser sur le terrain. Ainsi nous avons vu qu'en

établissant, sur un échantillon d'arbres, des relations permettant de reconstituer la hauteur totale, la hauteur de base de houppier et le rayon équivalent de houppier (et en disposant d'une valeur de densité de surface foliaire), il était possible de reconstruire un peuplement à partir seulement de l'essence, de la position et du diamètre à 1,30 m des arbres. Ce peuplement reconstruit avec un jeu restreint de données permet d'obtenir des simulations d'éclairage de bonne qualité.

Il serait cependant intéressant de pouvoir aller encore plus loin dans la simplification en ne prenant pas en compte explicitement le processus d'interception du rayonnement incident. Nous avons indiqué précédemment que plusieurs auteurs avaient relié des données dendrométriques, calculées à l'échelle du peuplement (la surface terrière en particulier), à l'éclairage relatif moyen. Cette valeur moyenne paraît peu pertinente en forêt hétérogène. Cependant on peut se demander si cette démarche peut être appliquée localement, de façon à pouvoir caractériser la variabilité de l'éclairage à l'échelle de la parcelle. Nous avons donc testé si nos données peuvent être utilisées localement pour estimer l'éclairage relatif en un point. Pour ce faire nous proposerons quelques indices dendrométriques calculés à partir de la position et du diamètre à 1,30 m des arbres uniquement (sans données sur les houppiers). Cette démarche répond à une demande forte de pouvoir caractériser la variabilité de l'éclairage à partir de méthodes classiques d'inventaire, comme par exemple un tour d'horizon relascopique qui permet d'obtenir la surface terrière en un point.

Nous comparerons les résultats des simulations de l'éclairage relatif obtenues par le modèle tRAYci, avec la version mesurée du peuplement, dans les mêmes conditions et pour le même échantillonnage que ceux utilisés dans la partie C.3.a du chapitre IV : une grille de points disposés tous les 2 m sur l'intégralité des zones d'étude des deux placettes, à un mètre au dessus du sol (3166 points) et pour la période du 1^{er} mai au 31 octobre 2004.

B. Indices dendrométriques

1. Objectif

Dans cette partie nous allons tenter de répondre à la question suivante : est-il possible, en ne connaissant que la position et le diamètre à 1,30 m des arbres, de construire un indice local permettant d'obtenir l'éclairage relatif en un point ?

2. Indice dendrométrique n°1 : la surface terrière totale

Sonohat et al. 2004 ont proposé, dans le cas de forêts relativement homogènes (équiennes monospécifiques), d'utiliser à l'échelle du peuplement une relation basée sur la loi d'extinction de Bouguer (aussi nommée loi de Beer Lambert) :

$ER\% = 100 \cdot e^{-k \cdot G}$, où $ER\%$ est l'éclairage relatif exprimé en pourcentage, G la surface terrière du peuplement et k un coefficient d'extinction relié à G .

Cette expression correspond à l'hypothèse d'un peuplement où le feuillage est réparti de façon homogène dans toutes les directions et dont le LAI (indice foliaire) est relié linéairement à G .

Dans le cadre d'un peuplement hétérogène, la surface terrière moyenne du peuplement n'apporte que peu d'information sur la structure du peuplement, du fait de la forte structuration spatiale de

cette variable. En revanche, on peut se demander si la relation précédente est applicable localement, afin de relier l'éclairage relatif en un point à la surface terrière en ce point. Pour chaque point de simulation de l'éclairage relatif, nous avons calculé la surface terrière sur une surface circulaire centrée sur le point considéré. Nous avons testé plusieurs rayons pour la surface de calcul (**figure 98**). La **figure 99** présente la relation, pour trois rayons différents, entre éclairage relatif et surface terrière.

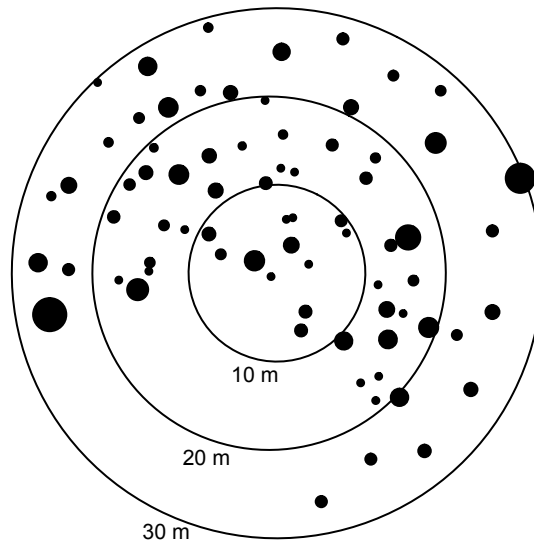


Figure 98 : Pour l'indice ID_1 , la surface terrière (g) est calculée sur un cercle de rayon r . La zone représentée est issue du dispositif. Les troncs sont figurés par des cercles noirs. Leur diamètre est exagéré d'un facteur 5. Les cercles pour $r = 10, 20, \text{ et } 30 \text{ m}$ sont représentés.

Nous constatons que quelle que soit le rayon de calcul, le nuage de point est très mal configuré, et aucune relation non biaisée ne semble pouvoir être ajustée. Cependant nous constatons assez logiquement que globalement, quand la surface terrière diminue, l'éclairage relatif augmente. Mais cette liaison reste très imprécise, ne permettant de discriminer que des situations très extrêmes du point de vue de l'éclairage. Nous constatons également que les deux placettes semblent avoir des comportements différents, ce qui laisse supposer que la relation entre éclairage relatif et surface terrière dépend de la structure locale du peuplement et que celle-ci n'est pas complètement prise en compte par la surface terrière. C'est avec un rayon de calcul de 20 m que les deux placettes apparaissent les mieux superposées.

A titre indicatif, nous avons tout de même calculé l'indice dendrométrique n°1 (ID_1 , en pourcentage) ainsi :

$ID_1 = 100 \cdot e^{-k \cdot g}$, où k , le coefficient d'extinction a été ajusté par régression non linéaire (procédure STAT/NLIN, SAS Institute Inc. 2000) avec le modèle suivant :

$$ER\% = 100 \cdot e^{-k \cdot g}$$

La **figure 100** présente la relation entre éclairage relatif et ID_1 (pour un rayon de calcul de la surface terrière de 20 m), et la **figure 101** l'histogramme de distribution de la surface par classe pour l'indice. Nous constatons que le modèle est fortement biaisé. Les histogrammes de distribution

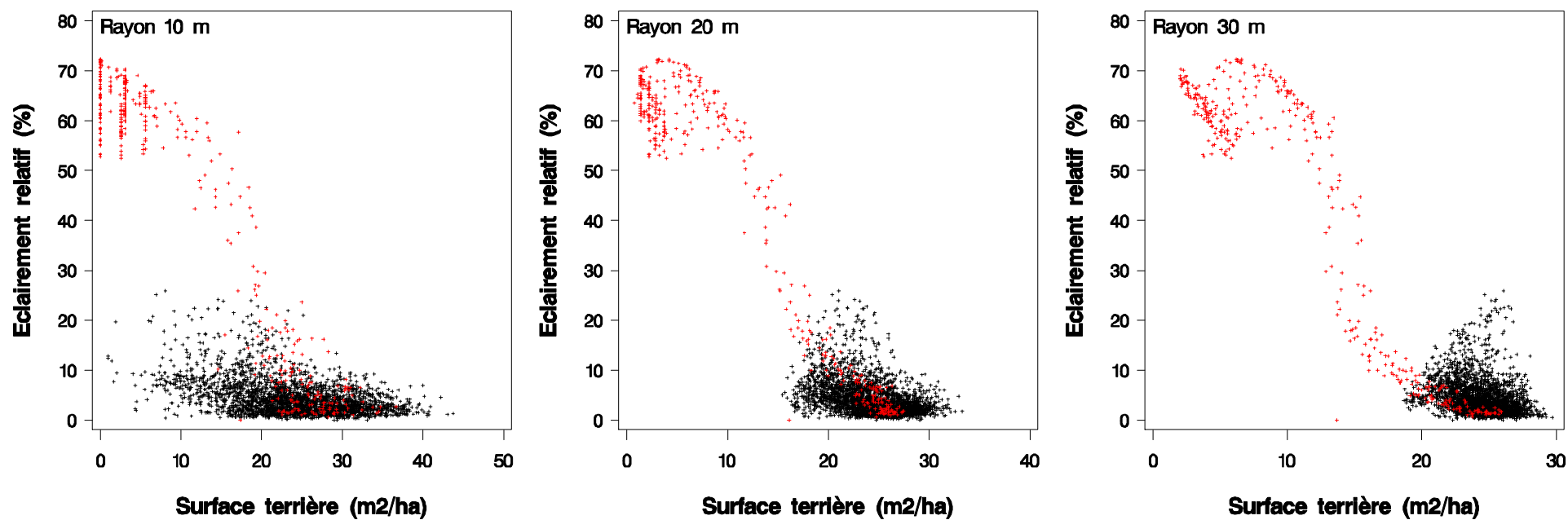


Figure 99 : Relation entre éclairement relatif (ER%) simulé par le modèle tRAYci avec la version mesurée du peuplement, et la surface terrière calculée pour un rayon $r = 10, 20,$ ou 30 m. Les placettes 1 et 2 du dispositif sont représentées respectivement en noir et en rouge.

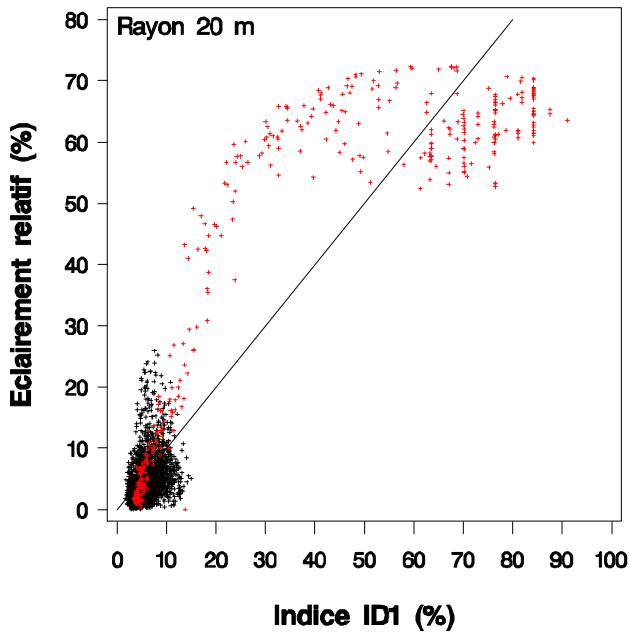


Figure 100 : Relation entre éclairement relatif (ER%) simulé par le modèle tRAYci avec la version mesurée du peuplement, et l'indice ID_1 pour un rayon $r = 20$ m. Les placettes 1 et 2 sont représentées respectivement en noir et en rouge. La droite identité est représentée en trait continu.

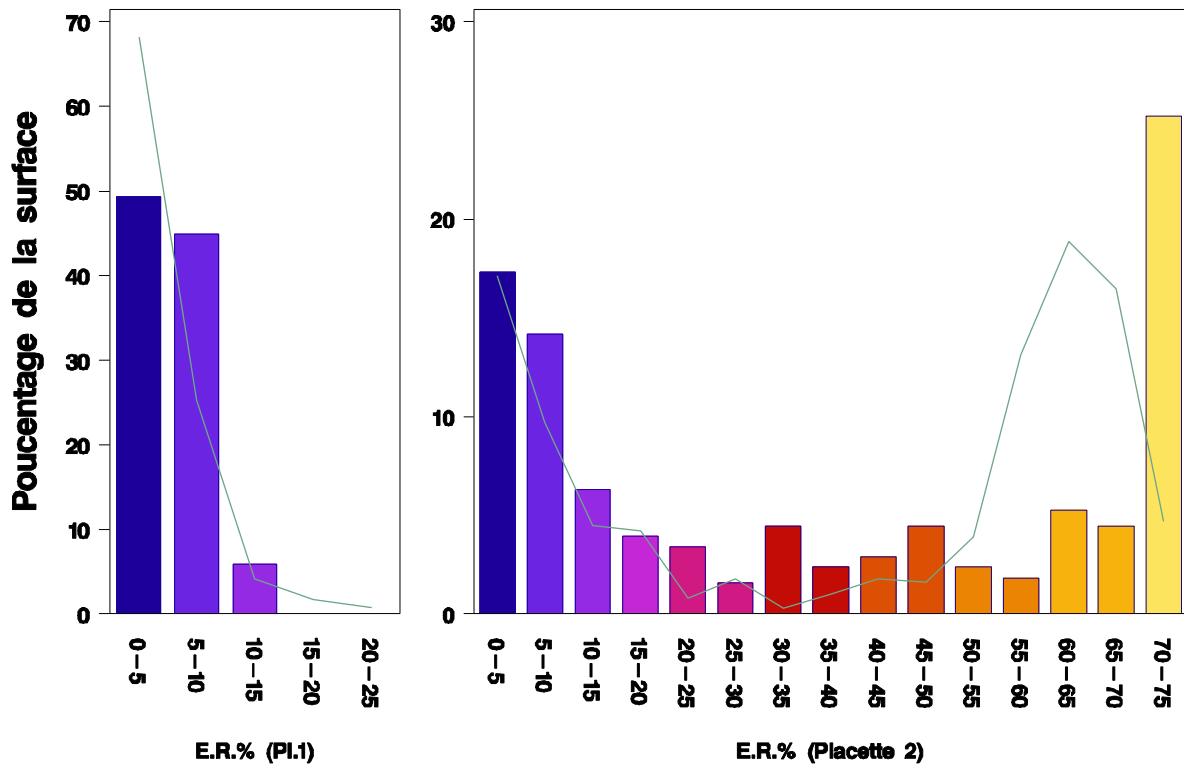


Figure 101 : Distribution de la surface par classes de 5 % de l'indice ID_1 (rayon $r = 20$ m), pour les placettes 1 (à gauche) et 2 (à droite). A titre de comparaison les valeurs de la version mesurée sont reliées par un trait vert continu.

de l'éclairage relatif montrent clairement l'inefficacité de cet indice pour l'estimation de l'éclairage relatif même à l'échelle de la parcelle. Il faut noter que pour des rayons de calcul de la surface terrière de 10 et 30 m, l'ajustement est totalement faussé (placettes totalement dissociées, nuage de points très mauvais).

3. Indice dendrométrique n°2 : surface terrière sectorisée (4 secteurs)

Il est probable que les structures observées dans la relation entre éclairage relatif et surface terrière soient dues, au moins en partie, au fait que la surface terrière ne tient pas compte de l'orientation azimutale, alors que l'éclairage a une distribution azimutale anisotrope. Ainsi la position relative des différents compétiteurs a une influence forte sur les directions de l'hémisphère céleste non masquées depuis le point considéré. Nous proposons donc un indice dendrométrique n°2 (ID_2) qui tient compte de la distribution azimutale de la surface terrière. Ainsi la part de l'éclairage incident qui provient de chacune des quatre directions est interceptée par une loi exponentielle inverse ne faisant intervenir que la surface terrière du secteur correspondant :

$$ID_2 = P_N \cdot e^{-k \cdot g_N} + P_E \cdot e^{-k \cdot g_E} + P_S \cdot e^{-k \cdot g_S} + P_O \cdot e^{-k \cdot g_O}$$

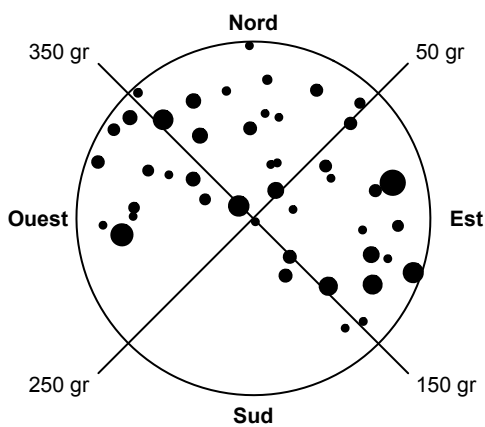


Figure 102 : Pour l'indice ID_2 , la surface terrière (g) est calculée sur un cercle de rayon r, séparément pour quatre secteurs : Nord (350-50 gr), Est (50-150 gr), Sud (150-250 gr), Ouest (250-350 gr). La zone représentée est identique à celle de la **figure 98**. Les troncs sont figurés par des cercles noirs. Leur diamètre est exagéré d'un facteur 5. Le cercle pour $r = 20$ m est représenté.

Les paramètres P_N , P_E , P_S et P_O sont les pourcentages de l'éclairage incident total provenant respectivement du Nord, de l'Est, du Sud et de l'Ouest. Les variables g_N , g_E , g_S et g_O sont respectivement les surfaces terrières au Nord (azimuts 350 à 50 grades), à l'Est (50-150 gr), au Sud (150-250 gr) et à l'Ouest (250-350 gr). Ces surfaces terrières sont calculées sur une surface circulaire centrée sur le point considéré et de rayon r (**figure 102**). Le coefficient d'extinction k est considéré comme identique pour les quatre directions. Nous avons ajusté ce paramètre par régression non linéaire avec la procédure STAT/NLIN (SAS Institute Inc. 2000) en utilisant le modèle suivant :

$$ER\% = P_N \cdot e^{-k \cdot g_N} + P_E \cdot e^{-k \cdot g_E} + P_S \cdot e^{-k \cdot g_S} + P_O \cdot e^{-k \cdot g_O}, k \text{ étant le seul paramètre ajustable.}$$

Les valeurs de P_N (12,2 %), P_E (26,8 %), P_S (34,2 %) et P_O (26,8 %) ont été calculées en utilisant le

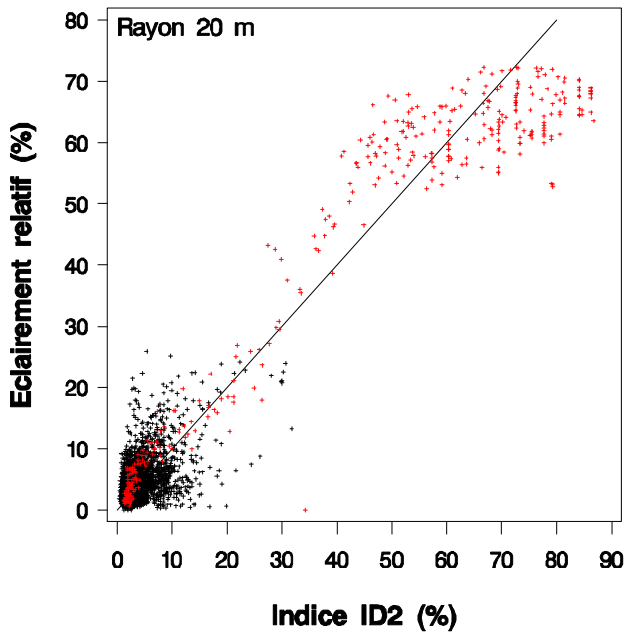


Figure 103 : Relation entre éclairage relatif (ER%) simulé par le modèle tRAYci avec la version mesurée du peuplement, et l'indice ID₂ pour un rayon r = 20 m. Les placettes 1 et 2 sont représentées respectivement en noir et en rouge. La droite identité est représentée en trait continu.

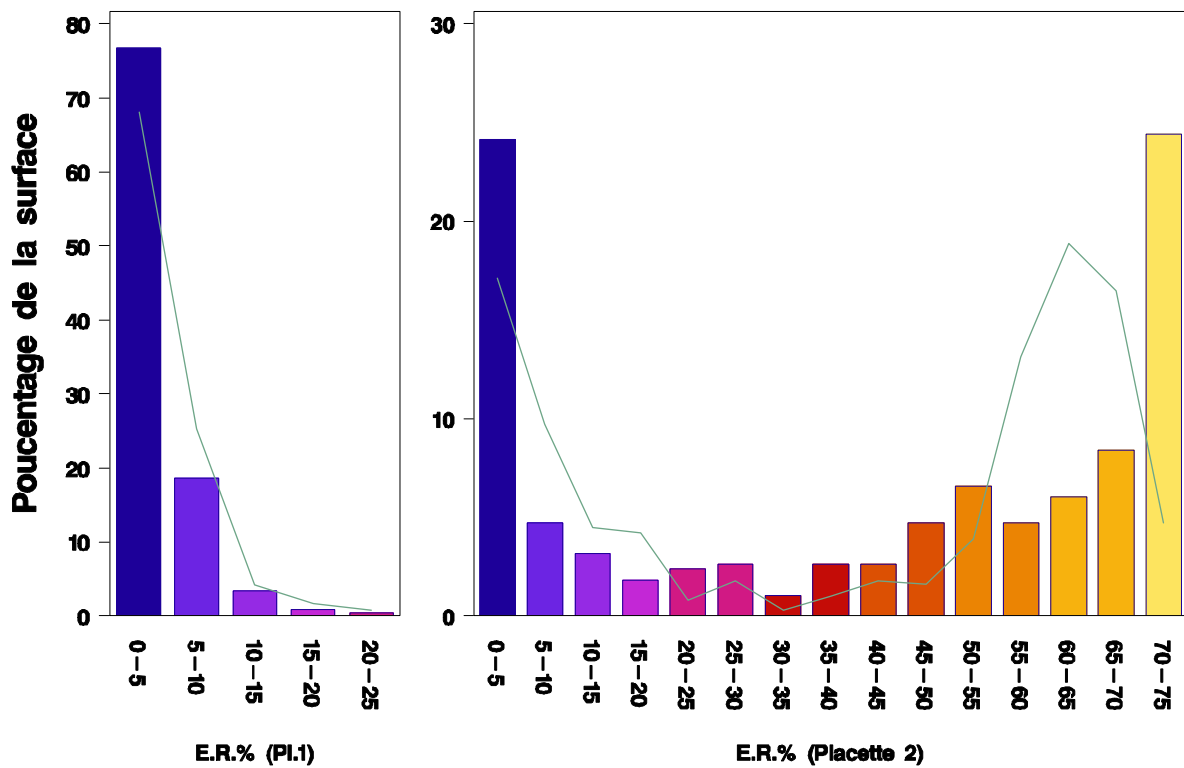


Figure 104 : Distribution de la surface par classes de 5 % de l'indice ID₂ (rayon r = 20 m), pour les placettes 1 (à gauche) et 2 (à droite). A titre de comparaison les valeurs de la version mesurée sont reliées par un trait vert continu.

même algorithme et les mêmes valeurs de paramètres que pour la simulation de l'éclairage relatif $ER\%$ par tRAYci, que nous prenons comme référence.

La **figure 103** présente les valeurs de $ER\%$ en fonction des valeurs obtenues pour ID_2 (pour un rayon de calcul de la surface terrière de 20 m), et la **figure 104** l'histogramme de distribution de la surface par classe pour l'indice. Pour des rayons de 10 et 30 m (non présentés ici), l'ajustement est complètement faussé. Pour un rayon de calcul de 20 m, le modèle est globalement centré sur la droite identité. Cependant le modèle est clairement biaisé : l'indice sous-estime l'éclairage pour les faibles valeurs, et le surestime pour les fortes valeurs. D'autre part le nuage de point présente plusieurs courbures successives. L'histogramme de distribution est plus proche de celui obtenu avec l'éclairage relatif de la version mesurée que dans le cas de ID_1 , mais il en diffère de façon significative. Ainsi la sectorisation améliore donc la relation, même si cette amélioration paraît encore nettement insuffisante.

4. Indice dendrométrique n°3 : surface terrière sectorisée (8 secteurs)

Nous avons testé si le fait de prendre en compte plus de secteurs permettait d'améliorer le modèle. Ainsi nous avons construit l'indice dendrométrique n°3 de la même façon que le n°2, mais avec huit secteurs azimutaux au lieu de quatre :

$$ID_3 = P_N \cdot e^{-k \cdot g_N} + P_{NE} \cdot e^{-k \cdot g_{NE}} + P_E \cdot e^{-k \cdot g_E} + P_{SE} \cdot e^{-k \cdot g_{SE}} \\ + P_S \cdot e^{-k \cdot g_S} + P_{SO} \cdot e^{-k \cdot g_{SO}} + P_O \cdot e^{-k \cdot g_O} + P_{NO} \cdot e^{-k \cdot g_{NO}}$$

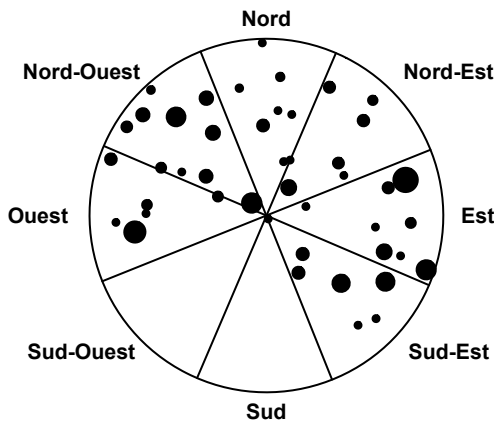


Figure 105 : Pour l'indice ID_3 , la surface terrière g est calculée sur un cercle de rayon r , séparément pour huit secteurs : Nord, Nord-Est, Est, Sud-Est, Sud, Sud-Ouest, Ouest, Nord-Ouest. La zone représentée est identique à celle des **figures 98 et 102**. Les troncs sont figurés par des cercles noirs. Leur diamètre est exagéré d'un facteur 5. Le cercle pour $r = 20$ m est représenté.

Les paramètres $P_N, P_{NE}, P_E, P_{SE}, P_S, P_{SO}, P_O$ et P_{NO} sont les pourcentages de l'éclairage incident total provenant respectivement du Nord, du Nord-Est, de l'Est, du Sud-Est, du Sud, du Sud-Ouest, de l'Ouest et du Nord-Ouest (**figure 105**). Les variables $g_N, g_{NE}, g_E, g_{SE}, g_S, g_{SO}, g_O$ et g_{NO} sont respectivement les surfaces terrières au Nord (azimuts 375 à 25 grades), au Nord-Est (azimuts 25 à 75 grades), à l'Est (75-125 gr), au Sud-Est (azimuts 125 à 175 grades), au Sud (175-225 gr), au Sud-Ouest (azimuts 225 à 275 grades), à l'Ouest (275-325 gr) et Nord-Ouest (azimuts 325 à 375 grades). Ces surfaces terrières sont calculées sur une surface circulaire centrée sur le point considéré

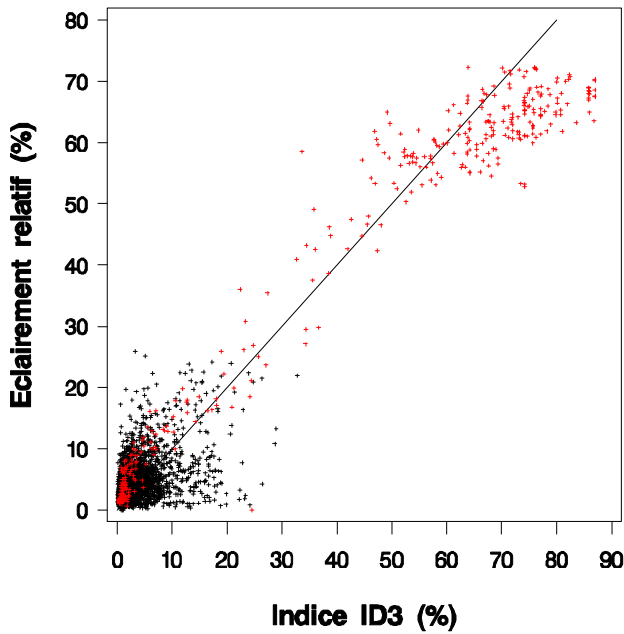


Figure 106 : Relation entre éclairage relatif (ER%) simulé par le modèle tRAYci avec la version mesurée du peuplement, et l'indice ID₃ pour un rayon r = 20 m. Les placettes 1 et 2 sont représentées respectivement en noir et en rouge. La droite identité est représentée en trait continu.

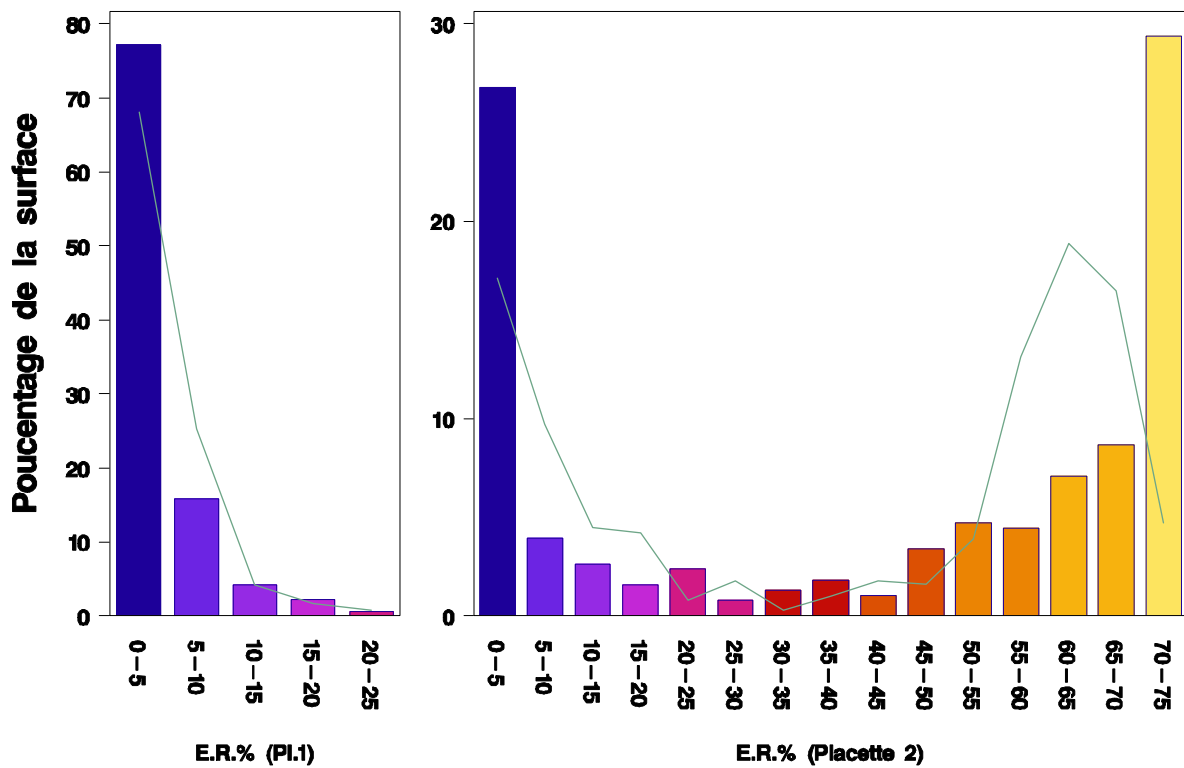


Figure 107 : Distribution de la surface par classes de 5 % de l'indice ID₃ (rayon r = 20 m), pour les placettes 1 (à gauche) et 2 (à droite). A titre de comparaison les valeurs de la version mesurée sont reliées par un trait vert continu.

et de rayon r . Le paramètre k est un coefficient d'extinction considéré comme identique pour les huit directions. Nous avons ajusté ce paramètre par régression non-linéaire avec la procédure STAT/NLIN (*SAS Institute Inc. 2000*) en utilisant le modèle suivant :

$$ER\% = P_N \cdot e^{-k \cdot g_N} + P_{NE} \cdot e^{-k \cdot g_{NE}} + P_E \cdot e^{-k \cdot g_E} + P_{SE} \cdot e^{-k \cdot g_{SE}} \\ + P_S \cdot e^{-k \cdot g_S} + P_{SO} \cdot e^{-k \cdot g_{SO}} + P_O \cdot e^{-k \cdot g_O} + P_{NO} \cdot e^{-k \cdot g_{NO}}$$

k étant le seul paramètre ajustable.

Les valeurs de P_N (6,1 %), P_{NE} (6,2 %), P_E (14,4 %), P_{SE} (18,1 %), P_S (16,6 %), P_{SO} (18,1 %), P_O (14,4 %) et P_{NO} (6,2 %) ont été calculées en utilisant le même algorithme et les mêmes valeurs de paramètres que pour la simulation de l'éclairage relatif $ER\%$ par tRAYci.

La **figure 106** présente les valeurs de $ER\%$ en fonction des valeurs obtenues pour ID_3 (pour un rayon de calcul de la surface terrière de 20 m), et la **figure 107** l'histogramme de distribution de la surface par classe pour l'indice. Si la prise en compte de plus de secteurs semble réduire la variabilité de l'indice pour les valeurs élevées d'éclairage relatif, par contre il ne permet pas de supprimer le biais. En réalité il semblerait même que l'utilisation de huit secteurs au lieu de quatre conduise à une plus grande ségrégation des points pour les valeurs d'éclairage relatif faible. L'histogramme de distribution ne présente pas d'amélioration évidente par rapport à celui obtenu avec ID_2 .

Ainsi le fait d'utiliser plus de secteurs ne permet pas d'améliorer l'indice. Cette observation peut sembler paradoxale. Cependant il faut noter que la surface terrière de chaque secteur n'intervient pas dans l'interception du rayonnement incident provenant des autres secteurs. Or, dans la réalité, le houppier des arbres occupe un certain volume. Si le houppier est à cheval sur deux secteurs, le fait d'affecter la surface terrière (et donc indirectement la surface foliaire) correspondante à l'un des secteurs seulement conduit à surestimer l'interception pour l'un et à la sous-estimer pour l'autre. D'autre part, plus un arbre est éloigné du point considéré, plus son influence sur le rayonnement diminue (par effet de projection). Par conséquent l'erreur causée par un houppier chevauchant deux secteurs dépend de sa distance au point considéré.

5. Bilan sur les indices dendrométriques

Les trois indices testés montrent que l'éclairage et la surface terrière locale ont un lien évident. Cependant, la surface terrière semble insuffisante, à elle seule, pour prédire l'éclairage relatif. En effet la structure spatiale et verticale du peuplement a une grande importance.

Nous avons tenté de décrire partiellement cette structuration par une sectorisation de la surface terrière. Même si cela conduit à une nette amélioration, la relation obtenue avec l'éclairage relatif semble encore biaisée. Nous avons testé d'autres indices (non présentés ici), tentant de prendre en compte la distance des arbres depuis le point considéré, afin de déterminer quelle part de la surface terrière influence l'interception de l'éclairage relatif incident provenant des différentes directions de l'hémisphère céleste. Cependant aucun indice n'était relié de façon non biaisée à l'éclairage relatif. En fait, aucun des raffinements que nous avons introduits dans la ventilation de la surface terrière n'a permis d'obtenir une relation de meilleure qualité que celle obtenue avec ID_3 .

Ainsi notre démarche, consistant à faire correspondre des surfaces au sol contenant des arbres à des zones de l'hémisphère céleste d'où proviennent différentes parts du rayonnement incident, paraît

inadaptée à un peuplement où les arbres sont de tailles variées. Dans un peuplement équienné, où tous les arbres ont des tailles semblables (en terme de diamètre, hauteur et extension horizontale et verticale du houppier), la distance d'un arbre depuis le point considéré détermine complètement la partie de l'hémisphère céleste dont il intercepte le rayonnement. Par contre si les arbres ont des tailles différentes, en plus de la distance de l'arbre il faut connaître sa hauteur et l'extension verticale et horizontale de son houppier afin de déterminer quelles directions de l'hémisphère céleste sont occultées par son houppier. Par conséquent, dans un système hétérogène du point de vue de la taille des arbres, une distribution en deux dimensions de la surface terrière est insuffisante. Il faut passer à une représentation en trois dimensions. Le corollaire de cette conclusion, est qu'il faut disposer de relations permettant d'obtenir les données sur la hauteur et l'extension des houppiers, ce qui nous ramène à la démarche du chapitre précédent.

Compte tenu de ces éléments, il est possible que des indices dendrométriques, basés sur la distribution locale de la surface terrière, soient utilisables pour prédire la distribution de l'éclairage relatif dans le cadre de peuplements équiennés présentant une hétérogénéité sous la forme de trouées. Cependant il faudrait probablement tenir compte de l'éventuel mélange spécifique, à l'aide d'une pondération des surfaces terrières des différentes essences, afin de refléter les différences entre espèces pour la relation entre surface terrière et variables caractéristiques du houppier.

Enfin, même dans les cas où ces indices dendrométriques seraient envisageables, il faut noter une autre limite : le coefficient k . Ce paramètre est étroitement lié à la structure du couvert, mais ne peut pas être mesuré directement sur le terrain car il recouvre un grand nombre d'aspects différents. Par conséquent un calibrage systématique de ce coefficient à l'aide d'estimations ou de mesures de l'éclairage relatif semble inévitable.

Discussion

A. Choix du dispositif et données mesurées

1. Particularités et pertinence du dispositif choisi

Le peuplement choisi nous a permis, sur une surface de taille raisonnable, d'échantillonner des niveaux d'éclaircissements variés. De plus, il présente une stratification verticale marquée, comporte des trouées de tailles variées et un mélange d'un nombre important d'essences. Ce peuplement correspond à un type de peuplement assez fréquent sur les plateaux calcaires de Lorraine. A côté de ces atouts, le dispositif présente quelques particularités qui ont pu limiter certaines analyses :

- Le peuplement est très dense et la compétition y est donc très forte. Cela conduit à un nombre important d'arbres penchés ou fortement compressés. Une première conséquence est l'augmentation de la variabilité de forme des houppiers, comme nous l'avons constaté dans le chapitre III. Une seconde conséquence est que cela aboutit à un nombre non négligeable d'arbres dont le centre de houppier est fortement éloigné du centre du tronc. C'est probablement la cause principale, pour les simulations d'éclaircissement utilisant l'approche anisotrope, de l'écart entre les versions « tronc » et « houppier ». Dans des peuplements où le capital sur pied serait plus faible, on peut s'attendre à des différences moins grandes entre ces deux versions.
- Le mélange d'essences est particulièrement riche en charme, réduisant les possibilités d'analyse de l'effet espèce. En effet, l'essentiel de la surface foliaire totale est fournie par le charme, rendant difficilement perceptible l'influence que pourrait avoir des comportements particuliers pour les autres espèces. Les essences dont le feuillage est réputé clair (frêne, bouleau en particulier) ne sont pas (ou très peu) représentées et la variabilité de perméabilité du feuillage liée à l'espèce nous a paru trop limitée pour permettre une analyse de son effet sur la simulation de l'éclaircissement.
- Les trouées utilisées avaient des tailles assez variées, cependant bon nombre d'entre elles comportaient des arbres isolés inclus dans la trouée. Cet aspect est plutôt intéressant en terme de complexité de la situation étudiée et de réalisme par rapport aux situations rencontrées fréquemment sur le terrain, cependant cela a conduit à un sous-échantillonnage des éclaircissements relatifs intermédiaires (25-50 %).
- La placette 2 nous paraît *a posteriori* sous-dimensionnée, la surface où les éclaircissements relatifs intermédiaires et forts sont représentés étant finalement assez peu étendue, conduisant à des autocorrélations assez fortes entre les points de mesure. La répétition de ces conditions aurait été souhaitable.

2. Problèmes techniques concernant les mesures effectuées

Un point qui nous semble important à signaler est la grande quantité de données nécessaire à l'alimentation complète d'un modèle de lumière en général, et de tRAYci en particulier. Cela induit des temps de mesures sur le terrain ainsi des temps de déplacement importants, et implique une logistique complexe.

Une autre conséquence des nombreuses variables à relever et du grand nombre d'arbres à caractériser est une grande quantité d'erreurs de différentes natures, même si elles représentent un faible pourcentage. Le cumul de ces erreurs peut conduire à des différences locales non négligeables pour les simulations de l'éclairement relatif. En particulier, les mesures étant faites en plusieurs passages successifs, il est important de s'assurer de la bonne correspondance entre les différentes données relevées sur chaque arbre. Cela implique une identification claire et intuitive de chaque arbre, qui permette de détecter rapidement les erreurs les plus grossières. Dans notre cas, nous avons traité le problème des erreurs de mesures par une phase importante de vérification et correction des données.

Ces éléments rendent d'autant plus pertinente la démarche adoptée, qui cherche à réduire la quantité de données nécessaires à l'utilisation du modèle de lumière. Ainsi, le fait de dissocier la caractérisation des houppiers, réalisée sur un échantillon réduit d'arbres non spatialisés, de la description des troncs (essence, diamètre et localisation de tous les arbres), devrait permettre d'alléger très nettement la phase de terrain et de réduire la quantité totale d'erreurs.

B. Géométrie des houppiers

1. Intérêt du diamètre à 1,30 m et relations obtenues

Il est important de constater que le diamètre à 1,30 m est bien relié aux variables caractéristiques du houppier nécessaires au modèle tRAYci. Ainsi seule l'extension latérale précise du houppier ne peut être prédite à partir du diamètre. Cependant, si la hauteur totale, la hauteur de base et le rayon équivalent du houppier, sont bien reliés au diamètre à 1,30 m pour chaque espèce, il reste une variabilité résiduelle relativement importante.

Cette propriété synthétique du diamètre à 1,30 m est très intéressante car elle permet d'envisager l'estimation de données complexes à obtenir sur le terrain à partir de la variable de base des inventaires forestiers et des simulateurs de croissance. C'est sur cette valeur synthétique du diamètre à 1,30 m que se fonde notre démarche de reconstruction des houppiers.

Le chapitre III a cependant montré que les relations dépendent de l'essence. Pour les essences rencontrées, les relations établies sont probablement applicables dans des contextes semblables en terme de structure du peuplement (ancien taillis sous futaie) et de station (plateau calcaire de Lorraine). Cependant pour plusieurs essences – le chêne, l'érable sycomore et l'érable plane en particulier – le nombre d'individus est faible et conduit à des ajustements probablement peu robustes, même si ils sont bien adaptés à la description de nos données. D'autre part, pour la plupart des essences, la gamme de diamètre rencontrée est assez limitée. Cela suppose que l'extrapolation de nos ajustements en dehors de cette gamme doit être faite avec précaution, nécessitant probablement un ré-échantillonnage complémentaire. Dans le cas du hêtre, les courbes obtenues nous paraissent assez robustes, en tout cas pour la hauteur totale du fait d'une gamme de diamètre étendue. Pour l'utilisation des relations établies pour d'autres structures (futaie en particulier) ou pour des stations franchement différentes, il est indispensable de vérifier qu'elles sont bien adaptées au peuplement considéré.

Il serait d'ailleurs intéressant de tester la robustesse des relations entre les caractéristiques étudiées et le diamètre à 1,30 m, du point de vue de leur forme mathématique et de leur paramétrage, dans différents contextes forestiers et sylvicoles. Il faut noter que la relation établie pour la hauteur totale a déjà été employée à plusieurs reprises et a montré une bonne robustesse (*Dhôte et De Hercé*

1994). Les relations pour la longueur et le rayon équivalent du houppier (relations linéaires) sont moins spécifiques et mériteraient d'être évaluées dans des situations variées. Nous nous attendons à des différences dépendant de la structure du peuplement.

Ainsi une structuration des courbes est clairement apparue selon le statut global des essences au sein du peuplement :

- Un groupe d'essences dominantes composé du hêtre, de l'érable sycomore et de l'érable plane.
- Un groupe d'espèces du « taillis », à savoir l'érable champêtre, le tilleul et du charme.
- Un groupe d'espèces clairement dominées composés des deux alisiers.
- Le chêne qui a systématiquement un comportement atypique.

La distinction entre les deux premiers groupes est principalement vérifiée pour la hauteur totale et peu évidente pour les deux autres variables.

La question est de savoir si ces différences sont dues à des tempéraments différents ou si elles sont la conséquence de la structure effective du peuplement étudié. Malgré tout, nous pouvons indiquer quelques tendances générales. Le hêtre se démarque clairement des autres essences par un comportement particulièrement dynamique et une sensibilité apparemment moins forte à la compétition. Les alisiers semblent moins bien supporter la compétition que les autres essences à diamètre égal, tout comme le chêne malgré sa position dans l'étage dominant.

2. Forme des houppiers

Pour la reconstitution du couvert, nous avons utilisé une représentation individuelle des houppiers, utilisée dans le modèle tRAYci, décrite en détail au chapitre II partie D, et illustrée par la **figure 39**.

Dans l'idée de réduire la quantité de données nécessaires à l'alimentation du modèle, nous avons restreint la souplesse potentielle du houppier en fixant les paramètres les plus complexes à mesurer sur le terrain ou à estimer à partir du diamètre à 1,30 m. Ainsi nous avons utilisé des paramètres de formes (E_{sup} et E_{inf}) égaux à 2, ce qui nous a semblé un choix relativement cohérent avec la forme globale des houppiers feuillus. Pour les paramètres d'épaisseur du feuillage (L_{sup} et L_{inf}), nous avons utilisé des valeurs de respectivement 100 et 0 %, qui correspondent à une densité de surface foliaire répartie dans tout le volume de houppier. Ce choix est la conséquence du fait que nous avons mesuré la hauteur de base du houppier vivant : l'enveloppe définie est donc supposée limitée au volume contenant effectivement des feuilles.

En revanche, il nous a paru essentiel d'utiliser huit rayons de houppier. En effet, sur le terrain nous avons vérifié que quatre ou six rayons auraient été nettement insuffisants pour décrire la forme des houppiers. Ce choix s'appuie également sur un travail antérieur (*Piboule 2001*) dans lequel nous avons constaté qu'une description par un nombre de rayons trop faible aboutissait à des biais de recouvrement artificiels, tels que ceux que nous avons rencontrés avec l'approche isotrope de reconstruction de houppiers, qui représente en fait le cas extrême où un houppier est représenté par un unique rayon.

La représentation utilisée permet donc une souplesse importante dans l'extension latérale des houppiers sur laquelle nous avons fondé notre approche de reconstruction. Pour le peuplement considéré, l'utilisation de contours de houppiers anisotropes s'est montrée clairement plus performante que l'approche isotrope, en tout cas du point de vue de la simulation de l'éclairement sous couvert. Nous attribuons cette supériorité à une meilleure évaluation de l'agencement relatif

des espaces vides et des volumes occupés par le feuillage, qui a une grande importance lors de la modélisation de l'interception du rayonnement incident.

Notre approche de reconstruction nécessite que les houppiers soient pris en compte individuellement avec des formes permettant une variabilité de l'extension latérale. Parmi les modèles proposés dans la littérature, les modèles discrets considérant des niveaux homogènes et les modèles géométriques qui utilisent des formes de révolution ne sont donc pas compatibles avec notre démarche. Les premiers ne considèrent tout simplement pas le groupement du feuillage au sein du houppier, ce qui ne les rend pas adaptés à des couverts présentant une forte hétérogénéité dans l'agencement des volumes feuillés. Mais cela est normal dans la mesure où ses modèles ont été conçus pour des contextes spécifiques homogènes ou présentant une hétérogénéité clairement structurée (plantations en rangs par exemple). Le second groupe de modèles (géométriques de révolution) s'apparente à l'approche isotrope employée dans ce travail. Ils posent donc *a priori* les mêmes problèmes : une surestimation des recouvrements effectifs entre houppiers qui induit une surestimation de l'éclairement sous couvert. Cependant ce biais est dû à la compétition entre les arbres pour l'occupation de l'espace, particulièrement marquée dans le peuplement étudié. Ainsi il est probable que, soit dans des systèmes plus clairsemés (futaies claires), soit dans des peuplements très stratifiés verticalement où il n'y aurait finalement que peu de compétition latérale, soit dans des couverts présentant une forte régularité (plantation), l'utilisation de l'approche isotrope, et plus généralement de modèles géométriques de révolution, soit tout à fait pertinente.

Il faut distinguer également les modèles discrets utilisant des cellules parallélépipédiques 3D permettent *a priori* tous types d'hétérogénéité. Cependant pour utiliser notre approche avec ces modèles il est indispensable de considérer une forme géométrique pour les houppiers afin de pouvoir « remplir » les différentes cellules de l'espace à partir de variables définies à l'échelle de l'arbre. C'est en fait ce qui se passe dans tRAYci, mais avec une forme prédéfinie pour les houppiers. L'intérêt supplémentaire des modèles discrets évoqués serait de permettre l'utilisation et la comparaison de différentes formes géométriques, sans être limité par une représentation spécifique.

Les modèles surfaciques sont les plus détaillés et sont donc capables de prendre en compte tous types d'hétérogénéité, du fait de leur représentation très fine des éléments foliaires. En particulier, ils sont capables de représenter des arbres de taille réduite (perches et mêmes gaules) de façon réaliste alors que les formes géométriques simples semblent trop imprécises dans ce cas (forte surestimation du volume occupé par les feuilles). Cependant pour utiliser notre approche avec ces modèles, il faudrait être en mesure de reconstruire les houppiers détaillés de l'approche surfacique dans des volumes géométriques délimités à l'aide uniquement des quelques variables de houppiers que nous avons utilisés. Il s'agit donc d'envisager une reconstruction de structures végétales réalistes dans des volumes de houppiers contraints. Une telle démarche, particulièrement intéressante dans la mesure où elle permet de concilier la simplicité relative de représentation des modèles géométriques ainsi que leur capacité à utiliser des variables d'inventaire forestier, au réalisme de représentation, en particulier en terme d'agencement du feuillage des modèles surfaciques, a été proposée par *Boudon et al. 2003*. Nous pensons que cette voie de recherche constitue une évolution majeure dans la modélisation de la géométrie des arbres, en particulier dans l'optique de la simulation de la distribution de l'éclairement relatif.

En dehors de l'applicabilité de notre démarche de reconstruction des houppiers à d'autres modèles, il faut aborder la pertinence du niveau d'anisotropie considéré. En effet, nous nous sommes limités à une anisotropie de l'extension latérale des houppiers. Nous avons ainsi choisi de négliger la variabilité de l'extension verticale du houppier. Pour la prendre en compte, il faudrait utiliser des formes géométriques plus complexes (*Cescatti 1997, Groot 2004, Song et al. 1997*). Cette prise en

compte pourrait permettre de réduire encore la surestimation du recouvrement entre houppiers, par leur ajustement vertical, en particulier dans le cas de houppiers voisins situés à des hauteurs différentes. L'intérêt de cette complexification de l'approche se manifeste plus particulièrement pour des peuplements présentant une stratification verticale très progressive. Cependant cela implique une réécriture complète de l'algorithme pour y introduire la gestion conjointe d'ajustements horizontaux et verticaux, ce qui représente un travail à part entière, et non une simple amélioration. La question de la pertinence de cette évolution se pose, surtout si l'on considère que notre approche a donné de bons résultats dans un peuplement pourtant nettement structuré verticalement. Du point de vue pratique, dans le cadre géométrique utilisé, cet ajustement se traduirait probablement par l'ajustement d'une hauteur de plus grande largeur de houppier spécifique à chaque direction. Mais cela risque d'avoir un effet géométrique limité, et il faudrait probablement envisager également une souplesse au niveau de la courbure verticale du houppier. Or ce dernier point paraît particulièrement délicat à mettre en œuvre. Il faut donc probablement, si l'on souhaite un ajustement vertical des houppiers, utiliser d'autres types de formes ou directement réaliser l'ajustement soit au sein de représentations discrètes (cellules 3D) du peuplement, soit dans le cadre d'une approche surfacique. Se pose dans tous les cas le problème du bornage horizontal et vertical des ajustements géométriques par quelques variables caractéristiques simples du houppier.

Il faut également insister sur la forte interaction qu'il y a entre le volume de houppier et le paramètre *LAD*. En effet, le *LAD* est une densité de surface foliaire, ce qui signifie que la quantité effective de feuilles dépend directement du volume du houppier. Le paramètre *LAD*, dans tRAYci, a donc une valeur synthétique qui regroupe différents aspects sans les distinguer explicitement :

- L'approximation réalisée sur le volume effectivement occupée par le feuillage (enveloppe géométrique utilisée).
- La densité de surface foliaire effective.
- La densité en éléments non foliaires (branches).
- Les différents aspects de la distribution du feuillage (agrégation, distribution zénithale et azimutale).

La valeur ajustée intègre donc l'ensemble de ces aspects. C'est une limite du modèle tRAYci qui conduit à envisager le *LAD* comme un paramètre d'ajustement plutôt que comme une variable à mesurer. Ainsi une mesure de la densité de surface foliaire effective ne correspondrait pas exactement au paramètre utilisé. Sur ce point d'autres modèles (en particulier les modèles discrets) permettent une prise en compte séparée des différents aspects, et donc de mieux distinguer l'effet des différentes hypothèses effectuées, tout en utilisant des paramètres ayant une signification biologique et géométrique plus claire. Il reste cependant à déterminer ces paramètres plus nombreux, ce qui n'est pas aisé.

Enfin, il faut revenir sur le cas particulier des cépées. La représentation utilisée ne tient pas compte explicitement de ce cas. Pour ce travail, nous avons utilisé un unique houppier par cépée, afin de minimiser le temps de mesure et de produire des houppiers adaptés à la représentation utilisée. Cependant nous avons vu au chapitre III, que ce choix peut avoir des conséquences pour l'estimation des caractéristiques du houppier à partir du diamètre à 1,30 m. Du point de vue théorique, il serait donc plus judicieux d'utiliser un houppier par brin de cépée. Cependant se pose alors le problème de distinguer de façon non équivoque le houppier des différents brins d'une cépée. Nous n'avons donc malheureusement pas de solution complètement satisfaisante à proposer sur ce point. L'erreur commise par l'utilisation d'un houppier par cépée semble malgré tout relativement limitée dans notre cas, où les cépées sont pourtant nombreuses : cela ne semble pas avoir eu d'effet évident sur les simulations de l'éclairage relatif.

3. Prise en compte de l'essence

Les espèces ont des comportements différents, qu'il est nécessaire d'étudier pour comprendre le fonctionnement des peuplements mélangés. Ces différences de tempéraments se manifestent par des différences dans leur développement et dans leur aptitude à la compétition, exprimées par la géométrie globale des houppiers (forme et distribution foliaire).

Dans le cadre de ce travail, nous avons traité l'effet espèce de façon partielle : nous avons distingué les espèces pour l'établissement des relations entre caractéristiques géométriques du houppier et diamètre à 1,30 m (discutées précédemment), ainsi que pour l'analyse de la forme de l'extension latérale des houppiers, mais nous avons utilisé une unique valeur de *LAD* pour toutes les essences.

Du point de vue de la structure géométrique des houppiers, nous avons mis en évidence des différences marquées entre espèces, qui vont dans le même sens que les relations entre variables caractéristiques du houppier et diamètre à 1,30 m des arbres. Les quatre critères analysés indiquent une plasticité relativement forte de la forme du houppier quelque soit l'essence, les essences du taillis (charme, érable champêtre et tilleul) montrant une variabilité globalement plus importante. Le phénomène le plus évident est la diminution de la variabilité de la forme des houppiers lorsque le diamètre à 1,30 m augmente, indiquant une dominance clairement structurée en fonction de cette variable. Mais comme précédemment, le dispositif, du fait de sa structure, de la présence ultra majoritaire du charme et de la place respective des différentes essences dans le peuplement, ne nous a pas permis de séparer clairement les effets respectifs du comportement de chaque espèce et du statut social des arbres concernés. Le dispositif ne permet donc pas d'analyser complètement et de façon non équivoque les différences de comportement des essences du point de vue de la géométrie de leur houppier.

Pour le paramètre *LAD*, nous souhaitions à l'origine utiliser une valeur pour chaque essence. Dans cette idée nous avons réalisé des tests pour évaluer la faisabilité d'une mesure du *LAD* à l'échelle d'un houppier sur notre dispositif. Nous avons conclu que la détermination de valeurs valides de *LAD* nécessitait une mise au point conséquente et non négligeable en terme de coût. Du fait de la dominance très marquée du charme en nombre de tiges, et de l'absence (ou de la présence très limitée) d'essences à feuillage très clair, nous avons considéré que cet aspect n'était pas prioritaire. Ainsi le dispositif ne nous apparaît pas adapté à l'étude de l'influence du *LAD* des différentes espèces sur l'éclairement relatif. Un peuplement bien adapté à cette analyse particulière, comporterait un nombre plus faible d'essences, mais qui seraient présentes en proportions équilibrées. De plus il serait souhaitable d'avoir des essences plus diversifiées en terme de feuillage, comme par exemple un mélange hêtre / frêne.

Nous avons donc opté pour une unique valeur de *LAD* pour toutes les espèces, calibrée à partir d'une estimation indépendante de l'éclairement, obtenue par des photographies hémisphériques. Lors de ce calibrage, nous avons cependant testé une méthode d'optimisation multicritère, afin de calibrer des *LAD* par espèce. Mais cette tentative n'a pas abouti. En effet, l'introduction de *LAD* par espèce ne permettait pas de réduire significativement la variabilité de la relation entre simulation de l'éclairement et photographies hémisphériques. Cela est probablement dû là encore à la composition spécifique non équilibrée du peuplement : une éventuelle différence de *LAD* pour une essence minoritaire a moins d'influence que l'imprécision locale de représentation de certains houppiers. Cependant il semble que les essences majoritaires (charme, hêtre, érables, tilleul) aient des densités de surface foliaire relativement proches en moyenne. De plus il est possible que la variabilité inter-arbre soit supérieure aux différences moyennes entre ces espèces. Au final, nous avons constaté que l'utilisation d'une unique valeur de *LAD* permettait d'obtenir des simulations de l'éclairement

relatif bien reliées aux mesures effectuées par les capteurs de lumière. L'hypothèse semble donc relativement justifiée dans notre cas précis.

C. Caractérisation de l'éclairement

1. Les photographies hémisphériques

Le protocole de prise de vue des photographies hémisphériques pratiqué dans notre laboratoire a été amélioré, de façon à pouvoir désormais utiliser un appareil numérique et à automatiser au maximum le processus de prise et de traitement des photographies. Ainsi nous avons mis au point un système complet permettant le repérage automatique du nord sur les photographies, l'autostabilisation de l'appareil à l'horizontale et le déclenchement à distance. En particulier cela permet de pouvoir prendre des photographies en hauteur (jusqu'à huit mètres actuellement). Nous avons également progressé sur la standardisation des conditions de prise de vue et de seuillage. Cependant il reste encore à standardiser l'exposition afin de rendre la méthode plus fiable et de gagner en répétabilité. Même si la plupart des améliorations effectuées ont déjà été proposées dans littérature (*Frazer et al. 2001, Frazer et al. 1997, Inoue et al. 2004, Walter 2000*), nous avons réalisé un travail d'adaptation de ces méthodes à notre matériel afin d'obtenir un protocole complètement opérationnel.

En ce qui concerne le seuillage des photographies, nous avons effectué un certain nombre de tests pour améliorer la robustesse de l'opération. L'utilisation d'un seuillage conservatif vis-à-vis du feuillage nous a permis de réduire la zone d'incertitude aux éclairements relatifs inférieurs à 10 %. Il faut d'ailleurs signaler que l'immense majorité des études proposant une comparaison des photographies hémisphériques avec des mesures de capteurs n'ont pas ou peu de points dans cette gamme d'éclairement, et que l'écart observé pour les rares points existants va le plus souvent dans le sens d'une surestimation de l'éclairement par les photographies hémisphériques, évidente dans notre cas du fait d'un grand nombre d'observations dans cette gamme. Nous avons expliqué cette tendance par des problèmes d'exposition que nous avons rencontrés sous couvert fermé. Il faudrait analyser de façon plus poussée ce phénomène afin de déterminer s'il s'agit bien d'un problème de standardisation de l'exposition que l'on peut résoudre (par exemple avec une exposition réglée sur la brillance du ciel), ou si cela correspond à un défaut plus fondamental de la méthode.

Il faut également noter que la technique du seuillage est en plein développement et plusieurs auteurs ont proposé relativement récemment des méthodes assez novatrices. Ainsi *Wagner 1998* et *Ishida 2004* ont proposé des méthodes de calibrage des photographies respectivement en niveaux de gris et en couleur à partir de l'exposition des prises de vues. Dernièrement *Nobis et Hunziker 2005* ont proposé une méthode de seuillage automatisée par détection des contours de la végétation. Cette dynamique actuelle visant à améliorer le seuillage des photographies répond à un besoin de standardisation de cette étape critique de la méthode des photographies hémisphériques. Il serait intéressant de tester et de comparer ces approches dans un grand nombre de situations, par rapport à d'autres méthodes d'estimation de l'éclairement relatif.

D'autre part l'utilisation de photographies numériques semble se généraliser pour des raisons de coût et d'efficacité. Plusieurs auteurs se sont récemment intéressés à la fiabilité de cette approche (*Englund et al. 2000, Frazer et al. 2001, Inoue et al. 2004*). Nous avons nous-même corroboré certaines observations faites par ces auteurs (aberrations chromatiques en particulier). Mais ce domaine est en pleine évolution, en particulier en ce qui concerne la résolution des photographies. Seul l'objectif Fisheye (le Nikon FC-E8, à notre connaissance l'unique modèle couvrant 180° disponible pour le numérique) en lui-même ne semble pas profiter d'évolution technologique, ce qui

est dommage, étant donné qu'une bonne partie des défauts constatés sur les photographies ont des causes optiques probablement liées à l'objectif. D'une façon générale d'autres travaux seront nécessaires pour évaluer l'apport des différents progrès techniques et méthodologiques pour l'estimation de l'éclairement relatif à l'aide de photographies hémisphériques.

2. Le modèle tRAYci

Comme nous l'avons indiqué au chapitre II, le modèle tRAYci n'avait été validé que sur des peuplements résineux. Ce travail complète donc le domaine d'application effectif du modèle en fournissant une validation en peuplement feuillu hétérogène. Signalons qu'en DEA (*Piboule 2001*) nous avons utilisé ce même modèle sur deux peuplements réguliers, l'un de hêtres et l'autre de bouleaux.

Malheureusement nous n'avons pas eu la possibilité d'évaluer le modèle de façon poussée à différentes hauteurs (en dehors des photographies hémisphériques utilisées pour le calibrage du *LAD*). Il faut malgré tout signaler qu'un intérêt majeur de ce type d'outils est de permettre l'estimation de l'éclairement en tous points du peuplement, et en particulier de fournir des profils verticaux d'éclairement.

Nous avons choisi le modèle tRAYci en grande partie pour la forme de houppier utilisée et pour son adaptation à notre démarche. Cependant il faut signaler quelques limites de ce modèle en particulier, qui peuvent avoir leur importance pour d'autres questions scientifiques :

- Il ne fournit pas de valeur absolue du PPF, ce qui peut être gênant lorsque l'on s'intéresse à la quantité effective de lumière et non à l'éclairement relatif.
- Le pas de temps de simulation est de minimum une journée, ce qui ne permet pas d'obtenir des courbes journalières d'éclairement.
- Les rediffusions ne sont pas prises en compte. Dans le domaine du PAR cette approximation a peu d'influence dans l'immense majorité des cas, en particulier lorsque l'on ne simule l'éclairement pour des points suffisamment éloignés des houppiers. En revanche, cela rend le modèle inadapté à l'analyse du bilan énergétique global. En effet, dans ce cas il faut prendre en compte les longueurs d'ondes infrarouges pour lesquelles les rediffusions ont une importance considérable.

3. Les indices dendrométriques

Nous avons évalué l'utilisation d'indices faisant intervenir la surface terrière locale pour prédire l'éclairement relatif en un point, dans le but de caractériser la variabilité de l'éclairement sous couvert à partir uniquement du diamètre à 1,30 m et de la position des arbres. Si cette approche semble prometteuse en peuplements relativement homogènes (cf. travaux de *Comeau 2000, Hale 2003, Sonohat et al. 2004*), elle apparaît peu pertinente dans le cas de peuplements présentant une structure verticale marquée, où il semble indispensable de prendre en compte un minimum de caractéristiques des houppiers.

D. Apports, limites et perspectives de la démarche de reconstruction des houppiers par minimisation des recouvrements

1. Intérêt de la méthode

Le principal apport de notre travail est la mise au point d'une méthode originale de reconstruction des houppiers par minimisation des recouvrements effectifs entre houppiers (approche anisotrope, décrite en détail au chapitre IV). Cette approche permet d'obtenir une simulation non biaisée de l'éclairement relatif sous-couvert, à l'aide du modèle de lumière tRAYci, à partir de la position du centre des houppiers, du diamètre à 1,30 m des arbres et de leur espèce. Pour cela il faut disposer de relations (par espèce) permettant d'obtenir la hauteur totale, la longueur verticale du houppier et le rayon équivalent (rayon d'un cercle dont l'aire est égale à la surface projetée) du houppier. Ainsi les mesures des caractéristiques du houppier, et en particulier de son extension latérale peuvent être réalisées sur un échantillon limité d'arbres. Cependant il faut garder à l'esprit que le modèle tRAYci nécessite en plus de ces données une valeur pour le paramètre *LAD*, théoriquement dépendante de l'espèce.

L'approche anisotrope proposée montre une nette supériorité par rapport à l'approche isotrope consistant à affecter un rayon moyen (le rayon équivalent) à chaque houppier. En effet, le fait d'utiliser des houppiers circulaires conduit à un recouvrement artificiel des houppiers reconstruit, et donc à une sous-estimation du volume total occupé par les houppiers à l'échelle du couvert. Cela a pour conséquence une surestimation plus ou moins forte de l'éclairement relatif sous couvert selon la structure locale du peuplement et le degré de compétition entre les arbres.

Nous avons testé l'utilisation du centre du tronc comme centre de reconstruction pour le houppier. Cependant, dans le contexte très dense et compressé de notre dispositif, de nombreux arbres ont leur centre de houppier très excentré (arbres penchés, ou très fortement dominés). De ce fait l'utilisation d'un centre de houppier éloigné du centre réel conduit également à des recouvrements artificiels entre houppiers, mais dans une mesure moindre que dans le cas de l'approche isotrope. Dans des contextes de compétition moins sévère, l'utilisation du centre du tronc pour la reconstruction serait probablement moins pénalisante. Un compromis intéressant, afin d'éviter de mesurer systématiquement la position du centre de houppier, consiste à ne la prendre en compte que lorsque celui-ci est clairement excentré (plus de deux mètres du tronc par exemple).

En outre, il faut rappeler que la méthode proposée ne permet pas d'estimer avec précision la forme d'un houppier à l'échelle individuelle. Ainsi la reconstruction des houppiers par minimisation des recouvrements est valide à l'échelle du couvert uniquement. En effet la compétition pour l'espace entre houppiers est gérée par le diamètre à 1,30 des arbres correspondants. Ainsi, si nous considérons un couple d'arbres en compétition, rien ne garantit que l'arbre qui sera dominant dans la version reconstruite (celui qui a le diamètre le plus grand) sera le même que dans la réalité. Par contre l'algorithme tente d'éviter au maximum que les deux houppiers se chevauchent.

Pour les mêmes raisons l'algorithme a spontanément tendance à surestimer l'asymétrie des arbres en bordure de trouée. En effet, pour un arbre soumis à une forte compétition, la trouée constitue un espace disponible. Ainsi les houppiers soumis à une forte compétition et situés en bordure d'une trouée ont une tendance à s'excentrer vers celle-ci. Or, dans la réalité, la trouée est apparue à une certaine date. Avant cette date, l'arbre ne disposait pas de l'espace en question. En revanche, l'algorithme reconstruit les houppiers à un instant donné et, pour un houppier en bordure, c'est comme si l'espace avait toujours été disponible. La version reconstruite est donc en général plus

excentrée vers la trouée que la version mesurée. Il y a cependant deux limites à cet effet. Tout d'abord le houppier ne s'excentre que si un arbre de diamètre supérieur l'y oblige. Ensuite la condition d'asymétrie (paramètre $C_{E,max}$ de l'algorithme) empêche un houppier donné d'être trop déséquilibré dans une unique direction.

Il faut signaler que nous avons découvert *a posteriori* dans la littérature (Grote 2003) une méthode similaire à l'approche anisotrope que nous avons développée. Cette méthode présente de fortes similarités avec la nôtre, mais diffère sur plusieurs points. En particulier, le travail de Grote 2003 n'est pas axé sur l'estimation de l'éclairement et s'intéresse à la reconstitution de houppiers valides à l'échelle individuelle. De plus, le mode de détermination de rayons de houppiers diffère (la hauteur H_m n'est pas fixée *a priori*, les compétiteurs sont considérés dans un angle restreint pour chaque rayon). Enfin, la méthode proposée par Grote 2003 repose sur la notion de rayon potentiel (relié au diamètre à 1,30 m). Les recouvrements sont totalement évités, ce qui implique qu'un arbre donné n'atteint pas forcément son potentiel. Dans notre cas nous avons choisi de contraindre chaque houppier à atteindre son volume cible. Ce dernier point nous suggère que la méthode proposée par Grote 2003 risque d'aboutir au même type de biais que ceux rencontrés avec la méthode isotrope dans le cadre d'une simulation de l'éclairement relatif, causés par une sous estimation du volume total des houppiers à l'échelle du peuplement. Cela resterait cependant à vérifier. Ainsi une comparaison de notre algorithme avec celui proposé par Grote 2003 mériterait d'être réalisée sur un même peuplement.

D'autres approches proposent un échantillonnage systématique du couvert, indépendamment de arbres individuels (Sumida 1993, 1995). Pour chaque point d'une maille, la distribution verticale est relevée. Ces méthodes sont relativement lourdes à mettre en œuvre, mais pourraient être utilisées pour valider à l'échelle du couvert les peuplements reconstruits à l'aide de l'algorithme.

2. Améliorations envisagées

a. *Prise en compte de la variabilité des caractéristiques du houppier*

Au chapitre IV, nous avons constaté que l'utilisation de relations permettant d'obtenir les caractéristiques du houppier à partir du diamètre à 1,30 m pour la reconstruction des houppiers, sans tenir compte de la variabilité des différentes grandeurs prédites, aboutissait à une perte de stratification verticale au sein du couvert. Il faudrait donc envisager d'inclure cette variabilité lors de la reconstruction d'un peuplement.

Une première solution est d'introduire un effet aléatoire lors de l'estimation des variables concernées. Si cela devrait permettre d'améliorer la représentation à l'échelle du peuplement, localement, cela risque d'accentuer les erreurs de positionnement relatif des houppiers. Malgré cette limite, la relative simplicité de cette amélioration potentielle incite à la tester. En effet, celle-ci peut permettre un gain en qualité pour la simulation de l'éclairement à l'échelle de la parcelle à moindre coût.

Une seconde possibilité, plus complexe, serait de gérer directement la variabilité des grandeurs prédites au sein de l'algorithme de reconstruction, en fonction de la compétition subie par les houppiers. Ainsi on pourrait envisager que le rayon équivalent, la hauteur totale et la longueur verticale de houppier puissent varier, à diamètre à 1,30 m fixe, selon une densité de probabilité autour de l'ajustement. La détermination de l'écart à la valeur prédite pour chacune des trois variables serait alors conditionnée par la compétition subie par le houppier. Une telle adaptation de

l'algorithme, qui permettrait probablement une nette amélioration de la reconstruction et une diminution des recouvrements entre houppiers, constitue en elle-même un travail à part entière. En effet cela nécessite de définir de quelle façon la compétition en trois dimensions, que subit un houppier, affecte les différentes caractéristiques de son houppier, sachant que ces variables interagissent dans la délimitation du volume de houppier.

Une troisième voie serait d'envisager l'ajustement en trois dimensions du houppier à son voisinage, aussi bien dans le plan horizontal que dans le plan vertical. Cependant cette possibilité implique une réécriture complète de l'algorithme, et nécessite comme pour la précédente une analyse poussée des interactions entre houppiers.

b. Modification de la géométrie de reconstruction

Une amélioration possible, relativement rapide à mettre en place, serait de permettre dans l'algorithme l'utilisation de paramètres de forme (E_{sup} , et E_{inf}) différents de 2. Cela permettrait d'envisager la reconstruction de houppiers pour des essences où cette valeur paraît inadaptée (conifères par exemple). De plus cela permettrait de tester l'effet du paramètre de forme sur la qualité de reconstruction d'un peuplement. Ainsi il est probable que l'utilisation d'une courbure moins marquée permette de réduire le nombre d'intersections rencontrées par les houppiers, en particulier entre des arbres de hauteurs nettement différentes. Cela peut aboutir à la diminution du recouvrement entre houppiers.

D'autre part, il serait souhaitable d'analyser plus finement l'écart entre centre du tronc et centre du houppier, en fonction du voisinage. Ainsi il serait intéressant de pouvoir prédire la position du centre de houppier à partir de des caractéristiques de l'arbre concerné de celles de ses voisins. Cependant cette approche risque de poser problème près des trouées, de la même façon que pour l'extension du houppier. Ainsi nous risquons d'obtenir un excentrement systématique des houppiers vers les trouées, exagéré par rapport à la réalité.

Enfin nous pourrions envisager une prise en compte plus poussée de l'essence dans l'algorithme de reconstruction. Ainsi nous pourrions définir des conditions d'asymétrie différentes selon l'espèce. De même, peut-être faudrait-il prendre en compte l'essence en plus du diamètre pour déterminer la dominance relative des arbres. Pour tout cela il faut avoir des données sur la compétition pour l'espace entre houppiers d'essences identiques ou différentes. Un certain nombre de travaux récents se sont intéressés à ce champ de recherche (*Frech et al. 2003, Haywood 2002, Muth et Bazzaz 2003*) et pourraient servir de fondement à ces développements.

c. Vers une reconstruction plus intégrée des peuplements

Dans ce travail nous avons utilisé l'algorithme de reconstruction des houppiers à partir de la position et du diamètre mesurés des arbres. Mais il serait encore plus intéressant de pouvoir s'affranchir de la spatialisation des tiges. Ainsi il faudrait coupler notre approche à des travaux visant à obtenir des distributions réalistes des arbres à partir de données d'inventaires, comme celles proposées par *Goreaud et al. 2004, Zenner et Hibbs 2000*.

Dans le cadre de peuplement comportant des trouées, nous pourrions également envisager de reconstruire des peuplements fermés réalistes, et de recréer des trouées à partir de l'analyse de photographies aériennes ou de délimitation au GPS. Plus précisément, à partir du contour des trouées (délimité par le bord des houppiers) nous pourrions créer des volumes d'exclusion, pris en compte dans l'algorithme de reconstruction, afin d'éviter un excentrement excessif des houppiers

reconstruits dans les trouées. Il est également possible de localiser uniquement les arbres formant le contour des trouées, ainsi que les arbres isolés inclus dans celles-ci, et de reconstituer la position des arbres du peuplement fermé.

Ces différentes pistes permettent d'envisager l'utilisation de l'algorithme mis au point, dans le cadre de l'évaluation de l'effet de la structure du peuplement sur l'éclairement sous couvert.

Conclusion

Dans ce travail nous avons montré qu'il est possible de réduire le jeu de données nécessaire à l'alimentation d'un modèle de lumière représentant les houppiers individuellement, dans le cadre d'une utilisation dans un peuplement hétérogène feuillu sur plateau calcaire. Ainsi nous proposons de mesurer les variables caractéristiques du houppier (hauteur totale, hauteur de base et rayon équivalent du houppier) uniquement sur un échantillon d'arbres pour chaque essence. Ces variables ont montré de bonnes liaisons avec le diamètre à 1,30 m des arbres. Ces relations, que nous avons établies pour les arbres mesurés, permettent de reconstituer la géométrie en trois dimensions du peuplement complet en connaissant uniquement l'essence, le diamètre à 1,30 m et la position des arbres.

Nous avons en particulier mis au point un algorithme permettant d'effectuer cette reconstruction en tenant compte de la compétition entre les houppiers pour l'espace. Cet algorithme permet de minimiser le recouvrement entre les houppiers, qui conduit à une surestimation artificielle de l'éclairement relatif sous couvert. Nous avons vérifié que cette approche anisotrope permet d'obtenir des simulations non biaisées de la distribution de l'éclairement sous couvert, à condition de connaître la position du centre des houppiers lorsque celui-ci est très éloigné du centre du tronc à 1,30 m.

Nous avons également montré que l'utilisation de houppiers isotropes (latéralement) dans le contexte hétérogène étudié, conduit à un biais très prononcé dans la distribution de l'éclairement. Ce résultat justifie la prise en compte de l'anisotropie de l'extension latérale du houppier et donc l'utilisation d'un modèle de lumière, tRAYci, dans lequel l'enveloppe du houppier autorise cette anisotropie.

D'autre part nous avons testé une approche consistant à relier directement la distribution locale de la surface terrière à l'éclairement sous couvert, afin d'obtenir la distribution de celui-ci à l'échelle de la parcelle. Malheureusement cette approche dendrométrique est apparue inefficace dans le peuplement étudié et semble peu pertinente pour l'analyse de peuplements irréguliers du point de vue de la taille des arbres (hauteur, diamètre).

Le peuplement étudié présente une forte hétérogénéité sous la forme d'un mélange d'essences, d'une structuration verticale marquée et de la présence de trouées de tailles variées, ainsi que des zones très fermées où règne une compétition intense entre les houppiers. Ces différents niveaux d'hétérogénéité nous ont permis de valider notre approche dans un contexte particulièrement complexe présentant une grande partie de la diversité structurale rencontrée dans les systèmes hétérogènes en général. Nous avons donc de bonnes raisons de croire que notre approche est utilisable dans bon nombre de peuplements hétérogènes. Cependant, une validation vis-à-vis d'autres méthodes d'estimation de l'éclairement dans d'autres contextes serait souhaitable (en particulier dans le cas d'une structuration verticale encore plus marquée ou de la présence d'autres essences). Il faudrait envisager de légères modifications de l'algorithme pour être en mesure de modéliser certains types de résineux à houppiers plutôt coniques, tels que l'épicéa. Il serait également souhaitable d'étudier plus précisément l'influence du paramètre définissant la densité de surface foliaire affectée aux houppiers (le *LAD*) sur les simulations de la distribution de l'éclairement et en particulier sa variabilité interspécifique, non abordée dans ce travail.

L'allègement des mesures induites par la démarche proposée permet d'ores et déjà d'envisager son application pour l'utilisation de modèles de lumière dans des cas où l'on dispose de jeux de données partiels (essence, diamètre et position des troncs). Il faudra cependant prévoir d'établir ou de vérifier les relations entre caractéristiques du houppier et diamètre à 1,30 m, dans les contextes sylvicoles et stationnels considérés. Malgré cette nécessité, l'approche proposée permet d'envisager l'utilisation de modèles de lumière de façon considérablement plus accessible que s'il fallait, comme nous l'avons fait, réaliser la caractérisation détaillée de tous les arbres et en particulier de leurs houppiers.

A plus long terme, le couplage de notre algorithme à des modèles de distribution réalistes des troncs à l'échelle de la parcelle et/ou à des modèles de croissance laisse entrevoir des perspectives encore plus intéressantes. Premièrement, cela rendrait possible la simulation de la distribution de l'éclairement avec un jeu de données encore plus restreint, à savoir des distributions non spatialisées en nombre de tiges par essence et classes de diamètre voire de contours de trouées issus de photographies aériennes ou réalisées à l'aide de systèmes de positionnement sur le terrain (GPS). Deuxièmement, il serait possible de cette façon de créer des peuplements virtuels à partir de distributions théoriques (en diamètre et essence), issues de peuplements réels ou obtenues par simulation dans des modèles de croissance. Il serait alors possible de tester un grand nombre de structures forestières et de comparer des systèmes sylvicoles variés.

A terme le couplage ces approches à des typologies de peuplements ou des descripteurs de structures de peuplement, permettrait de fixer des indicateurs de gestion utilisables par le gestionnaire dans des systèmes hétérogènes.

Bibliographie

- Ackerly, D. D. et Bazzaz, F. A., 1995. **Seedling crown orientation and interception diffuse radiation in tropical forest gaps**. *Ecology* 76 (4), p. 1134-1146.
- Anderson, M. C., 1964. **Studies of the woodland light climate. I. The photographic computation of light conditions**. *Journal Of Ecology* 52, p. 27-41.
- Aries, F., Prevot, L. et Monestiez, P., 1993. **Geometrical canopy modelling in radiation simulation studies**. in: *Crop structure and light microclimate : Characterization and applications*, Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R. et Sinoquet, H. (Ed.), INRA, Versailles, p. 159-173.
- Bachelet, F. et Lanter, O., 2004. **Typologie des peuplements forestiers feuillus des plateaux calcaires de Lorraine**. MAAPAR, SERFOB Lorraine, Conseil Régional de Lorraine, ONF DT Lorraine, CRPF Lorraine-Alsace, 50 p.
- Ballaré, C. L., Scopel, A. L. et Sanchez, R. A., 1995. **Plant photomorphogenesis in canopies, crop growth, and yield**. *Hortscience* 30 (6), p. 1172-1181.
- Barnes, P. W., Ballaré, C. L. et Caldwell, M. M., 1996. **Photomorphogenic effects of UV-B radiation on plants: consequences for light competition**. *Journal Of Plant Physiology* 148, p. 15-20.
- Bartelink, H. H., 1995. **MAPFLUX : a spatial model of light transmission through forest canopies**. Hinkeloord Report, 15, Department of Forestry, Agricultural University, Wageningen, Netherlands., 31 p.
- Barthélémy, D., Blaise, F., Fourcaud, T. et Nicolini, E., 1995. **Modélisation et simulation de l'architecture des arbres : bilan et perspectives**. *Revue Forestière Française* (XLVII, numéro spécial 1995), p.
- Bebber, D., Brown, N., Speight, M., Moura-Costa, P. et Sau Wai, Y., 2002. **Spatial structure of light and dipterocarp seedling growth in a tropical secondary forest**. *Forest Ecology and Management* 157, p. 65-75.
- Beckage, B. et Clark, J. S., 2003. **Seedling survival and growth of three forest tree species: The role of spatial heterogeneity**. *Ecology* 84 (7), p. 1849-1861.
- Bégué, A., Prince, S. D., Hanan, N. P. et Roujean, J. L., 1996. **Shortwave radiation budget of sahelian vegetation .2. Radiative transfer models**. *Agricultural and Forest Meteorology* 79 (1-2), p. 97-112.
- Bellow, J. G. et Nair, P. K. R., 2003. **Comparing common methods for assessing understory light availability in shaded-perennial agroforestry systems**. *Agricultural and Forest Meteorology* 114, p. 197-211.
- Berbigier, P. et Bonnefond, J. M., 1995. **Measurement and modelling of radiation transmission within a stand of maritime pine (Pinus pinaster)**. *Annales des Sciences Forestieres* 52 (1), p. 23-42.
- Boissard, P., Valery, P., Akkal, N., Helbert, J. et Lewis, P., 1997. **Paramétrisation d'un modèle architectural de blé au cours du tallage. Estimation des paramètres de structure par photogrammétrie**. *Actes du séminaire sur la modélisation architecturale (10 au 12 mars 1997, Paris)*, p. 213-219.
- Bonhomme, R., 1974. **Détermination des profils d'indice foliaire et de rayonnement dans un couvert végétal à l'aide de photographies hémisphériques faites in situ**. *Thèse de Docteur-Ingénieur, Université d'Aix-Marseille*.
- Bonhomme, R., 1976. **Détermination des profils d'indice foliaire et de rayonnement dans un couvert végétal à l'aide de photographies hémisphériques faites in situ**. *Annales agronomiques* 27 (1), p. 33-59.

- Bonhomme, R. et Chartier, P., 1972. **The interpretation and automatic measurement of hemispherical photographs to obtain sunlit foliage area and gap frequency.** *Israel Journal of Agricultural Research* 22 (2), p. 53-61.
- Boquera, M. E., Baret, F., Chelle, M., Aries, F. et Andrieu, B., 1997. **Modélisation 3D du maïs pour la simulation de la réflectance.** *Actes du séminaire sur la modélisation architecturale (10 au 12 mars 1997, Paris)*, p. 89-98.
- Boudon, F., Prusinkiewicz, P., Federl, P., Godin, C. et Karwowski, R., 2003. **Interactive design of bonsai tree models.** *Computer Graphics Forum* 22 (3), p. 591-599.
- Brang, P., 1998. **Early seedling establishment of Picea abies in small forest gaps in the Swiss Alps.** *Canadian Journal Of Forest Research* 28, p. 626-639.
- Breda, N., 1999. **L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel.** *Revue Forestière Française* 2 (LI), p. 135-150.
- Brisson, J. et Reynolds, J. F., 1994. **The Effect of Neighbors on Root Distribution in a Creosotebush (Larrea-Tridentata) Population.** *Ecology* 75 (6), p. 1693-1702.
- Brock, T. D., 1981. **Calculating solar radiation for ecological studies.** *Ecological Modelling* 14, p. 1-19.
- Brown, N., Jennings, S., Wheeler, P. et Nabe-Nielsen, J., 2000. **An improved method for the rapid assessment of forest understorey light environments.** *Journal of Applied Ecology* 37, p. 1044-1053.
- Brunner, A., 1998. **A light model for spatially explicit forest stand models.** *Forest Ecology and Management* 107, p. 19-46.
- Brunner, A. et Nigh, G., 2000. **Light absorption and bole volume growth of individual Douglas-fir trees.** *Tree Physiology* 20, p. 323-332.
- Canham, C. D., 1988a. **Growth and canopy architecture of shade-tolerant trees: response to canopy gaps.** *Ecology* 69 (3), p. 786-795.
- Canham, C. D., 1988b. **An index for understory light levels in and around canopy gaps.** *Ecology* 69 (5), p. 1634-1638.
- Canham, C. D., 1989. **Different responses to gaps among shade-tolerant tree species.** *Ecology* 70 (3), p. 548-550.
- Canham, C. D., Coates, K. D., Bartemucci, P. et Quaglia, S., 1999. **Measurement and modelling of spatially explicit variation in light transmission through interior cedar-hemlock forests of British Columbia.** *Canadian Journal Of Forest Research* 29, p. 1775-1783.
- Canham, C. D., Denslow, J. S., Platt, W. J., Runkle, J. R., Spies, T. A. et White, P. S., 1990. **Light regimes beneath closed canopies and tree-fall gaps in temperate and tropical forests.** *Canadian Journal Of Forest Research* 20, p. 620-631.
- Capers, R. S. et Chazdon, R. L., 2004. **Rapid assessment of understory light availability in a wet tropical forest.** *Agricultural and Forest Meteorology* 123 (3-4), p. 177-185.
- Catovsky, S. et Bazzaz, F. A., 2002. **Feedbacks between canopy composition and seedling regeneration in mixed conifer broad-leaved forests.** *Oikos* 98 (3), p. 403-420.
- Cescatti, A., 1997. **Modelling the Radiative transfer in discontinuous canopies of asymmetric crowns. I. Model structure and algorithms.** *Ecological Modelling* 101, p. 263-274.
- Chadzon, R. L. et Pearcy, R. W., 1991. **The importance of sunflecks for forest understory plants.** *Biological Sciences* 41 (11), p. 760-766.
- Chartier, M., Allirand, J. M. et Varlet-Grancher, C., 1992. **Le bilan radiatif d'un couvert végétal : ses composantes et leur mesures.** *Cahiers des techniques de l'INRA. Bulletin de liaison interne* (29), p. 17-40.
- Chartier, M., Allirand, J. M. et Varlet-Grancher, C., 1993a. **Canopy radiation balance : its components and their measurement.** in: *Crop structure and light microclimate : Characterization and applications*, Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R. et Sinoquet, H. (Ed.), p. 29-43.

- Chartier, M., Allirand, J. M. et Varlet-Grancher, C., 1993b. **Characteristics of currently sold radiation measurement devices.** in: *Crop structure and light microclimate : Characterization and applications, Appendix 2*, Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R. et Sinoquet, H. (Ed.), p. 513-518.
- Chartier, M., Bonchretien, P., Allirand, J. M. et Gosse, G., 1989. **Utilisation des cellules au silicium amorphe pour la mesure du rayonnement photosynthétiquement actif (400-700 nm).** *Agronomie* 9, p. 281-284.
- Chelle, M. et Andrieu, B., 1999. **Radiative models for architectural modeling.** *Agronomie* 19, p. 225-240.
- Chen, J. M., Black, T. A. et Adams, R. S., 1991. **Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand.** *Agricultural and Forest Meteorology* 56, p. 129-143.
- Chen, S. G., Ceulemans, R. et Impens, I., 1994. **A fractal-based Populus canopy structure model for the calculation of light interception.** *Forest Ecology and Management* 69, p. 97-110.
- Cluzeau, C., Dupouey, J. L. et Courbaud, B., 1995. **Polyhedral representation of crown shape. A geometric tool for growth modelling.** *Annales des Sciences Forestières* 52, p. 297-306.
- Collins, B. S. et Battaglia, L. L., 2002. **Microenvironmental heterogeneity and *Quercus michauxii* regeneration in experimental gaps.** *Forest Ecology and Management* 155, p. 279-290.
- Comeau, P. G., 1998. **LITE : A model for estimating light under Broadleaf and Conifer tree canopies.** Extension Note, 23, Ministry of Forests Research Program British Columbia, 4 p.
- Comeau, P. G., 2000. **Measuring light in forest.** Extension Note, 42, Ministry of Forests Research Program, British Columbia, 7 p.
- Comeau, P. G., Gendron, F. et Letchford, T., 1998. **A comparison of several methods for estimating light under a paper birch mixewood stand.** *Canadian Journal Of Forest Research* 28, p. 1843-1850.
- Comeau, P. G. et Heineman, J. L., 2003. **Predicting understory light microclimate from stand parameters in young paper birch (*Betula papyrifera* Marsh.) stands.** *Forest Ecology and Management* 180 (1-3), p. 303-315.
- Coombe, D. E. et Evans, G. C., 1960. **Hemispherical photography in studies of plant.** *Medical and biological illustration* 10, p. 68-75.
- Cornett, M. W., Puettmann, K. J. et Reich, P. B., 1998. **Canopy type, forest floor, predation, and competition influence conifer seedling emergence and early survival in two Minnesota conifer-deciduous forests.** *Canadian Journal Of Forest Research* 28, p. 196-205.
- Courbaud, B., 1995. **Modélisation de la croissance en forêt irrégulière. Perspectives pour les pessières irrégulières de montagne.** *Revue Forestière Française* (XLVII, numéro spécial 1995), p. 173-182.
- Courbaud, B., 1997. **Modélisation de l'éclairement et de la croissance de l'épicéa (*Picea abies* L ; Karst) en forêt irrégulière de montagne.** *Thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I.*
- Courbaud, B., De Coligny, F. et Cordonnier, T., 2003. **Simulating radiation distribution in a heterogeneous Norway spruce forest on a slope.** *Agricultural and Forest Meteorology* 116, p. 1-18.
- Dai, X., 1996. **Influence of light conditions in canopy gaps on forest regeneration : a new gap light index and its application in a boreal forest in east-central Sweden.** *Forest Ecology and Management* 84, p. 187-197.
- Dauzat, J., 1993. **Simulated plants and Radiative transfer simulations.** in: *Crop structure and light microclimate : Characterization and applications*, Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R. et Sinoquet, H. (Ed.), p. 271-278.

- Dauzat, J., 1994. **Simulation des échanges radiatifs sur maquettes informatiques de *Elaeis guineensis*. Radiative transfer simulation on computer models of *Elaeis guineensis*.** *Oléagineux* 49 (3), p. 81-90.
- De Castro, F., 2000. **Light spectral composition in tropical forest: measurement and model.** *Tree Physiology* 20, p. 49-56.
- De Castro, F. et Fetcher, N., 1998. **Three dimensional model of the interception of light by a canopy.** *Agricultural and Forest Meteorology* 90, p. 215-233.
- De Coligny, F., **Site Capsis 4.** <http://coligny.free.fr/>.
- De Coligny, F., Ancelin, P., Cornu, G., Courbaud, B., Dreyfus, P., Goreaud, F., Gourlet-Fleury, S., Meredieu, C., Orazio, C. et Saint-André, L., 2002. **Capsis: Computer-Aided Projection for Strategies In Silviculture: Open architecture for a shared forest-modelling platform.** *IUFRO Working Party S5.01-04 conference (September 2002, Harrison, British Columbia, Canada)*, p. 371-380.
- De Reffye, P., Edelin, C., Jaeger, M. et Cabart, C., 1986. **Simulation de l'architecture des arbres.** *Naturalia Monspeliensia* n°hors série, Colloque International sur l'Arbre, p. 223-240.
- De Reffye, P., Elguero, E. et Costes, E., 1991. **Growth units construction in trees: a stochastic approach.** *Acta Biotheoretica* 39, p. 325-342.
- Dhôte, J. F. et De Hercé, E., 1994. **Hyperbolic Model for Adjustment of Sets of Height Diameter Curves.** *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere* 24 (9), p. 1782-1790.
- Ducrey, M., 1975a. **Utilisation des photographies hémisphériques pour le calcul de la perméabilité des couverts forestiers au rayonnement solaire : I Analyse théorique de l'interception.** *Annales des Sciences Forestières* 32 (2), p. 73-92.
- Ducrey, M., 1975b. **Utilisation des photographies hémisphériques pour le calcul de la perméabilité des couverts forestiers au rayonnement solaire : II Etude expérimentale.** *Annales des Sciences Forestières* 32 (4), p. 205-221.
- Dufrene, E. et Breda, N., 1995. **Estimation of deciduous forest leaf area index using direct and indirect methods.** *Oecologia* 104, p. 156-162.
- Emborg, J., 1998. **Understorey light conditions and regeneration with respect to the structural dynamics of a near-natural temperate deciduous forest in Denmark.** *Forest Ecology and Management* 106, p. 83-95.
- Endler, J. A., 1993. **The color of light in forests and its implications.** *Ecological Monographs* 63 (1), p. 1-27.
- Engelbrecht, B. M. J. et Herz, H. M., 2001. **Evaluation of different methods to estimate understorey light conditions in tropical forests.** *Journal of Tropical Ecology* 17, p. 207-224.
- Englund, S. R., O'Brien, J. J. et Clark, D. B., 2000. **Evaluation of digital and film hemispherical photography and spherical densiometry for measuring forest light environments.** *Canadian Journal Of Forest Research* 30, p. 1999-2005.
- Evans, G. C. et Coombe, D. E., 1959. **Hemispherical and woodland canopy photography and the light climate.** *Journal Of Ecology* 47, p. 103-113.
- Ferment, A., Picard, N., Gourlet-Fleury, S. et Baraloto, C., 2001. **A comparison of five indirect methods for characterizing the light environment in a tropical forest.** *Annals of Forest Science* 58 (8), p. 877-891.
- Figueroa-Rangel, B. L. et Olvera-Vargas, M., 2000a. **Dinamica de la composicion de especies en bosques de *Quercus crassipes* H. et B. en Cerro Grande, Sierra de Manantlan, Mexico.** *Agrociencia* 34 (1), p. 91-97.
- Figueroa-Rangel, B. L. et Olvera-Vargas, M., 2000b. **Regeneration patterns in relation to canopy species composition and site variables in mixed oak forests in the Sierra de Manantlan Biosphere Reserve, Mexico.** *Ecological Research* 15, p. 249-261.

- Formey de Saint Louvent, E., 2003. **Caractérisation pédologique, floristique et dendrométrique d'une forêt feuillue mélangée**. Rapport de stage, Institut National de la Recherche Agronomique, Institut National Agronomique, Paris-Grignon, 20 p.
- Frazer, G. W., Canham, C. D. et Lertzman, K. P., 1999. **Gap Light Analyser (GLA), Version 2.0 : imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, user manual and program documentation. Copyright (c) 1999**. Simon Fraser University Burnaby British Columbia and the institute of Ecosystem Studies Millbrook New York, 36 p.
- Frazer, G. W., Fournier, R. A., Trofymow, J. A. et Hall, R. J., 2001. **A comparison of digital and film fisheye photography for analysis of forest canopy structure and gap light transmission**. *Agricultural and Forest Meteorology* 109, p. 249-263.
- Frazer, G. W., Trofymow, J. A. et Lertzman, K. P., 1997. **A method for estimating canopy openness, effective leaf area index, and photosynthetically active photon flux density using hemispherical photography and computerized image analysis techniques**. Information Report, BC-X-373, Pacific Forestry Centre Victoria British Columbia, 73 p.
- Frech, A., Leuschner, C., Hagemeyer, M. et Holscher, D., 2003. **Neighbor-dependent canopy dimensions of ash, hornbeam, and lime in a species-rich mixed forest (Hainich National Park, Thuringia)**. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 122 (1), p. 22-35.
- Gautier, H., Mech, R., Prusinkiewicz, P. et Varlet-Grancher, C., 2000. **3D architectural modelling of aerial photomorphogenesis in white clover (*Trifolium repens* L.) using L-systems**. *Annals of Botany* 85, p. 359-370.
- Gendron, F., Messier, C. et Comeau, P. G., 1998. **Comparison of various methods for estimating the mean growing season percent photosynthetic photon flux density in forests**. *Agricultural and Forest Meteorology* 92 (1), p. 55-70.
- Geoffroy, N., 2003. **Etude de la dynamique de régénération en forêt hétérogène de plateau calcaires en fonction des conditions de lumière**. Institut National de la Recherche Agronomique, Nancy, 19 p.
- Gersonde, R., Battles, J. J. et O'Hara, K. L., 2004. **Characterizing the light environment in Sierra Nevada mixed-conifer forests using a spatially explicit light model**. *Canadian Journal Of Forest Research* 34 (6), p. 1332-1342.
- Giuliani, R., Magnanini, E., Nerozzi, F., Muzzi, E. et Sinoquet, H., 2005. **Canopy probabilistic reconstruction inferred from Monte Carlo point-intercept leaf sampling**. *Agricultural and Forest Meteorology* 128 (1-2), p. 17-32.
- Godin, C., 2000. **Representing and encoding plant architecture: a review**. *Annals of Forest Science* 57, p. 413-438.
- Goel, N. S., Knox, L. B. et Norman, J. M., 1991. **From artificial life to real life: computer simulation of plant growth**. *International Journal of General Systems* 18, p. 291-319.
- Goreaud, F., Loussier, B., Ngo Bieng, M. A. et Allain, R., 2004. **Simulating realistic spatial Structure for forest stands : a mimetic point process**. *Actes des Journées Interdisciplinaires de Statistiques Spatiales (2 et 3 décembre 2004, Paris)*, p.
- Grace, J. C., Jarvis, P. G. et Norman, J. M., 1987. **Modelling the interception of solar radiant energy in intensively managed stands**. *New Zealand Journal of Forestry Science* 17 (2/3), p. 193-209.
- Grant, R. H., 1997. **Partitioning of biologically active radiation in plant canopies**. *International Journal Of Biometeorology* 40, p. 26-40.
- Groot, A., 2004. **A model to estimate light interception by tree crowns, applied to black spruce**. *Canadian Journal Of Forest Research* 34 (4), p. 788-799.
- Grote, R., 2003. **Estimation of crown radii and crown projection area from stem size and tree position**. *Annals of Forest Science* 60 (5), p. 393-402.

- Guyot, G., 1997. **Climatologie de l'environnement. De la plante aux écosystèmes.** Masson, Paris, 505 p.
- Hale, S. E., 2003. **The effect of thinning intensity on the below-canopy light in a Sitka spruce plantation.** *Forest Ecology and Management* 179, p. 341-349.
- Hanan, N. P., 2001. **Enhanced two-layer radiative transfer scheme for a land surface model with a discontinuous upper canopy.** *Agricultural and Forest Meteorology* 109, p. 265-281.
- Haywood, A., 2002. **Growth of advanced European beech trees in the transformation phase in the southern Black Forest.** *inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorwürde, Forstwissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität.*
- Heinemann, K., Kitzberger, T. et Veblen, T. T., 2000. **Influences of gap heterogeneity on the regeneration of *Nothofagus pumilio* in a xeric old-growth forest of northwestern Argentina.** *Canadian Journal Of Forest Research* 30, p. 25-31.
- Hill, R., 1924. **A lens for whole sky photographs.** *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 50, p. 227-235.
- Inoue, A., Yamamoto, K., Mizoue, N. et Kawahara, Y., 2004. **Effects of image quality, size and camera type on forest light environment estimates using digital hemispherical photography.** *Agricultural and Forest Meteorology* 126 (1-2), p. 89-97.
- Iqbal, M., 1983. **Introduction to solar radiation.** Academic Press, Toronto, 390 p.
- Ishida, M., 2004. **Automatic thresholding for digital hemispherical photography.** *Canadian Journal Of Forest Research* 34, p. 2208-2216.
- Jacquet, A., Racocevic, M., Varlet-Grancher, C., Simon, J. C., Christophe, A., Adam, B., De Berranger, C., Ploquin, S. et Sinoquet, H., 2000. **Méthode de digitalisation en 3 dimensions de l'architecture aérienne d'un peuplement prairial.** *Cahiers des techniques de l'INRA. Bulletin de liaison interne* 45, p. 27-34.
- Jagels, R. et Dyer, M. V., 1983. **Morphometric analysis applied to wood structure. I. Cross-sectional cell shape and area change in red spruce.** *Wood and Fiber Science* 15 (4), p. 376-386.
- Jennings, S. B., Brown, N. D. et Sheil, D., 1999. **Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures.** *Forestry* 72 (1), p. 59-74.
- Kato, K. et Yamamoto, S. I., 2000. **Effects of canopy on the sapling composition and structure in a subalpine old-growth forest, central Japan.** *Ecoscience* 7 (2), p. 237-242.
- Kimes, D. S. et Kirchner, J. A., 1982. **Radiative transfer model for heterogeneous 3-D scenes.** *Applied Optics* 21, p. 4119-4129.
- Kimes, D. S. et Smith, J. A., 1980. **Simulation of solar radiation absorption in vegetation canopies.** *Applied Optics* 19 (16), p. 2801-2811.
- Koop, H., 1989. **Forest Dynamics, SILVI-STAR : a comprehensive monitoring system.** Springer-Verlag., 229 p.
- Küppers, M., Timm, H., Orth, F., Stegemann, J., Stöber, R., Schneider, H., Paliwal, K., Karunaichamy, K. S. T. K. et Ortiz, R., 1996. **Effects of light environment and successional status on lightfleck use by understory trees temperate and tropical forests.** *Trees* 16, p. 69-80.
- Kuuluvainen, T., Hokkanen, T. J., Järvinen, E. et Pukkala, T., 1993. **Factors related to seedling growth in a boreal Scots pine stand: a spatial analysis of a vegetation-soil system.** *Canadian Journal Of Forest Research* 23, p. 2101-2109.
- Landry, R., Fournier, R. A., Ahern, F. J. et Lang, R. H., 1997. **Tree vectorization: a methodology to characterize fine tree architecture in support of remote sensing models.** *Canadian Journal of Remote Sensing* 23 (2), p. 91-107.

- LeRoux, X., Gauthier, H., Begue, A. et Sinoquet, H., 1997. **Radiation absorption and use by humid savanna grassland: assessment using remote sensing and modelling.** *Agricultural and Forest Meteorology* 85 (1-2), p. 117-132.
- LI-COR, 1982. **Radiation measurements and instrumentation.** Publication No 8208-LM, LI-COR Inc, Lincoln, NE, USA, 29 p.
- LI-COR, 1986. **LI-COR terrestrial radiation sensors, type SB, Instruction manual.** Publication No 8609-58, LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA, 28 p.
- Lieffers, V. J., Messier, C., Stadt, K. J., Gendron, F. et Comeau, P. G., 1998. **Predicting and managing light in the understory of boreal forests.** University of Alberta Canada, 34 p.
- Lieffers, V. J., Messier, C., Stadt, K. J., Gendron, F. et Comeau, P. G., 1999. **Predicting and managing light in the understory of boreal forests.** *Canadian Journal Of Forest Research* 29, p. 796-811.
- Lookingbill, T. R. et Zavala, M. A., 2000. **Spatial pattern of *Quercus ilex* and *Quercus pubescens* recruitment in *Pinus halepensis* dominated woodlands.** *Journal of Vegetation Science* 11, p. 607-612.
- Macfarlane, C., Coote, M., White, D. A. et Adams, M. A., 2000. **Photographic exposure affects indirect estimation of leaf area in plantation of *Eucalyptus globulus* Labill.** *Agricultural and Forest Meteorology* 100, p. 155-168.
- MacFarlane, D. W., Green, E. J., Brunner, A. et Amateis, R. L., 2003. **Modeling loblolly pine canopy dynamics for a light capture model.** *Forest Ecology and Management* 173, p. 145-168.
- MacFarlane, D. W., Green, E. J., Brunner, A. et Burkhart, H. E., 2002. **Predicting survival and growth rates for individual loblolly pine trees from light capture estimates.** *Canadian Journal Of Forest Research* 32, p. 1970-1983.
- Machado, J. L. et Reich, P. B., 1999. **Evaluation of several measures of canopy openness as predictors of photosynthetic photon flux density in deeply shaded conifer-dominated forest understory.** *Canadian Journal Of Forest Research* 29, p. 1438-1444.
- Madsen, P. et Larsen, J. B., 1997. **Natural regeneration of beech (*Fagus sylvatica* L.) with respect to canopy density, soil moisture, and soil carbon content.** *Forest Ecology and Management* 97, p. 97-105.
- Mariscal, M. J., Martens, S. N., Ustin, S. L., Chen, J. Q., Weiss, S. B. et Roberts, D. A., 2004. **Light-transmission profiles in an old-growth forest canopy: Simulations of photosynthetically active radiation by using spatially explicit radiative transfer models.** *Ecosystems* 7 (5), p. 454-467.
- Mariscal, M. J., Orgaz, F. et Villalobos, F. J., 2000. **Modelling and measurement of radiation interception by olive canopies.** *Agricultural and Forest Meteorology* 100 (2-3), p. 183-197.
- McCree, K. J., 1972. **The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants.** *Agricultural Meteorology* 9, p. 191-216.
- McCree, K. J., 1973. **The measurement of Photosynthetically Active Radiation.** *Solar Energy* 15, p. 83-87.
- McMurtrie, R. et Wolf, L., 1983. **A model of competition between trees and grass for radiation, water and nutrients.** *Annals of Botany* 52, p. 449-458.
- Meir, P., Grace, J. et Miranda, A. C., 2000. **Photographic method to measure the vertical distribution of leaf area density in forests.** *Agricultural and Forest Meteorology* 102, p. 105-111.
- Meloni, S., 1996. **Simulation et mesure du rayonnement transmis sous de jeunes merisiers en système agro-forestier : analyse quantitative et variabilité spatio-temporelle.** *Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Université d'Auvergne.*
- Meloni, S., 1999. **A simplified description of the tree-dimensional structure of agroforestry trees for use with a Radiative transfer model.** *Agroforestry Systems* 43, p. 121-134.

- Meloni, S. et Sinoquet, H., 1997. **Assessment of the spatial distribution of light transmitted below young trees in an agroforestry system.** *Annales des Sciences Forestières* 54, p. 313-333.
- Messier, C., Doucet, R., Ruel, J. C., Claveau, Y., Kelly, C. et Lechowicz, M. J., 1999. **Functional ecology of advance regeneration in relation to light in boreal forests.** *Canadian Journal Of Forest Research* 29 (6), p. 812-823.
- Messier, C. et Parent, S., 1997. **Reply - The effects of direct-beam light on overcast-day estimates of light availability: On the accuracy of the instantaneous one-point overcast-sky conditions method to estimate mean daily %PPFD under heterogeneous overstory canopy conditions.** *Canadian Journal Of Forest Research* 27, p. 274-275.
- Mitchell, P. L. et Whitmore, T. C., 1993. **Use of hemispherical photographs in forest ecology : calculation of absolute amount of radiation beneath the canopy.** OFI Occasional papers, Oxford Forestry Institute U.K., 39 p.
- Monsi, M. et Saeki, T., 1953. **Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion.** *Japanese journal of botany* 14, p. 22-52.
- Monteith, J. L., 1973. **Principles of environmental physics.** Edward Arnold limited, London, 241 p.
- Montgomery, R. A. et Chazdon, R. L., 2001. **Forest structure, canopy architecture, and light transmittance in tropical wet forests.** *Ecology* 82 (10), p. 2707-2718.
- Mouliia, B. et Sinoquet, H., 1993. **Three-dimensional digitizing systems for plant canopy geometrical structure : a review.** in: *Crop structure and light microclimate : Characterization and applications*, Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R. et Sinoquet, H. (Ed.), p. 183-193.
- Murphy, T. E. L., Adams, D. L. et Ferguson, D. E., 1999. **Response of advance lodgepole pine regeneration to overstory removal in eastern Idaho.** *Forest Ecology and Management* 120, p. 235-244.
- Muth, C. C. et Bazzaz, F. A., 2002. **Tree canopy displacement at forest gap edges.** *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere* 32 (2), p. 247-254.
- Muth, C. C. et Bazzaz, F. A., 2003. **Tree canopy displacement and neighborhood interactions.** *Canadian Journal Of Forest Research* 33, p. 1323-1330.
- Myneni, R. B. et Ross, J., 1991. **Photon-vegetation interactions.** Springer-Verlag, Berlin, 565 p.
- Myneni, R. B., Ross, J. et Asrar, G., 1989. **A review on the theory of photon transport in leaf canopies.** *Agricultural and Forest Meteorology* 45 (1-2), p. 1-153.
- Nicotra, A. B., Chazdon, R. L. et Iriarte, S. V. B., 1999. **Spatial heterogeneity of light and woody seedling regeneration in tropical wet forests.** *Ecology* 80 (6), p. 1908-1926.
- Nigh, G. D. et Love, B. A., 2004. **Predicting crown class in three western conifer species.** *Canadian Journal Of Forest Research* 34 (3), p. 592-599.
- Nobis, M. et Hunziker, U., 2005. **Automatic thresholding for hemispherical canopy-photographs based on edge detection.** *Agricultural and Forest Meteorology* 128 (3-4), p. 243-250.
- Oker-Blom, P., 1989. **Relationship between radiation interception and photosynthesis in forest canopies : effect of stand structure and latitude.** *Ecological Modelling* 49, p. 73-87.
- Orwig, D. A. et Abrams, M. D., 1995. **Dendroecological and ecophysiological analysis of gap environment in mixed-oak understoreys of northern Virginia.** *Functional Ecology* 9, p. 799-806.
- Parent, S. et Messier, C., 1996. **A simple and efficient method to estimate microsite light availability under a forest canopy.** *Canadian Journal Of Forest Research* 26, p. 151-154.
- Parker, G. G., Davis, M. M. et Moon Chapotin, S., 2002. **Canopy light transmittance in Douglas-fir-western hemlock stands.** *Tree Physiology* 22, p. 147-157.

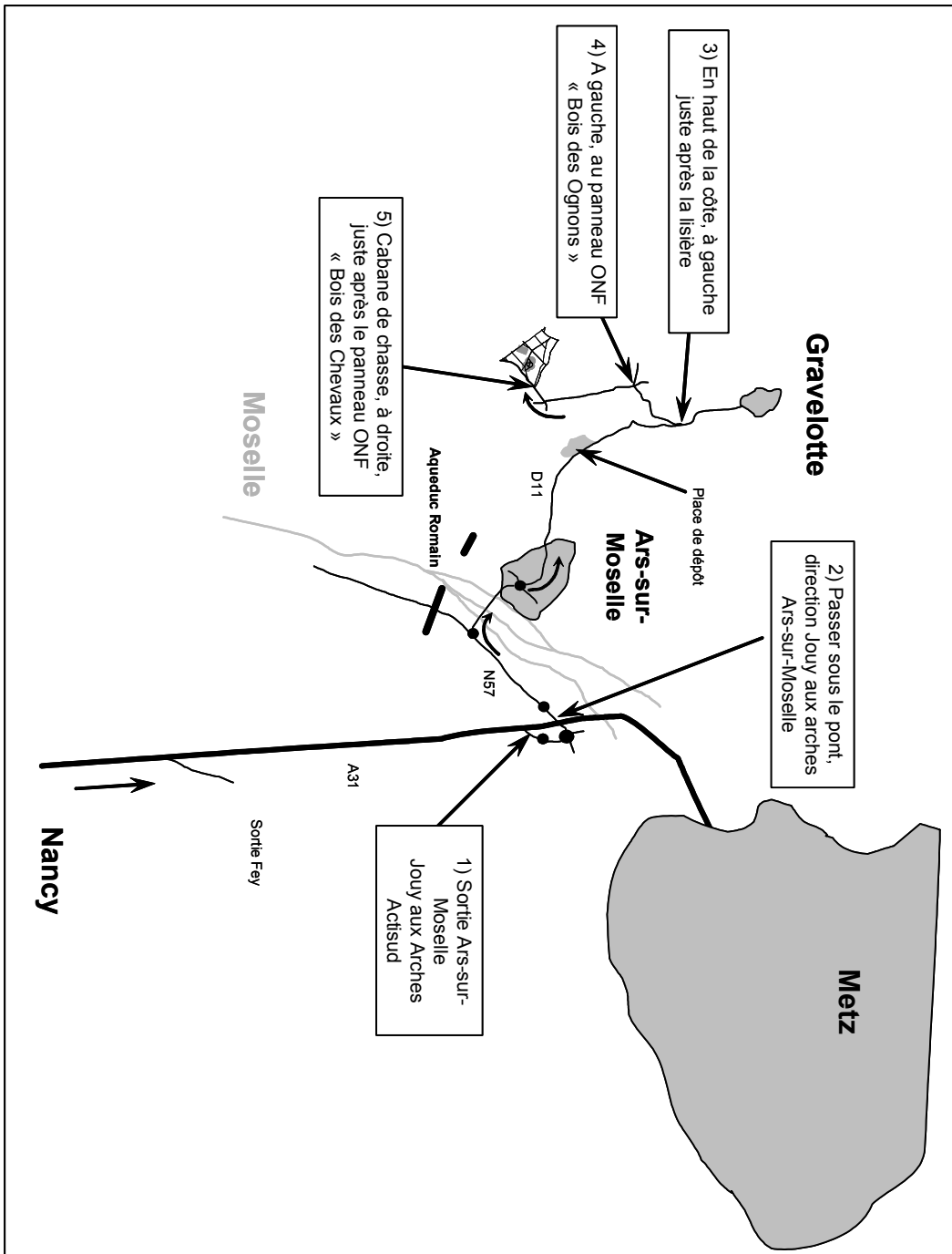
- Peachey, T. C. et Osborne, C. F., 1990. **The measurement of wood cell parameters using the distance transform.** *Wood and Fiber Science* 22 (4), p. 388-403.
- Persson, A. L., 1998. **Image analysis of shape and size of fine aggregates.** *Engineering Geology* 50 (1-2), p. 177-186.
- Piboule, A., 2001. **Validation et analyse de sensibilité d'un modèle de transfert radiatif en vue de son application à la cartographie de l'éclairement en peuplement forestier.** Rapport de D.E.A. (Biologie forestière), Institut National de la Recherche Agronomique, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Nancy, 24 p.
- Piboule, A., 2002. **Module regelight.** Capsis 4: Computer-Aided Projection for Strategies In Silviculture., De Coligny, F., UMR Cirad - CNRS - INRA - IRD - Université Montpellier II. Programmé en Java. <http://coligny.free.fr/>.
- Planchais, I. et Pontailler, J. Y., 1997. **Application d'un modèle de pénétration de la lumière à une jeune plantation de hêtres avec abri latéral.** *Annales des Sciences Forestières* 54, p. 243-260.
- Planchais, I. et Pontailler, J. Y., 1999. **Validity of leaf areas and angles estimated in a beech forest from analysis of gap frequencies, using hemispherical photographs and a plant canopy analyser.** *Annals of Forest Science* 56, p. 1-10.
- Planchais, I. et Sinoquet, H., 1998. **Foliage determinants of light interception in sunny and shaded branches of *Fagus sylvatica*.** *Agricultural and Forest Meteorology* 89, p. 241-253.
- Poulson, T. L. et Platt, W. J., 1989. **Gap light regimes influence canopy tree diversity.** *Ecology* 70 (3), p. 553-555.
- Pritchard, J. M. et Comeau, P. G., 2004. **Effects of opening size and stand characteristics on light transmittance and temperature under young trembling aspen stands.** *Forest Ecology and Management* 200 (1-3), p. 119-128.
- Prusinkiewicz, P., 1999. **A look at the visual modeling of plant using L-systems.** *Agronomie* 19, p. 211-224.
- Pukkala, T., Becker, P., Kuuluvainen, T. et Oker-Blom, P., 1991. **Predicting spatial distribution of direct radiation below forest canopies.** *Agricultural and Forest Meteorology* 55, p. 295-307.
- Pukkala, T., Kuuluvainen, T. et Stenberg, P., 1993. **Below-canopy distribution of photosynthetically active radiation and its relation to seedling growth in a boreal *Pinus sylvestris* stand.** *Scandinavian Journal Of Forest Research* 8, p. 313-325.
- Rakocevic, M., Sinoquet, H., Christophe, A. et Varlet-Grancher, C., 2000. **Assessing the geometric structure of a white clover (*Trifolium repens* L.) canopy using 3-D Digitising.** *Annals of Botany* 86, p. 519-526.
- Riegel, G. M., Miller, R. F. et Krueger, W. C., 1992. **Competition for resources between understory vegetation and overstory *Pinus ponderosa* in northeastern Oregon.** *Ecological Applications* 2 (1), p. 71-85.
- Ross, J., 1981. **The radiation regime and architecture of plant stands.** *Dr W. Junk Publishers, The Hague*, 391 p.
- Ross, J. et Sulev, M., 2000. **Sources of errors in measurements of PAR.** *Agricultural and Forest Meteorology* 100, p. 103-125.
- Ross, J., Sulev, M. et Saarelaid, P., 1998. **Statistical treatment of the PAR variability and its application to willow coppice.** *Agricultural and Forest Meteorology* 91, p. 1-21.
- Roussel, L., 1972. **Photologie forestière.** *Masson et Cie, Paris*, 144 p.
- Roussel, L., 1987. **Influence complexe de la lumière sur la forme des arbres.** *La Forêt Privée* 177, p. 37-41.
- SAS Institute Inc., 2000. **SAS System for Windows.** NC: SAS Institute Inc. Programmé en
- Schmerber, C., 1997. **La lumière et la forêt.** *Bulletin technique - Office national des forêts* 34 (numéro spécial), p. 1-167.

- Schmitt, J. et Wulff, R. D., 1993. **Light spectral quality, phytochrome and plant competition.** *Trends In Ecology And Evolution* 8 (2), p. 47-51.
- Shelton, M. G. et Murphy, P. A., 1994. **Loblolly pine regeneration and competing vegetation 5 years after implementing uneven-aged silviculture.** *Canadian Journal Of Forest Research* 24, p. 2448-1458.
- Siebel, H. N. et Bouwma, I. M., 1998. **The occurrence of herbs and woody juveniles in a hardwood floodplain forest in relation to flooding and light.** *Journal of Vegetation Science* 9, p. 623-630.
- Sinoquet, H., 1993. **Modelling Radiative transfer in heterogeneous canopies and intercropping systems.** in: *Crop structure and light microclimate : Characterization and applications*, Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R. et Sinoquet, H. (Ed.), p. 229-252.
- Sinoquet, H. et Bonhomme, R., 1992. **Modelling radiative transfer in mixed and row intercropping systems.** *Agricultural and Forest Meteorology* 62, p. 219-240.
- Sinoquet, H., Olioso, A., Guyon, D. et Zurfluh, O., 1995. **Modélisation des transferts radiatifs dans le domaine solaire : modèles " classiques ".** *Actes de l'Ecole-Chercheurs en bioclimatologie, Tome 1 : de la plante au couvert végétal (3-7 avril 1995, Le Croisic)*, p. 333-350.
- Sinoquet, H. et Rivet, P., 1997. **Measurement and visualization of the architecture of an adult tree based on a three-dimensional digitising device.** *Trees* 11, p. 265-270.
- Sinoquet, H., Rivet, P. et Drouet, J. L., 1997. **Méthodes de digitalisation et de visualisation 3D de l'architecture des plantes.** *Actes du séminaire sur la modélisation architecturale (10 au 12 mars 1997, Paris)*, p. 31-37.
- Sinoquet, H., Varlet-Grancher, C. et Bonhomme, R., 1993. **Modelling Radiative transfer within homogeneous canopies : basic concepts.** in: *Crop structure and light microclimate : Characterization and applications*, Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R. et Sinoquet, H. (Ed.), p. 207-228.
- Smith, H., 1982. **Light quality, photoperception, and plant strategy.** *Annual Review of Plant Physiology* 33, p. 481-518.
- Smith, W. R. et Somers, G. L., 1991. **SUNSHINE: A light environment simulation system based on hemispherical photographs.** Res. Pap., SO-267, New Orleans LA U.S. Department of Agriculture Forest Service Southern Forest Experiment Station, 17 p.
- Song, B., Chen, J. Q., Desanker, P. V., Reed, D. D., Bradshaw, G. A. et Franklin, J. F., 1997. **Modeling canopy structure and heterogeneity across scales: From crowns to canopy.** *Forest Ecology and Management* 96 (3), p. 217-229.
- Sonohat, G., Balandier, P. et Ruchaud, F., 2004. **Predicting solar radiation transmittance in the understory of even-aged coniferous stands in temperate forests.** *Annals of Forest Science* 61, p. 629-641.
- Soudani, K., Trautmann, J. et Walter, J. M. N., 2001. **Comparaison de méthodes optiques pour estimer l'ouverture de la canopée et l'indice foliaire en forêt feuillue.** *Comptes rendus de l'Académie des sciences, série 3, Sciences de la vie* 324, p. 381-392.
- Spitters, C. J. T., 1986. **Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part II. Calculation of canopy photosynthesis.** *Agricultural and Forest Meteorology* 38, p. 231-242.
- Spitters, C. J. T., Toussaint, H. A. J. M. et Goudriaan, J., 1986. **Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part I. Components of incoming radiation.** *Agricultural and Forest Meteorology* 38, p. 217-229.
- Stadt, K. J., Landhausser, S. M. et Stewart, J. D., 1997. **Comment - The effects of direct-beam light on overcast-day estimates of light availability.** *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere* 27 (2), p. 272-274.

- Stadt, K. J. et Lieffers, V. J., 2000. **MIXLIGHT : a flexible light transmission model for mixed-species forest stands.** *Agricultural and Forest Meteorology* 102, p. 235-252.
- Sumida, A., 1993. **Growth of tree species in a broadleaved secondary forest as related to the light environments of crowns.** *Journal Of The Japanese Forestry Society* 75 (4), p. 278-286.
- Sumida, A., 1995. **Three-dimensional structure of a mixed broad-leaved forest in Japan.** *Vegetatio* 119, p. 67-80.
- Ter Steege, H., 1997a. **HEMIPHOT, a programme to analyze vegetation indices, light and light quality from hemispherical photographs.** Tropenbos Documents, 97.3, Tropenbos-Guyana Programme, Georgetown, p.
- Ter Steege, H., 1997b. **Winphot 5.0 : a program to analyse vegetation indices, light and light quality from hemispherical photographs.** Tropenbos Guyana Reports, 97-3, Tropenbos Guyana Programme/Utrecht University, 47 p.
- Ter-Mikaelian, M. T., Wagner, R. G., Shropshire, C., Bell, F. W. et Swanton, C. J., 1997. **Using a mechanistic model to evaluate sampling designs for light transmission through forest plant canopies.** *Canadian Journal Of Forest Research* 27, p. 117-126.
- Tournebize, R. et Sinoquet, H., 1995. **Light Interception and Partitioning in a Shrub/Grass Mixture.** *Agricultural and Forest Meteorology* 72 (3-4), p. 277-294.
- Umeki, K., 1995. **A comparison of crown asymmetry between *Picea abies* and *Betula maximowicziana*.** *Canadian Journal Of Forest Research* 25, p. 1876-1880.
- Umeki, K., 1997. **Effect of crown asymmetry on size-structure dynamics of plant populations.** *Annals of Botany* 79, p. 631-641.
- Ustin, S. L., Woodward, R. A., Barbour, M. G. et Hatfield, J. L., 1984. **Relationship between sunfleck dynamics and red fir seedling distribution.** *Ecology* 65 (5), p. 1420-1428.
- Van der Meer, P. J., Sterck, F. J. et Bongers, F., 1998. **Tree seedling performance in canopy gaps in a tropical rain forest at Nouragues, French Guiana.** *Journal of Tropical Ecology* 14, p. 119-137.
- Van Gardingen, P. R., Jackson, G. E., Hernandez-Daumas, S., Russell, G. et Sharp, L., 1999. **Leaf area estimates obtained for clumped canopies using hemispherical photography.** *Agricultural and Forest Meteorology* 94, p. 243-257.
- Van Pelt, R. et Franklin, J. F., 2000. **Influence of canopy structure on the understory environment in tall, old-growth, conifer forests.** *Canadian Journal Of Forest Research* 30, p. 1231-1245.
- Varlet-Grancher, C., Chartier, M., Gosse, G. et Bonhomme, R., 1981. **Rayonnement utile pour la photosynthèse des végétaux en conditions naturelles : caractérisation et variations.** *Acta Oecologica. Oecologia Plantarum* 2 (16), p. 189-202.
- Varlet-Grancher, C., Gosse, G., Chartier, M., Sinoquet, H., Bonhomme, R. et Allirand, J. M., 1989. **Mise au point : rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal.** *Agronomie* 9, p. 419-439.
- Varlet-Grancher, C., Moulia, B., Sinoquet, H. et Russell, G., 1993. **Spectral modification of light within plant canopies : how to quantify its effects on the architecture of the plant stand.** in: *Crop structure and light microclimate : Characterization and applications*, Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R. et Sinoquet, H. (Ed.), p. 427-451.
- Wagner, S., 1998. **Calibration of grey values of hemispherical photographs for image analysis.** *Agricultural and Forest Meteorology* 90 (1-2), p. 103-117.
- Walter, J. M. N., 1993. **Canopy geometry and the interception of PAR in a temperate deciduous forest: an interpretation of hemispherical photographs.** in: *Crop structure and light microclimate: characterization and applications*, Varlet-Grancher, C. B., R.Sinoquet, H. (Ed.), p. 373-384.

- Walter, J. M. N., 2000. **Photographies Hémisphériques des voûtes forestières, Etude du rayonnement solaire sous le couvert à l'aide du logiciel GLA(c) Version 2.0.** note technique, Université Louis Pasteur Strasbourg I Centre d'Etudes et de Recherches Eco-Géographiques (C.N.R.S.), les Nouragues (Guyane Française), 28 p.
- Wang, H. et Baldocchi, D. D., 1989. **A numerical model for simulating the radiation regime within a deciduous forest canopy.** *Agricultural and Forest Meteorology* 46 (4), p. 313-337.
- Wang, S., Chen, W. et Cihlar, J., 2002. **New calculation methods of diurnal distribution of solar radiation and its interception by canopy over complex terrain.** *Ecological Modelling* 00, p. 1-14.
- Wang, Y. P. et Jarvis, P. G., 1990. **Influence of crown structural properties on PAR absorption photosynthesis, and transpiration in Sitka spruce : application of a model (MAESTRO).** *Tree Physiology* 7, p. 297-316.
- Watling, J. R., Robinson, S. A., Woodrow, I. E. et Osmond, C. B., 1997. **Responses of rainforest understorey plants to excess light during sunflecks.** *Australian Journal Of Plant Physiology* 24, p. 17-25.
- Weisberg, P. J., Hadorn, C. et Bugmann, H. K. M., 2003. **Predicting understorey vegetation cover from overstorey attributes in two temperate mountain forests.** *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 122 (5), p. 273-286.
- Weiss, S. B., 2000. **Vertical and temporal distribution of insolation in gaps in an old-growth coniferous forest.** *Canadian Journal Of Forest Research* 30 (12), p. 1953-1964.
- Welles, J. M., 1990. **3. Some indirect methods of estimating canopy structure.** *Remote Sensing Reviews* 5 (1), p. 31-43.
- West, P. W. et Wells, K. F., 1992. **Method of application of a model to predict the light environment of individual tree crowns and its use in a eucalyptus forest.** *Ecological Modelling* 60, p. 199-231.
- Wright, E. F., Coates, K. D. et Bartemucci, P., 1998. **Regeneration from seed of six tree species in the interior cedar-hemlock forests of British Columbia as affected by substrate and canopy gap position.** *Canadian Journal Of Forest Research* 28, p. 1352-1364.
- Yoshida, T., Yanagisawa, Y. et Kamitani, T., 1998. **An empirical model predicting the gap light index in an even-aged oak stand.** *Forest Ecology and Management* 109, p. 85-89.
- Zenner, E. K. et Hibbs, D. E., 2000. **A new method for modelling the heterogeneity of forest structure.** *Forest Ecology and Management* 129, p. 75-87.

Annexe 1 : Plan d'accès au dispositif expérimental



Annexe 2 : Données météorologiques



Données relatives à la climatologie de la
région de METZ-AUGNY (altitude : 189.8 m)
département : Moselle

PERIODES	Janv.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Année
PERIODE 1946-2001													
	+4.3	+6.2	Moyennes mensuelles des températures maximales quotidiennes (en °C) :										+14.4
			+10.6	+14.5	+19.0	+21.9	+24.2	+23.8	+20.3	+14.8	+8.4	+5.2	
			Maximum absolu de la température (Tx) :										+38.7
	+16.1 (1999)	+20.8 (1960)	+24.3 (1989)	+31.0 (1950)	+32.0 (1953)	+37.7 (1947)	+37.3 (1995)	+38.7 (1998)	+34.0 (1962)	+26.8 (1966)	+21.2 (1955)	+18.1 (1953)	
	-1.0	-0.7	Moyennes mensuelles des températures minimales quotidiennes (en °C) :										+5.7
			+1.8	+4.3	+8.2	+11.3	+13.2	+12.8	+10.0	+6.2	+2.4	+0.1	
			Minimum absolu de la température (Tn) :										-23.2
	-20.1 (1971)	-23.2 (1956)	-12.2 (1971)	-5.1 (1986)	-2.4 (1955)	+1.9 (1975)	+4.3 (1980)	+3.9 (1956)	-1.1 (1972)	-6.0 (1955)	-11.7 (1998)	-17.0 (1973)	
	+1.6	+2.7	Températures moyennes mensuelles :										+10.1
			+6.2	+9.4	+13.6	+16.6	+18.7	+18.3	+15.1	+10.5	+5.4	+2.6	
	17	15	Nombres moyens mensuels de jours avec gelée (Tn<0°) sous abri :										72
			11	4	25 j/56 a	0	0	0	1 j/56 a	2	8	15	
	62	57	Hauteurs moyennes mensuelles des précipitations en millimètres :										745
			56	51	62	66	64	67	61	59	67	74	
	43.6 (1962)	61.2 (1997)	Hauteur maximale des précipitations en 24 heures (en mm) :										61.2
			32.4 (1986)	32.9 (1968)	41.1 (1970)	49.5 (1963)	59.6 (1995)	47.2 (1954)	48.0 (1967)	56.5 (1981)	38.0 (1952)	45.7 (1947)	
	12	10	Nombres moyens mensuels de jours avec précipitations (RR>=1.0 mm) :										122
			10	10	11	10	9	10	9	9	11	11	
PERIODE 1949-2001	44	76	Durées moyennes mensuelles de l'insolation, en heures :										1584
			123	160	201	206	228	206	154	99	50	38	
PERIODE 1950-2001	87	83	Moyennes mensuelles de l'humidité relative de l'air, en % (8 valeurs quotidiennes) :										80
			77	73	73	74	73	76	81	86	88	88	
PERIODE 1949-2001	95	94	Moyennes mensuelles des valeurs maximales quotidiennes de l'humidité relative en :										95
			93	92	93	94	94	95	96	97	96	96	
	76	67	Moyennes mensuelles des valeurs minimales quotidiennes de l'humidité relative en :										60
			55	49	49	50	48	50	57	66	74	78	
	40 (1955)	40 (1990)	Vitesse maximale instantanée du vent, en m/s :										40
			40 (1990)	40 (1949)	36 (1967)	30 (1982)	30 (1966)	34 (1954)	29 (1986)	30 (1952)	35 (1952)	37 (1999)	
PERIODE 1952-2001	3.5	3.4	Vitesse moyenne du vent, en m/s (8 valeurs quotidiennes) :										3.0
			3.3	3.3	3.0	2.8	2.7	2.5	2.6	2.6	3.1	3.4	
Brouillard (1949-2001)	6	4	Nombres moyens mensuels de jours de :										52
			3	2	2	1	3	7	10	6	6		
Orage (1949-2001)	9	15											22
			25	1	4	4	4	2	1	8	7		
Grêle (1949-2001)	j/53 a 10	j/53 a 23											3
			j/53 a 23	1	24	15	6	4	5	6	j/52 a 7	j/52 a 9	
Neige (1946-2001)	j/53 a 6	j/53 a 6											25
			j/53 a 4	2	j/53 a 5	j/53 a 0	j/53 a 0	j/53 a 0	j/53 a 0	j/52 a 3	j/53 a 2	j/52 a 5	
Sol couvert de neige (1946-2001)	7	5											19
			2	14 j/56 a	0	0	0	0	0	j/56 a 0	1	4	
Vent fort, Vx>=16m/s (1950-2001)	4	4											33
			4	3	2	2	2	2	2	2	3	4	



Données relatives à la climatologie de la
région de METZ-AUGNY (altitude : 189.8 m)
département : Moselle

ANNEE 2003	Janv.	Fev.	Mars	Avr+1	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Année	
	+4.1	+6.0	Moyennes mensuelles des températures maximales quotidiennes (en °C) :			+28.0	+27.2	+31.0	+22.8	+12.6	+10.9	+6.3	+16.7	
			Maximum absolu de la température (Tx) :											
	+14.0 le 02	+15.6 le 26	+21.8 le 30	+25.0 le 15	+27.8 le 30	+33.3 le 22	+35.5 le 15	+39.5 le 08	+30.6 le 20	+23.6 le 02	+16.2 le 03	+11.8 le 13	+39.5	
	-1.5	-3.3	Moyennes mensuelles des températures minimales quotidiennes (en °C) :			+15.6	+15.0	+16.5	+9.2	+4.9	+4.7	+1.2	+6.6	
			Minimum absolu de la température (Tn) :											
	-10.5 le 31	-9.6 le 01	-2.2 le 04	-4.5 le 08	+1.7 le 16	+11.0 le 21	+12.2 le 03	+10.1 le 31	+2.9 le 30	-3.2 le 28	-1.4 le 09	-7.0 le 10	-10.5	
	+1.3	+1.4	Températures moyennes mensuelles :			+21.8	+21.1	+23.7	+16.0	+8.7	+7.8	+3.8	+11.7	
	18	24	Nombres mensuels de jours avec gelée (Tn<=0°) sous abri :			0	0	0	0	4	2	11	77	
	78	14	Hauteurs mensuelles des précipitations en millimètres :			21	31	30	43	68	38	37	493	
	20.4 le 02	5.6 le 03	Hauteur maximale des précipitations en 24 heures (en mm) :			10.0 le 08	10.0 le 02	13.8 le 28	21.0 le 22	17.0 le 31	9.2 le 16	14.8 le 13	22.2	
	14	3	Nombres mensuels de jours avec précipitations (RR>=1.0 mm) :			7	8	5	4	9	8	7	89	
	56	143	Durées mensuelles de l'insolation, en heures :			255	245	308	253	120	61	74	2158	
	85	76	Moyennes mensuelles de l'humidité relative de l'air, en % (8 valeurs quotidiennes) :			67	64	56	69	79	87	86	73	
	92	90	Moyennes mensuelles des valeurs maximales quotidiennes de l'humidité relative en :			93	91	90	85	93	92	96	91	
	74	55	Moyennes mensuelles des valeurs minimales quotidiennes de l'humidité relative en :			47	41	36	29	36	59	73	50	
	28 le 02	14 le 03	Vitesse maximale instantanée du vent, en m/s :			28 le 02	17 le 14	20 le 16	19 le 29	16 le 22	17 le 06	19 le 03	22 le 21	28
	3.7	2.6	Vitesse moyenne du vent, en m/s (8 valeurs quotidiennes) :			3.1	2.2	2.6	2.3	2.1	2.9	2.5	2.7	
			Nombres mensuels de jours de :											
Brouillard	6	1	2	0	3	3	1	0	1	3	8	1	29	
Orage	0	0	0	1	5	8	6	4	1	0	0	0	25	
Grêle	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	
Neige	8	6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	17	
Sol couvert de neige	12	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	18	
Vent fort, Vx>=16m/s	6	0	0	3	6	3	4	2	2	3	3	5	37	

Annexe 3 : Extrait de la notice de la carte géologique

CARTE GÉOLOGIQUE DÉTAILLÉE DE LA FRANCE

CHAMBLEY

Les explorations et les tracés géologiques ont été effectués de 1953 à 1961 par M. Pierre L. Maubeuge, Docteur ès-Sciences, Conseiller géologique près la Chambre Syndicale des Mines de fer de France. Le travail graphique a été exécuté sous la direction de M. Maurice Nicklès, Géologue en Chef. Cette feuille a été publiée en 1964. M. Jean Goguel, Ingénieur Général des Mines, étant Directeur du Service.

CARTE DE FRANCE _ 1/50 000 _ Type 1922

Carte publiée avec le concours de la
CHAMBRE SYNDICALE DES MINES DE FER DE FRANCE

Les renseignements pétroliers, y compris
le tracé des courbes structurales, ont été communiqués par la
SOCIÉTÉ NATIONALE DES PÉTROLES D'AQUITAINE

F^{LLE} XXXIII-13

J1. Bajocien. Comme l'Aalénien, cet étage va montrer des changements de puissances sensibles pour ses différents termes, selon les endroits considérés. Il présente aussi des variations de faciès considérables.

J1c. Bajocien supérieur. Il a une puissance de l'ordre d'une cinquantaine de mètres. Il montre de haut en bas, l'Oolithe de Vionville, équivalent de l'Oolithe miliaire supérieure des régions plus méridionales. Celle-ci, dans le centre de la feuille, passe à un calcaire pisolithique un peu marneux, l'Oolithe miliaire supérieure réapparaissant dans le Sud de la feuille, puis une trentaine de mètres de Marnes de Gravelotte, avec, surtout à la base, où est le niveau-type, des horizons très fossilifères à fausses oolithes ferrugineuses. Cet ensemble présente cependant, au moins par places, des épisodes plus calcaires, notamment vers le milieu, l'Oolithe de Doncourt-les-Conflans ; mais, surtout dans l'angle NE de la feuille, un massif basal de calcaires spathiques et coquilliers, piquetés d'ocre, difficile à distinguer de l'Oolithe de Jaumont : c'est le « Calcaire à points ocreux de Vernéville » des anciens auteurs. C'est immédiatement au nord de Chambley que commence à apparaître le faciès du calcaire oolithique terreux grossier, à *Clypeus ploti* et *Parkinsonia parkinsoni*, si bien développé dans toute la Lorraine centrale. Une surface taroudée marque le contact Bathonien-Bajocien. Une autre trace aussi la séparation entre les Marnes de Gravelotte et l'Oolithe de Jaumont.

L'Oolithe de Jaumont (du Jaune-Mont, au NE de Saint-Privat) a une vingtaine de mètres de puissance. C'est un calcaire coquillier, à alvéoles, jaunâtre ; en certains points, le massif est barré par une surface taroudée, dont la continuité paraît certaine puisqu'on la retrouve plus au Sud, vers Toul et Nancy, avec toutefois un lit marneux intercalé. Le calcaire passe au pied aux Marnes de Longwy. Dans la moitié septentrionale de la feuille, elles ont un faciès marno-sableux ; micacées, avec bancs calcaires, assez fossilifères, elles n'excèdent pas 2 mètres de puissance. Un conglomérat marque leur toit. Elles reposent en outre sur le Bajocien moyen avec une surface taroudée interposée. C'est la zone à *Stenoceras norlense*, base du Bajocien supérieur. Mais en bordure sud de la coupure, sous le parallèle d'Annaville, ces Marnes de Longwy passent au faciès des calcaires oolithiques ferreux qui prévaudront plus au Sud. En certains points l'Oolithe de Jaumont montre des faciès sableux ; on les voit nettement s'intriquer au sud du même parallèle, avec l'Oolithe miliaire inférieure dont le faciès est nettement établi en bordure méridionale de la carte.

Légende :

J1c¹ : Bajocien supérieur
Oolithe de Vionville
Marnes de Gravelotte

J1c² : Bajocien supérieur
Oolithe de Jaumont
Marnes de Longwy

FACIÈS DU JURASSIQUE MOYEN			
Et a g e s	Région nord	Région médiane	Région sud
Bathonien moyen	Marnes à <i>Rhynchonelloidella</i>		
Bathonien inférieur	Faciès sableux		Faciès plus oolithique
Bajocien	(7 m)	Oolithe de Vionville	Calcaire pisolithique
	(32 m) Marnes et marne-sable	Marnes du Jarnisy	Calcaire oolithique à <i>Clypeus ploti</i> (23-25 m)
		Oolithe de Doncourt-les-Conflans	
		Calcaires de Vernéville	Marnes de Gravelotte
supérieur	(12 m)	Oolithe de Jaumont	Faciès sableux et oolithiques
Bajocien moyen	(16 m)	Calcaires marneux et sableux	Oolithe miliaire inférieure ou Bâlin (20 m)
	(20 m)	Calcaires à <i>T. coronatum</i> (F ¹ e Brie)	Marnes de Longwy, calcaires marneux oolithiques (3 m)
			Calcaires à <i>Polypiers supérieurs</i> (18 m)
			Oolithe cannabine (2 m)
			Calcaires à <i>Polypiers inférieurs</i>

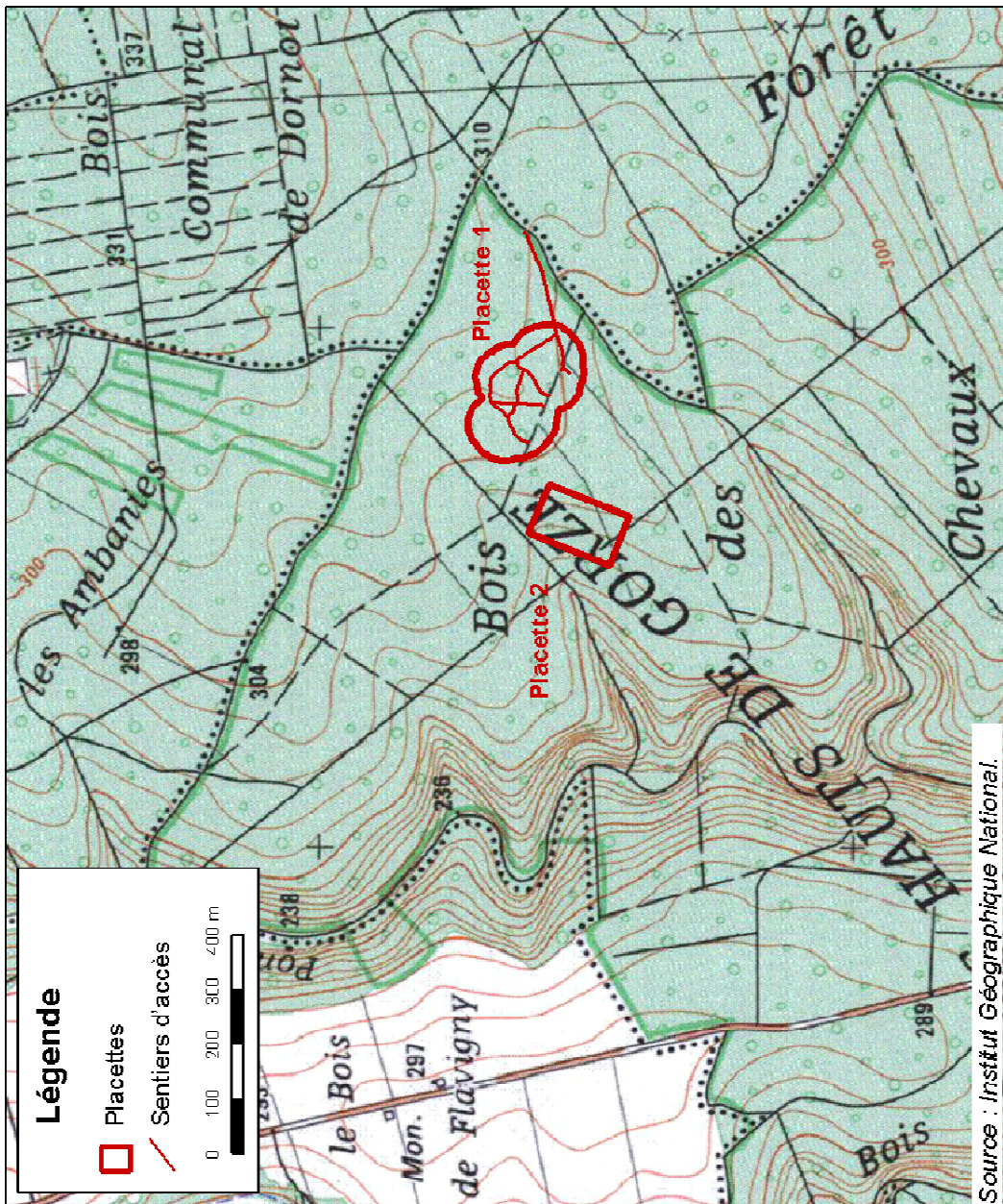
~~~~~ : Surfaces d'érosion marine

J1b-a. Bajocien moyen et inférieur. Le Bajocien moyen présente une lacune stratigraphique importante à son sommet, puisque les Calcaires siliceux de l'Orne à *Teloceras blagdeni* et *T. coronatum*, présents au Nord, ont disparu. Cette division a une épaisseur de 65 mètres environ, dans la partie méridionale, dépassant 100 mètres au Nord (108 m à Bruville). Le Bajocien moyen est une masse essentiellement corallienne, avec partout une surface taroudée terminale, nette. Ces calcaires sont un complexe de calcaires oolithiques, coquilliers, cristallins, plus ou moins marneux, avec récifs de *Polypiers* tabulaires ou même branchus. La masse supérieure a une vingtaine de mètres de puissance, et repose, avec surface taroudée intercalée, sur la masse inférieure, plus ou moins corallienne, avec parfois des lits marneux assez réguliers, riches en *Phasianella*. Il y a souvent des calcaires cristallins sablo-micacés, et des marnes également détritiques. L'Oolithe cannabine, massif de calcaire à grosses oolithes, terreux, sépare ces deux masses coralliennes, faisant son apparition vers la bordure méridionale de la carte. C'est la zone à *Stephanoceras humphriesi* qui correspond à ces deux horizons.

La base passe progressivement à des calcaires spathiques, à entroques, plus ou moins chargés de marne brun-rouille. Des changements de puissances se manifestent dans la série basale, sous les horizons coralliens. On n'y distingue pas toujours aisément les niveaux suivants, reconnus sur 45 mètres d'épaisseur, à Bruville, dans la partie nord de la feuille. De haut en bas : les Calcaires de Haut-Pont et les Calcaires d'Ottange (zone à *Oolites souzei* et *Sphaeroceras polyschides*) ; la plus grande partie de ces derniers correspond vraisemblablement au Bajocien inférieur, zones à *Witchellia loeviscula* et *Sanninia sowerbyi*. Des niveaux conglomératiques s'y observent, avec lamachelles grossières. Des passées de calcaire à oolithes ferrugineuses à éclat métallique, marquent la base du Calcaire de Haut-Pont. Il y a ensuite, au pied, passage à une masse d'argilles et marnes gris bleu, avec lits calcaires : les Marnes de Charennes, ou Marnes micacées des mineurs, de la zone à *Hyperlioceras discites*. En certains points, ces marnes montrent des amas sporadiques à oolithes et fausses oolithes ferrugineuses. Il y a un peu plus de 7 mètres pour ce niveau marneux à Bruville ; mais vers le Sud, sous le parallèle d'Ars-sur-Moselle, la diminution de puissance est très sensible. Dessous commence l'Aalénien, le contact étant marqué constamment par des traces d'un mouvement épigénétique (indices d'émersion et d'érosion marine par transgression postérieure).



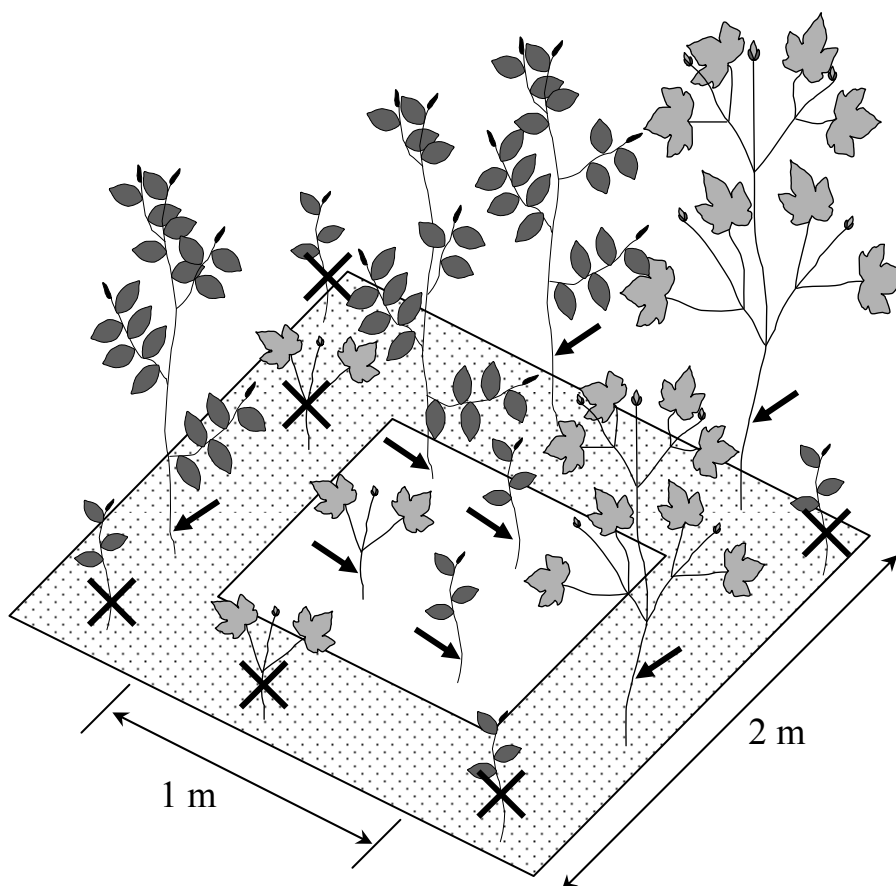
## Annexe 4 : Carte IGN du dispositif





## Annexe 5 : Mesures réalisées sur la régénération

### Placeaux d'analyse de la régénération



**Figure 108** : Structure d'un placeau de mesure de la régénération : une partie centrale (1 m de côté), et une partie périphérique (2 m de côté). Les flèches indiquent les semis mesurés, et les croix ceux qui ne sont pas pris en compte (moins de 1,50 m en partie périphérique).

Un placeau d'analyse de la régénération (**figure 108**) est constitué de :

- Une partie centrale, carrée, de 1 m de côté.
- Une partie périphérique, incluant la précédente, également carrée, de 2 m de côté. Cette partie a donc une épaisseur de 50 cm tout autour de la première, de bords à bords.

Dans les deux parties, pour chaque semis d'une hauteur supérieure à 1,50 m ont été relevés :

- L'espèce,
- La hauteur totale (à la perche),
- Le diamètre à 5 cm du sol (au pied à coulisse),
- Le diamètre à 1,30 m (au pied à coulisse).

Dans la partie centrale seuls les semis d'une hauteur inférieure à 1,50 m ont également été mesurés. Pour chacun nous avons relevé :

- L'espèce,

- La hauteur totale (au réglet),
- Le diamètre à 5 cm du sol (au pied à coulisse),

Lorsque des rejets de souche étaient présents sur le plateau, nous relevions :

- L'essence,
- Le nombre de rejets de la cépée,
- La hauteur du plus haut rejet (à la perche),
- Le diamètre à 1,30 m du plus gros rejet (au pied à coulisse).

Un inventaire floristique (au printemps) a également été réalisé sur la partie centrale des plateaux, en utilisant un indice d'abondance – dominance dérivé de celui de Braun Blanquet. Les classes utilisées (définies pour 1 m<sup>2</sup>) étaient :

- \* : 1 ou 2 individus
- 1 : entre 3 et 5 individus
- 2 : entre 5 et 25% de recouvrement
- 3 : entre 25 et 50% de recouvrement
- 4 : entre 50 et 75% de recouvrement
- 5 : entre 75 et 100% de recouvrement

Sur le terrain seules les parties centrales ont été délimitées de la façon suivante : un piquet (de 50 cm de haut) en bois portant le numéro du plateau à un coin et trois jalonnets de couleur différentes pour les trois autres coins. Les trois couleurs étaient toujours positionnées dans le même ordre dans le sens des aiguilles d'une montre : piquet en bois, jalonnette bleue, jalonnette noire, jalonnette orange. Cette disposition permet de facilement retrouver la position du plateau même s'il manque des jalonnets. Le piquet en bois était peint en rose pour les transects et en blanc pour la maille systématique. A partir du piquet et des jalonnets, il suffit de positionner deux baguettes de longueur  $\sqrt{2^2 + 2^2} \approx 2,83m$  dans les diagonales de la partie centrale pour obtenir les quatre coins de la partie périphérique. A partir de ces coins, le positionnement de deux équerres (50 cm x 1 m) et d'un jalon d'un mètre permettait de matérialiser le contour de la partie périphérique, malgré l'enchevêtrement des semis.

## Analyses rétrospectives

Au total nous avons 57 hêtres et 39 érables sycomores. Pour chacun, ont été relevés :

- L'espèce,
- La hauteur totale (au mètre à ruban),
- Le diamètre à 5 cm du sol (au pied à coulisse),
- Le diamètre à 1,30 m (au pied à coulisse),
- La longueur de chaque unité de croissance annuelle depuis le collet,
- L'âge par comptage du nombre de cernes au dessus du collet.

Chaque tige prélevée a été analysée au laboratoire. Pour chacune, les unités de croissance successives ont été soigneusement repérées, mesurées en longueur et se sont vues attribuer une année par datation relative. Les morts d'apex, les dégâts de gibier supposés, les zones où la limite des unités de croissance était floue et tout autre élément remarquable ont été notés. Un schéma était établi lorsque les informations des axes secondaires étaient nécessaires à la datation relative des unités de croissance, en particulier pour l'estimation du nombre d'unités perdues lors d'une mort

d'apex ou d'un dégât de gibier. Ces données ont été mesurées par Nadine Geoffroy, qui a également réalisée une première analyse exploratoire *Geoffroy 2003*.

D'autre part des tronçons ont été prélevés au niveau du collet. Des coupes ont été réalisées à l'aide d'un microtome, rigidifiées et colorées. Les cernes ont ensuite été comptés à l'aide d'une loupe binoculaire et d'un microscope. L'**annexe 6** présente le rapport technique de l'opératrice, Maïlys Clause, qui a réalisé les comptages de cernes.





## Annexe 6 : Protocole de comptage des cernes. Rapport technique de Mailys Clausse

Les différents semis ont tout d'abord subi un traitement antifongique durant quelques jours, puis ils ont été rincés plusieurs fois à l'eau.

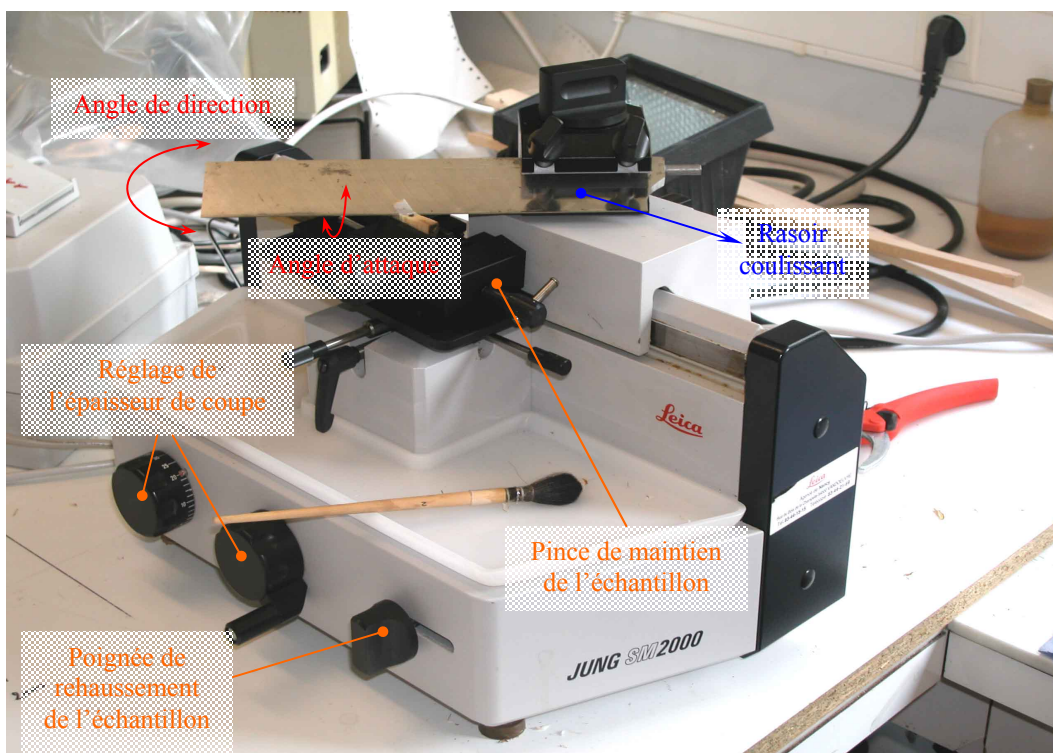
### Tri des échantillons

Selon la taille du diamètre des échantillons, le traitement nécessaire avant la réalisation de coupe sera différent.

On distingue deux cas :

- Les échantillons dont le diamètre est inférieur à 5 mm. Ils sont mis à imprégner dans du Poly Éthylène Glycol (PEG) à 30% durant 24h sous vide d'air, puis le PEG à 30 % est remplacé par du PEG à 50% pour de nouveau 24h sous vide d'air. Enfin les échantillons sont incubés dans une étuve à 70° C sous vide d'air en présence de PEG pur pour 48h. En effet il est nécessaire de chauffer pour cette dernière étape car le PEG pur se présente sous forme cristallisée à température ambiante. Ce traitement au PEG est nécessaire afin de permettre une meilleure cohésion des cellules lors de la réalisation des coupes.
- Les échantillons dont le diamètre est supérieur à 5 mm. Ils sont maintenus dans l'eau mais ne nécessitent aucun traitement préalable à la coupe. Pour les plus gros de ce groupe, il est nécessaire de retirer deux dosses de part et d'autre pour faciliter le tranchage ultérieur.

### Tranchage des coupes fines



**Figure 109 :** Description d'un appareil utilisé pour faire les coupes lors du comptage des cernes de semis : le microtome.

Des coupes fines sont tranchées à l'aide d'un microtome (**figure 109**). Celui-ci est composé d'un rasoir coulissant dont on peut régler l'angle d'attaque ainsi que l'angle de direction et d'une pince permettant de fixer les échantillons à couper. Cette pince peut également être inclinée et rehaussée. Le microtome dispose également d'une molette permettant de régler l'épaisseur de coupe et d'une poignée permettant de rehausser l'échantillon selon l'épaisseur choisie.

Pour la réalisation de coupes fines, il est indispensable que le rasoir soit très bien affûté, afin de réaliser des coupes très fines de l'ordre de 10-15  $\mu\text{m}$ , mieux adaptées à la lecture des cernes.

Dans le cas de coupes fines chez le hêtre et l'érable, l'angle d'attaque a été réglé sur  $8^\circ$  et l'angle de direction sur  $45^\circ$ .

## Coloration

La coloration des coupes est réalisée par le dépôt d'une goutte de safranine 1g/l, rincée au bout d'une dizaine de secondes. Il est également possible de réaliser la coloration par l'utilisation de vert d'iode. Ces deux colorants ont pour propriété de colorer les éléments ligneux. La combinaison des deux est parfois utile pour une meilleure lisibilité.

La coupe est ensuite montée entre lame et lamelle. L'observation peut se faire au microscope et à la loupe binoculaire.

## Observation

### Lecture de cernes chez le hêtre

Chez cette essence les débuts de cerne peuvent être repérés par la présence de vaisseaux de grande taille alignés. La taille des vaisseaux se réduit alors vers le centre mais on observe toutefois des gros vaisseaux çà et là. En fin de cerne la densité de petits vaisseaux est telle que l'on observe une bande sombre.

### Lecture de cernes chez l'érable sycomore

Chez cette espèce, la répartition en taille des vaisseaux est plus régulière mais on distingue très bien les fins de cernes très denses en petits vaisseaux.

## Annexe 7 : Analyses de sol

| Échantillon                                                       | Unité    | Fosse Pl. 1 |     |     | Fosse Pl. 2 |     |     |
|-------------------------------------------------------------------|----------|-------------|-----|-----|-------------|-----|-----|
|                                                                   |          | Aci         | Sca | Cca | Aci         | Sca | Cca |
| <b>Granulométrie 5 fractions sans décarbonatation</b>             |          |             |     |     |             |     |     |
| Argiles (<2 microns)                                              | g/Kg     | 440         | 273 | 215 | 462         | 342 | 172 |
| Limon fin (2/20 microns)                                          | g/Kg     | 270         | 315 | 256 | 284         | 296 | 178 |
| Limon grossier (20/50 microns)                                    | g/Kg     | 238         | 211 | 176 | 219         | 179 | 113 |
| Sable fin (50/200 microns)                                        | g/Kg     | 31          | 71  | 126 | 22          | 69  | 181 |
| Sable grossier (200/2000 microns)                                 | g/Kg     | 21          | 130 | 227 | 13          | 114 | 356 |
| pH eau                                                            |          | 7.5         | 8.3 | 8.4 | 7.1         | 8.4 | 8.7 |
| Calcaire (CaCO <sub>3</sub> ) total                               | g/Kg     | 10          | 231 | 566 | 2           | 202 | 836 |
| Phosphore (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) - méthode Joret-Hébert | g/Kg     | 0.011       |     |     | 0.006       |     |     |
| Capacité d'échange cationique, méthode Metson                     | cmol+/Kg | 29.3        |     |     | 28.1        |     |     |
| Calcium (CaO) échangeable à l'acétate d'ammonium                  | g/Kg     | 10.3        |     |     | 8.26        |     |     |
| Magnésium (MgO) échangeable à l'acétate d'ammonium                | g/Kg     | 0.25        |     |     | 0.17        |     |     |
| Potassium (K <sub>2</sub> O) échangeable à l'acétate d'ammonium   | g/Kg     | 0.17        |     |     | 0.14        |     |     |
| <b>Carbone (C) organique et azote</b>                             |          |             |     |     |             |     |     |
| Carbone organique                                                 | g/Kg     | 55.64       |     |     | 48.71       |     |     |
| Matières organiques                                               | g/Kg     | 95.7        |     |     | 83.8        |     |     |
| Azote organique                                                   | g/Kg     | 4.11        |     |     | 3.52        |     |     |
| Rapport carbone organique sur azote total (C/N)                   |          | 13.54       |     |     | 13.84       |     |     |

Analyses réalisées par :

### Laboratoire d'Analyse des Sols

273, rue de Cambrai 62 000 ARRAS

Tel. 03 21 21 86 00

Télex 133 758 F

Télécopie : 03 21 21 86 21

# Résumé

Les modèles de lumière simulent la distribution de l'éclairement sous couvert, en prenant en compte explicitement l'interception du rayonnement incident par le peuplement forestier. En particulier, ils permettent l'analyse de l'influence de la structure du peuplement sur la dynamique de régénération forestière. Malheureusement, la modélisation de peuplements hétérogènes nécessite une caractérisation détaillée des arbres et de la géométrie de leur houppier. Notre but est de rendre ces modèles plus accessibles en proposant une réduction du jeu de données nécessaire. Pour cela nous avons choisi un peuplement feuillu hétérogène et mesuré l'ensemble des données nécessaires à l'alimentation d'un modèle de lumière (tRAYci). Une analyse approfondie de la géométrie des houppiers nous a permis d'établir des relations entre les variables caractéristiques du houppier et le diamètre à 1,30 m des arbres pour chaque essence rencontrée. Elle a également montré une forte plasticité de l'extension latérale des houppiers. Sur cette base, nous avons élaboré un algorithme permettant de prendre en compte la compétition entre houppiers pour l'occupation de l'espace. Cet algorithme consiste à reconstruire chaque houppier en adaptant son extension latérale aux houppiers voisins, en ne connaissant pour chaque arbre que son essence, son diamètre à 1,30 m et sa position. Nous avons comparé cette méthode de reconstruction (anisotrope) à une méthode plus simple (isotrope), en ce qui concerne la qualité de simulation de la distribution de l'éclairement relatif obtenue avec les houppiers reconstruits. Seule l'approche anisotrope a permis d'obtenir une simulation non biaisée de la distribution de l'éclairement à l'échelle de la parcelle. Nous avons testé s'il était possible de se passer complètement des données sur la géométrie des houppiers, en proposant des indices dendrométriques basés sur la distribution spatiale de la surface terrière (aire de la section horizontale du tronc à 1,30 m). Cependant ces indices se sont montrés incapables de prédire la distribution de l'éclairement de façon non biaisée, du fait de l'hétérogénéité structurelle du peuplement. L'établissement de relations entre caractéristiques du houppier et diamètre à 1,30 m semble inévitable, mais la méthode de reconstruction anisotrope proposée permet de limiter au maximum la caractérisation des houppiers et de réduire ainsi de façon très significative les mesures nécessaires à l'alimentation des modèles de lumière. Une perspective de ce travail consisterait à coupler cette méthode avec la modélisation de la distribution spatiale des troncs, pour envisager une caractérisation encore plus sommaire des peuplements, ainsi que la modélisation de peuplements hétérogènes réalistes.

## Mots clefs

Modélisation ; Houppier ; Éclairement relatif ; Modèle de lumière ; Diamètre à 1,30 m ; Forêt hétérogène feuillue ; tRAYci.

## **Abstract**

Light models simulate the distribution of understory lighting by explicitly taking the interception of incident radiation by the forest stand into account. In particular, they make it possible to analyse the influence of stand structure on the dynamics of forest regeneration. Unfortunately, a detailed characterisation of the trees and of their crown geometry is necessary to model heterogeneous stands, it is necessary to have. Our goal is to make these models more accessible by proposing to reduce the quantity of data required. In order to do so, we chose a heterogeneous broadleaved stand and measured the data set necessary to run a light model (tRAYci). An in-depth analysis of the crown geometry allowed us to establish relationships between the variables characteristic of the crown and the diameter of the trees at 1.30 m for each species encountered. It also revealed a high degree of plasticity of crown lateral extension. On this basis, we were able to develop an algorithm that allowed us to take competition between crowns for space occupation into account. It consists of reconstructing each crown by adapting its lateral extension to neighbour crowns, given only the species of the tree, its diameter at a height of 1.30 m and its position. We compared this reconstruction method (anisotropic) to a simpler method (isotropic), in relation to the simulation quality of the distribution of relative light intensity obtained with the reconstructed crowns. Only the anisotropic approach allowed us to obtain an unbiased simulation of lighting distribution at the level of the plot. We tested to see if it was possible to totally eliminate crown geometry data by proposing field measurement indices based on the spatial distribution of the stand basal area (the area of the horizontal section of the trunk at a height of 1.30 m). However, these indices proved incapable of predicting the light distribution in an unbiased way as a result of the structural heterogeneity of the stand. The establishment of relationships between crown characteristics and diameter at 1.30 m seems inevitable, but the anisotropic reconstruction method proposed makes it possible to limit crown characterisation to a maximum and to thus very significantly reduce the number of measurements necessary to run these light models. In the future, it would be interesting to combine this method with trunk spatial distribution modelling in order to arrive at an even more succinct characterisation of the stands, as well as to be able to model realistic heterogeneous stands.

## **Keywords**

Crown modelling; Relative Light Intensity (RLI); Light model; Diameter at 1.30 m; Heterogeneous broadleaved forest; tRAYci.