

Comparaison de méthodes optiques pour estimer l'ouverture de la canopée et l'indice foliaire en forêt feuillue

Kamel Soudani^{a,b*}, Jean Trautmann^b, Jean-Michel Walter^c

^a Unité écophysiologie, équipe phytoécologie, centre de recherches forestières, Inra-Nancy, 54280 Champenoux, France

^b Groupe de recherches en télédétection et spatialisation (CNRS), centre d'études et de recherches éco-géographiques (UMR 7007-CNRS), 3, rue de l'Argonne, 67083 Strasbourg cedex, France

^c Groupe de recherches en télédétection et spatialisation (CNRS), centre d'études et de recherches éco-géographiques (UMR 7007-CNRS), 28, rue Goethe, 67070 Strasbourg cedex, France

Reçu le 11 juillet 2000 ; accepté le 27 novembre 2000

Présenté par Henri Duranton

Abstract – Comparison of optical methods for estimating canopy openness and leaf area index in broad-leaved forests.

Based on inversion of gap fraction data (Poisson model of foliage distribution), three optical methods using the Demon, the Plant Canopy Analyzer LAI-2000 (PCA) and hemispherical photographs, have been compared to estimate canopy openness (CO) and leaf area index (LAI) in a mature, neutrophil, oak-beech-hornbeam forest on mull in eastern France. Mean CO over the whole hemisphere was similar for PCA (7.9 %) and hemispherical photographs (8.0 %). The needle method, a vertical point quadrat method, applied to the litter after leaf fall has served as a reference to LAI (4.7). The Demon provided the estimate (4.9) closest to the reference value. The PCA and hemispherical photographs underestimate mean LAI by 30 % (3.3) and 19 % (3.8), respectively, if used without correction. Based on fish-eye sensors, LAI estimates can be improved if 3 annuli (4.2) or 2 annuli (4.5) are used in place of 5 with the PCA, or by means of logarithmic averaging of gap fractions over azimuth at an appropriate angular resolution (180°: 4.6, or 120°: 5.2) with hemispherical photographs. Not taking into account azimuthal variation in gap fraction distribution generates a more important error than the error induced by light scattering near horizon. In order to improve LAI estimates, an original iterative procedure is presented, which allows the simultaneous calculation of LAI over a broad range of angular azimuthal resolutions. © 2001 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

azimuthal heterogeneity / broad-leaved forest / canopy openness / Demon / hemispherical photographs / leaf area index / PCA LAI-2000 / optical methods

Résumé – Basées sur l'inversion de fractions de trouées (modèle de Poisson de distribution du feuillage), trois méthodes optiques utilisant le Demon, le Plant Canopy Analyzer LAI-2000 (PCA) et les photographies hémisphériques zénithales ont été comparées pour estimer l'ouverture de la canopée (CO) et l'indice foliaire (LAI) dans une forêt mature, neutrophile, de chêne, hêtre et charme sur mull de l'est de la France. L'ouverture moyenne de la canopée mesurée sur l'ensemble de l'hémisphère est

*Correspondance et tirés à part.

Adresse e-mail : soudani@nancy.inra.fr (K. Soudani).

semblable pour le PCA (7,9 %) et les photographies hémisphériques (8,0 %). La méthode de l'aiguille (points-quadrats verticaux) appliquée sur la litière après chute foliaire a servi de référence pour le LAI (4,7). Le Demon fournit la valeur la plus proche (4,9). Le PCA et les photographies hémisphériques sous-estiment le LAI moyen de 30 % (3,3) et 19 % (3,8), respectivement, s'ils sont utilisés sans correction. Des améliorations dans l'estimation du LAI peuvent être obtenues avec les instruments *fish-eye* si, au lieu de cinq anneaux, on utilise trois anneaux (4,2) ou deux anneaux (4,5) du PCA, ou si l'on remplace les moyennes arithmétiques des fractions de trouées sur l'azimut par leurs moyennes logarithmiques avec une résolution angulaire appropriée (180° : 4,6, ou 120° : 5,2) pour les photographies hémisphériques. La non-prise en compte des variations azimutales dans la distribution des trouées entraîne une sous-estimation de l'indice foliaire plus importante que celle pouvant être induite par les phénomènes de dispersion de la lumière près de l'horizon. Une procédure itérative originale est présentée, qui permet d'améliorer les résultats par le calcul simultané du LAI sur toute une gamme de résolutions angulaires azimutales. © 2001 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

Demon / forêt feuillue / hétérogénéité azimutale / indice foliaire / PCA LAI-2000 / méthodes optiques / ouverture de la canopée / photographie hémisphérique

Abridged version

Leaf area index (LAI), defined as one half of the total surface area of leaves per unit of ground surface area, constitutes one of the main parameters describing forest structure. Its precise assessment is fundamental for the determination of key canopy processes like photosynthesis, evapotranspiration, primary production, etc. Several methods have been devised for estimating LAI in forest canopies. Destructive methods and allometric methods are cumbersome, time consuming and site dependent. They convey a static view of LAI in forests. Conversely, optical methods are fast and appropriate for monitoring spatial and temporal dynamics of canopy structure. These methods are based on gap fraction analyses and models of radiation transfer through plant canopies.

The goal of the present study is to compare estimates of canopy openness (CO) and LAI in a deciduous broad-leaved forest using three optical methods: the Demon, the Plant Canopy Analyzer LAI-2000 (PCA) and hemispherical photographs, the latter using fish-eye lenses. The 'needle method', a vertical point-quadrat method using a needle introduced into the litter after the leaf fall, served as a reference. The study was located in a 13 500 ha forest tract on a sandy-loamy lowland Pliocene-Quaternary terrace at Haguenau, 25 km north of Strasbourg (Alsace, France). The dominant vegetation is a mature oak forest, with beech and hornbeam as understorey species on humid and neutrophil mull. Data were sampled along a transect 350 m in length. Measurements were made (21–22 October 1996) at 1.5 m above ground, at 10-m intervals for the PCA and hemispherical photographs ($n = 36$), at regular paths (3 travels totalling $n = 40$ measurements) for various solar angles using the Demon. Vertical point-

quadrats ($n = 200$) were located randomly in order to sample leaf litter (16 January 1997).

Hemispherical photographs and PCA led to similar mean values of CO, calculated from the average gap fraction over the whole hemisphere: $8.0\% \pm 0.8\%$ (standard error) and $7.9 \pm 0.6\%$, respectively. Considering the whole range of zenith angles, gap fraction distributions were also very close. Highest differences were found near the zenith (16.7 %) and near the horizon (146.1 %). For the narrow solar incidence angle interval 65° – 89° prevailing during Demon measurements, mean gap fractions were 0.022, 0.028 and 0.013, respectively for the Demon, the PCA and hemispherical photographs. These values may be considered as identical, given the errors associated with the determination of gap fractions at high zenith angles.

The Demon and the needle method gave close LAI estimates (4.9 ± 0.1 and 4.7 ± 0.3 , respectively), whereas hemispherical photographs and the PCA provided distinctly lower estimates (3.8 ± 0.1 and 3.3 ± 0.1 , respectively). The Demon uses an original method of logarithmic gap fraction averaging, particularly appropriate for heterogeneous canopies like forests. The slight LAI overestimation is explained by the high zenith angles used to record sun beam transmittance in the late growing season, which probably compensates for the date not representative of the fully leafed phenoseason. The lower LAI estimates from the fish-eye devices may also reflect the canopy conditions at that time and, in addition, be a consequence of measurement errors due to light scattering near horizon and to azimuthal gap heterogeneity not accounted for in calculations. Removing gaps from peripheral annuli near horizon in the PCA method tends to increase more or less LAI values, depending on gap distribution. Thus, LAI increased by 12 % (3.7 ± 0.1), 27 % (4.2 ± 0.2) and

36 % (4.5 ± 0.3), for one, two and three annuli omitted. However, discarding those data modifies overall gap distribution, which in turn increases LAI spatial variability and associated errors. With respect to azimuthal gap heterogeneity analysed through hemispherical photographs, estimates are strongly affected by the gap averaging procedure: linear averaging vs logarithmic averaging. Logarithmic averaging tends to increase LAI. This effect is highest in heterogeneous canopies, where clumping is better taken into account at the canopy level. It depends mainly on the angular resolution over azimuth adopted for gap logarithmic averaging. Thus, with azimuthal intervals of 180° and 120° , results were closest to the reference measurements, i.e. 4.6 ± 0.2 and 5.2 ± 0.2 , respectively, the first value not differing significantly from the reference ($\alpha = 0.05$).

Generally speaking, LAI estimates are strongly dependent on: (1) sample unit size (angular field of view of sensors), (2) gap fraction extraction procedure (whether through transmitted light, diffuse, direct, or through gap size measurements) and processing (whether weighted or not by angular position), (3) optimal meteorological conditions needed for each instrument (clear vs overcast skies), (4) fixed regular or random sampling, or travelling along paths for different solar angles, (5) algorithms and gap averaging procedures (linear vs logarithmic), (6) errors inherent to the techniques and to the user (e.g. availability of instruments at the right date and field work under optimum meteorological conditions). Altogether, these differences make it difficult to compare the results on a rigorous statistical basis.

Whereas the PCA and hemispherical photography require overcast sky conditions, the Demon works only under sunny sky. Thus, depending on prevailing radiative climate, one technique can be more appropriate than the other. Hemispherical photography may not be preferred because it needs some investment in image analysis techniques. However, it allows detailed gap analyses over all directions of the hemisphere and qualitative interpretation of canopy structure. The PCA offers quickly available results but requires reference measurements above the canopy, therefore one needs two expensive LAI-2000 instruments for obtaining reliable data. Finally, the Demon yields quasi instantaneous results. Its built-in logarithmic gap averaging procedure is best suited to tackle the problem of discontinuous canopies. Nevertheless, it presents some drawbacks for working at high latitudes with low sun angles, or in forests where walking at a regular path to record data is hindered by a dense understorey. A common feature of optical methods is that they do not distinguish between leaves from supporting surfaces. Thus, LAI is rather a plant area index, PAI. Furthermore, calculation models are based on assumptions difficult to verify in forests, mainly the clumping of plant elements which leads to some underestimation of LAI. Our study has shown that using the logarithmic gap averaging implemented in hemispherical photography following an original iterative procedure, takes into account the azimuthal heterogeneity of gaps and improves significantly LAI estimates.

1. Introduction

Les différentes fonctions assurées par le feuillage dans les activités vitales de la plante et par ses interactions avec son environnement ont suscité un intérêt croissant pour des grandeurs descriptives relatives aux éléments foliaires dans la définition de la structure des couverts forestiers [1, 2]. L'indice foliaire, défini actuellement comme la moitié (pour tenir compte de toutes les formes foliaires) de la surface totale des feuilles par unité de surface de sol [3, 4], constitue l'un de ces descripteurs. Son estimation précise est capitale pour la détermination de certains processus clés, tels que la photosynthèse et l'évapotranspiration, la production primaire, les échanges de masse et d'énergie à différentes échelles [5]. De nombreux auteurs ont décrit et évalué les différentes méthodes directes et indirectes de mesure de l'indice foliaire. Norman et Campbell [6] et Gower et al. [7], à dix ans d'intervalle, en ont présenté de remarquables synthèses, dans les domaines agronomiques, forestiers et biogéographiques.

Il est bien connu que, en raison de la stature et de la complexité structurale et dynamique des forêts, les métho-

des directes – par récolte intégrale des feuilles, par échantillonnage destructif de la végétation –, ou semi-directes – par allométrie, par récolte de litières – sont difficiles à mettre en œuvre. Elles sont relatives au site pour lequel elles ont été établies. Elles sont, de surcroît, sensibles aux variations climatiques, à l'âge et à la densité du couvert. Elles sont laborieuses, longues et n'offrent que très peu de possibilités pour le suivi temporel de la végétation comme la phénologie, les effets de stress hydrique, des variations du rayonnement ou des attaques parasitaires. Les méthodes optiques permettent de pallier ces inconvénients. Elles sont rapides et bien adaptées au suivi de la structure des canopées forestières. Elles s'appuient sur des instruments tels que le Demon (CSIRO, Centre of Environment Mechanics, Australie), le Plant Canopy Analyzer LAI-2000 (Li-cor Inc., Lincoln, États-Unis), ultérieurement abrégé en PCA, le Sunscan (Delta-T Devices, Royaume-Uni) et les photographies hémisphériques. Ces instruments estiment l'indice foliaire en inversant soit les fractions de trouées [8, 9], soit la transmittance du rayonnement solaire sous la canopée [10]. Les méthodes optiques ont fait l'objet de nombreuses analyses critiques, évaluations, comparaisons

et inter-calibrations dans divers environnements forestiers [7, 11–22]. Leur utilisation étant désormais entrée dans la phase courante, d'importants problèmes restent cependant à résoudre quant au perfectionnement de ces outils, en particulier une meilleure prise en compte de l'agrégation foliaire [23–25] ainsi que la différenciation de la surface des troncs d'avec le reste du feuillage [26, 27].

Le but de cette étude est : a) de contribuer à l'amélioration des algorithmes pour la mesure optique du LAI par l'analyse de l'hétérogénéité azimutale du couvert en forêt feuillue caducifoliée à l'aide de photographies hémisphériques et b) de comparer les résultats obtenus par cette méthode avec ceux fournis par une méthode directe (méthode de l'aiguille [15]) et par d'autres instruments (Demon et PCA). En effet, la variabilité de la densité du feuillage selon l'azimut est rarement incorporée dans les calculs qui, en règle générale, reposent sur une hypothèse forte d'isotropie de la distribution azimutale des éléments foliaires. Nous proposons d'implanter l'algorithme du calcul de la moyenne logarithmique des fractions de trouées [28] sur l'azimut dans l'analyse des photographies hémisphériques. Nous admettons ainsi que l'agrégation foliaire est mieux prise en compte à l'échelle de la canopée.

2. Matériels et méthodes

2.1. Site d'études

La forêt indivise de Haguenau est située en Alsace (France) à environ 30 km au nord de Strasbourg, département du Bas-Rhin, arrondissement de Haguenau, canton de Haguenau (latitude 48°49' N, longitude 7° 55' E, altitude moyenne 140 m). Le site expérimental, parcelle N°1104 de l'Office national des forêts, est situé à l'extrême ouest de cette forêt. La topographie du site est plane et horizontale et le sol est sablo-argileux, avec des traces d'hydromorphie entre 50 et 60 cm de profondeur. La station est du type chênaie-hêtraie neutrophile humide sur mull à *Circaea lutetiana* L. (code 6 du catalogue des stations forestières, Office national des forêts, Haguenau, 1993 [21]). En raison de l'activité biologique intense, la litière de feuilles est entièrement décomposée en été. De plus, le tapis herbacé est pratiquement absent en été. Les essences principales de l'étage dominant sont constituées de deux espèces de chênes : le chêne pédonculé (*Quercus robur* L.) et le chêne sessile (*Quercus petraea* Mattuschka Liebl.). Le hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et le charme (*Carpinus betulus* L.) forment un sous-étage. Les caractéristiques dendrométriques de la canopée supérieure sont données dans le tableau I.

2.2. Acquisition et traitement des données

Les mesures optiques ont été effectuées au cours de l'automne 1996 (21 octobre pour les photographies hémisphériques et le PCA, 22 octobre pour le Demon). Le choix de la saison tardive s'explique par la nécessité de disposer des instruments simultanément ainsi que d'opérer sous

Tableau I. Caractéristiques dendrométriques du site étudié dans la parcelle ONF N° 1104, forêt de Haguenau.

Espèces	Âge ^b (années)	Hauteur moyenne ^c (m)	Densité ^d (arbres ha ⁻¹)	Surface terrière ^d (m ² ha ⁻¹)	Dominance relative ^d (%)
Chênes ^a	140	20–25	79	12,77	73,9
Hêtre ^a	70–80	15–20	45	3,57	20,7
Charme ^a	40–50	10–15	26	0,93	5,4

^a Chênes : *Quercus petraea* Mattuschka Liebl. et *Q. robur* L. ; charme : *Carpinus betulus* L. ; hêtre : *Fagus sylvatica* L. ^b L'âge a été donné par l'Office national des forêts, Haguenau. ^c La hauteur a été estimée visuellement. ^d La densité (moyenne : 150 arbres ha⁻¹), la surface terrière (total : 17,27 m² ha⁻¹) et la dominance relative ont été déterminées par la méthode du point-quadrat centré de Cottam et Curtis (méthode de distances basée sur des points de référence échantillonnés au hasard le long de la ligne du transect. L'espace autour de chaque point est divisé en 4 quadrants à l'intérieur desquels la distance de l'arbre le plus proche du point, son diamètre à 1,3 m et son identité spécifique sont déterminés [44]). $n = 160$ arbres, dbh $\geq 0,05$ m.

des conditions météorologiques optimum. Afin de pouvoir s'affranchir des effets de bordure, un transect long de 350 m a été éloigné de toute lisière, à une distance d'environ deux fois la hauteur moyenne des arbres. Il a été matérialisé par des piquets espacés de 10 m. Les photographies hémisphériques et les mesures par le PCA ont été réalisées à l'aplomb de chaque piquet à une hauteur de 1,5 m. Les parcours linéaires avec le Demon ont été effectués au long du transect à la même hauteur, sans interférence avec la strate herbacée très clairsemée. Enfin, la méthode de l'aiguille a été appliquée le 16 janvier 1997 sur la litière tout au long du transect.

Le Demon est constitué d'une unité de contrôle reliée à un capteur optique. Ce capteur, muni de filtres optiques, mesure le rayonnement solaire direct au voisinage de 430 nm. Les fractions de trouées sont déterminées pour différentes positions solaires. Trois passages à différentes périodes de la journée ont été effectués sous un soleil parfaitement visible. Pendant la période de mesure, les angles solaires zénithaux variaient de 65° à 89°. Le rayonnement direct au-dessus de la canopée a été mesuré dans un endroit dégagé. Sous la canopée, les mesures ont été effectuées le long de trois parcours d'environ 300 m chacun en pointant le capteur vers le soleil. Pour ces trois parcours, seize, treize et onze mesures ont été réalisées, respectivement, soit un total de quarante mesures. Une mesure est la moyenne de 1 024 mesures intermédiaires, collectées à une fréquence de 30 Hz. Pour chaque position solaire i , définie par son angle d'incidence θ_i , les valeurs de transmittance $T(\theta_i)$ sont déterminées par le rapport de rayonnement direct en dessous et au-dessus de la canopée.

Le PCA est constitué d'une unité de contrôle reliée à un capteur équipé d'une optique *fish-eye*. Il comporte cinq cellules au silicium arrangées en cercles concentriques de champs angulaires centrés sur 7°, 23°, 38°, 53° et 68°. L'optique *fish-eye* est munie d'un filtre ne laissant passer

que les radiations de longueur d'onde < 490 nm, pour lesquelles la réflexion et la transmission par les feuilles sont fortement réduites. Le PCA permet de mesurer le rayonnement solaire diffus au-dessus et en dessous de la canopée, respectivement A (Above canopy) comme référence, et B (Below canopy). Le rapport B/A pour chaque classe d'angle zénithal centré sur θ_i correspond à la transmittance $T(\theta_i)$. Les acquisitions ont été réalisées par ciel couvert uniforme, sans vent. Un seul instrument a été utilisé. Les mesures sous couvert ont été encadrées par deux mesures de référence hors couvert dans une clairière voisine à une distance minimum de 3,5 fois la hauteur des arbres. Pour chaque mesure B , la mesure A correspondante a été déterminée par interpolation linéaire entre les deux mesures de référence.

Les photographies hémisphériques ont été prises au moyen d'un objectif *fish-eye* Nikkor à projection orthographique, ayant un angle de champ de 180° et une focale de 10 mm. Le boîtier photographique étant orienté vers le nord magnétique et le zénith, la verticalité de l'axe optique a été déterminée à l'aide d'un niveau à bulle. Le film noir et blanc utilisé sans filtre est de type Kodak TMX 100° ISO. L'exposition a été déterminée hors forêt à l'aide d'un posemètre dirigé vers le zénith. Cette exposition a été corrigée en surexposant de deux unités afin d'augmenter le contraste entre la végétation et le ciel et de donner au ciel un niveau de noir uniforme sur le négatif. Les photographies ont été prises par ciel couvert afin d'éviter les taches de lumière dues au soleil et aux réflexions provoquées par le feuillage. Le cliché est un disque de 20 mm de diamètre montrant l'ensemble de la canopée au-dessus du niveau de la prise de vue. Les clichés ont été visualisés sur un écran d'ordinateur et numérisés à l'aide d'une caméra vidéo CCD Panasonic WV-CD 130 (256 niveaux de gris, résolution 512×512 pixels), munie d'un objectif Micro-Nikkor 55 mm, et reliée à une carte d'acquisition Cyclope introduite dans l'ordinateur. Un seuillage manuel, par comparaison visuelle avec l'image analogique, permet de transformer la photographie négative numérisée en niveaux de gris en une image binaire, le ciel en noir et la végétation en blanc. La discrétisation de l'image en 24 secteurs azimutaux de 15° chacun et de 18 cercles concentriques de 5° d'intervalle zénithal a été effectuée grâce au logiciel Couvimag, mis au point par Folmer [29] et adapté à la projection orthographique par Folmer et Walter. Chaque maille de la grille correspond à une portion de la canopée pour laquelle la fraction de trouées (rapport du nombre de pixels noirs sur le nombre total de pixels) a été déterminée.

Outre ces trois méthodes optiques, la méthode de l'aiguille (point-quadrate vertical [15]) a fourni des résultats qui ont servi de référence. Elle consiste à introduire verticalement une fine aiguille d'environ 1 mm de diamètre dans la litière et à compter le nombre de feuilles percées. Pour une aiguille verticale et une surface foliaire horizontale, le nombre de feuilles percées correspond à une estimation ponctuelle de l'indice foliaire. Il est supposé que toutes les feuilles mortes sont restées sur place (pas de

transferts latéraux ni de décomposition avancée) et que cette litière représente la totalité des feuilles de l'été précédent. Bien que les vitesses de décomposition des feuilles de chênes, de hêtre et de charme soient différentes dans les conditions du mull humide, l'identification des litières en tant qu'espèces et provenant des chutes automnales précédentes a pu s'effectuer sans ambiguïté, facilitée en outre par la disparition très rapide de la litière antérieure grâce à l'activité biologique intense du sol pendant la saison chaude. Lorsqu'elle est appliquée sur un échantillon important, cette méthode fournit des estimations plausibles de l'indice foliaire. Dans ce travail, 200 points de mesure disposés aléatoirement le long de deux lignes parallèles au transect et séparées de 10 m, ont été soigneusement échantillonnés après la chute totale des feuilles, à un moment où l'activité biologique peut être considérée comme réduite, voire nulle. Ce travail a été facilité, en plus, par la quasi absence de tapis herbacé. Le recensement est donc considéré comme fiable.

La comparaison des résultats entre les séries appariées (photographies hémisphériques et PCA) ou non (toutes les autres) s'appuie sur un test non-paramétrique de différences des moyennes par permutations aléatoires, réalisé à l'aide du logiciel Biomstat [30]. Le calcul consiste à sélectionner au hasard 10 000 partitions de $n_1 + n_2$ valeurs en deux jeux de données d'effectifs n_1 et n_2 chacun. Une distribution empirique des 10 000 différences des LAI moyens obtenus est calculée, à laquelle est alors comparée la différence observée. La technique diffère suivant que les données sont appariées ($n_1 = n_2$) ou non ($n_1 \neq n_2$). Le seuil de signification est de 0,05.

2.3. Théorie

L'indice foliaire est estimé par l'inversion des fractions de trouées ou des valeurs de transmittance, en considérant que les éléments du feuillage sont distribués selon un modèle de Poisson. Les hypothèses sous-jacentes à ce modèle peuvent se décliner de la façon suivante [31] : les éléments foliaires sont distribués de façon aléatoire et sans direction azimutale privilégiée, sont de petite taille par rapport au volume végétal considéré et sont opaques à la lumière. Dans sa formulation la plus connue, ce modèle s'écrit :

$$- \ln P(\theta) \cdot \cos(\theta) = G(\theta, \alpha) \cdot LAI = V(\theta) \quad (1)$$

où LAI est l'indice foliaire, $P(\theta)$ est la fraction, ou fréquence, des trouées dans la direction θ , probabilité pour qu'un faisceau lumineux d'incidence θ ne soit pas intercepté par le feuillage, $G(\theta, \alpha)$ est la projection d'une unité de surface foliaire d'inclinaison α dans un plan perpendiculaire à la direction θ , $V(\theta)$ est le nombre de contacts entre le faisceau lumineux et les éléments foliaires sur une longueur de pénétration $1/\cos(\theta)$. Le rapport $G(\theta, \alpha)/\cos(\theta)$ est le coefficient d'extinction de la lumière rapporté au plan horizontal dans la loi de Beer [8].

Les trois méthodes optiques utilisées fournissent les fractions de trouées, respectivement les valeurs de trans-

mittance ($P(\theta) \equiv T(\theta)$), pour différentes directions angulaires. Lang [3, 28, 32, 33] a montré que les quantités $V(\theta)$, données par $-\ln P(\theta) \cdot \cos \theta$, peuvent être reliées linéairement à θ . Ainsi :

$$V(\theta) = A + B \cdot \theta \quad (2)$$

où A et B sont les paramètres de la régression du nombre de contacts sur θ , exprimé en radians. Sous cette forme, $V(\theta)$ est utilisé pour déterminer numériquement l'intégrale de Miller [34]. En effet :

$$\begin{aligned} LAI &= 2 \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} V(\theta) \cdot \sin(\theta) d\theta = 2 \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \\ &(A + B \cdot \theta) \cdot \sin \theta d\theta = 2 \cdot (A + B) \end{aligned} \quad (3)$$

sous l'hypothèse d'une distribution sphérique des angles foliaires. L'indice foliaire est donc donné par deux fois la somme de la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite de régression.

Lang et Xiang [33] notent que l'équation (1) est valable dans toutes les directions de la canopée ayant une transmittance non nulle, \ln de zéro étant indéterminé. En effet, l'équation (1) peut s'écrire de deux manières :

$$-\overline{\ln P(\theta)} \cdot \cos(\theta) = G(\theta, \alpha) \cdot LAI = V(\theta) \quad (4)$$

$$-\overline{\ln P(\theta)} \cdot \cos(\theta) = G(\theta, \alpha) \cdot LAI = V(\theta) \quad (5)$$

Dans l'équation (4), on considère une moyenne arithmétique des fractions de trouées sur un parcours rectiligne, alors que dans l'équation (5), on considère la moyenne arithmétique des logarithmes népériens des fractions de trouées sur des portions intermédiaires de ce même parcours [28, 33].

À la différence du parcours rectiligne effectué par le Demon pour chaque angle solaire, un balayage azimutal est réalisé sur les photographies hémisphériques pour chaque angle zénithal. Ce balayage azimutal permet d'agréger les fractions de trouées selon différents intervalles angulaires sur l'azimut. En effet, l'algorithme utilisé pour le calcul de la moyenne logarithmique par agrégation des fractions de trouées obtenues par les photographies hémisphériques peut s'écrire ([35], d'après [28]) :

$$\overline{\ln P} = \frac{1}{n-m+1} \cdot \sum_{j=1}^{n-m+1} \ln \left[\frac{1}{m} \cdot \sum_{i=j}^{j+m-1} P_i \right] \quad (6)$$

où m est le nombre d'observation agrégées (secteurs azimutaux) définissant un « pas » parmi un nombre total d'observations n , pour un angle zénithal donné. i et j sont des compteurs d'observations et de pas, respectivement. Ainsi, si l'azimut est divisé en n secteurs angulaires, par exemple $n = 24$ secteurs de 15° chacun, une valeur de $m = 3$ (pas) correspond au nombre de secteurs azimutaux utilisés, donc à un champ angulaire, une résolution, de $3 \times 15^\circ = 45^\circ$. Sur ce champ angulaire, une moyenne linéaire des 3 valeurs de fractions de trouées est calculée. Ce processus d'agrégation des données est répété sur

l'ensemble des secteurs azimutaux pour l'anneau zénithal considéré. Les résultats successifs sont transformés en leur logarithme. À la fin de cette itération azimutale, une moyenne de ces logarithmes est calculée. Ce processus est répété pour tous les anneaux zénithaux. Si $m = 24$ ($24 \times 15^\circ = 360^\circ$), une moyenne linéaire des fractions de trouées est calculée sur l'ensemble des 24 secteurs azimutaux, la procédure habituellement utilisée. À l'opposé, si $m = 1$ ($1 \times 15^\circ = 15^\circ$), la limite de résolution de l'analyse, c'est une moyenne logarithmique qui est calculée sur l'ensemble des secteurs. Entre ces deux extrêmes, plusieurs autres niveaux d'agrégation des fractions de trouées peuvent être obtenus pas à pas, par exemple $m = 12$ ($12 \times 15^\circ = 180^\circ$), $m = 8$ ($8 \times 15^\circ = 120^\circ$), $m = 6$ ($6 \times 15^\circ = 90^\circ$), $m = 4$ ($4 \times 15^\circ = 60^\circ$), $m = 3$ ($3 \times 15^\circ = 45^\circ$) et $m = 2$ ($2 \times 15^\circ = 30^\circ$). Le programme LAIMLR de Cimes permet de déterminer automatiquement la résolution azimutale et de tester son effet sur l'estimation du LAI et de l'erreur associée [35].

Les hypothèses liées au modèle de Poisson sont difficilement vérifiables pour les couverts forestiers. La dispersion du feuillage dans la canopée est rarement aléatoire. Les organes élémentaires de la végétation présentent une organisation hiérarchique : branches autour du tronc, rameaux autour des branches, feuilles autour des rameaux [36]. Ceci est particulièrement le cas des conifères, où la disposition des aiguilles autour des branches est fortement contagieuse [16, 23, 28]. De plus, les conditions écologiques, les phénomènes complexes de compétition entre les arbres ainsi que les pratiques sylvicoles, modifient continuellement l'architecture des canopées. L'indice foliaire estimé par les méthodes indirectes correspond au produit Ω LAI, l'indice foliaire « effectif » (LAI_e ou L_e , [23, 31]). Le paramètre Ω est l'indice d'agrégation foliaire ou de contagion (*clumping index*). Pour une dispersion aléatoire $\Omega = 1$, pour une distribution agrégative $\Omega < 1$, et $\Omega > 1$ pour une distribution régulière du feuillage. Dans les forêts, le plus souvent discontinues et hétérogènes, $\Omega < 1$. Il est supposé que l'agrégation des fractions de trouées selon la procédure décrite ci-dessus pour les photographies hémisphériques permet de mieux rendre compte de l'agrégation foliaire à l'échelle de la canopée.

3. Résultats

Avant d'aborder l'étude détaillée de l'indice foliaire, les valeurs de l'ouverture relative de la canopée (CO, pour *canopy openness*), paramètre structural compagnon du LAI auquel ce dernier est fortement relié, seront présentées. Quoique plusieurs formulations puissent en être données [22, 37, 38], l'ouverture relative est calculée ici comme la moyenne des fractions de trouées dans le plan horizontal (photographies hémisphériques) ou rapportées à l'hémisphère grâce à une pondération (PCA). La distribution des fractions de trouées complète cette information. Les statistiques descriptives de CO et de LAI sont présentées dans le *tableau II*. La *figure 1* montre la variabilité spatiale de ces deux indices déterminés par photo-

Tableau II. Statistiques relatives à l'indice foliaire et à l'ouverture de la canopée dans le site étudié en forêt de Haguenau, parcelle ONF N° 1104

Statistique	LAI								CO (%)		
	Points quadrats aiguille	Photographies hémisphériques			Plant canopy analyzer				Demon	PH	PCA
		Moyenne linéaire ^a	Moyenne ^a logarithmique			Anneaux utilisés					
		360°	180°	120°	5	4	3	2			
<i>n</i>	200	36	36	36	36	36	36	36	40	36	36
Médiane	5,0	3,7	4,5	5,1	3,2	3,7	4,0	4,4	–	7,1	7,4
Écart	1–9	2,5–5,6	3,2–8,1	3,5–8,8	2,7–4,3	2,7–5,4	3,1–6,3	2,7–8,1	–	0,8–23,8	1,7–17,6
Moyenne	4,7	3,8	4,6	5,2	3,3	3,7	4,2	4,5	4,9 ^b	8,0	7,9
Erreur-T. ^c	0,3	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1 ^b	0,8	0,6
Différence ^d	–	0,9	0,1	0,5	1,4	1,0	0,5	0,2	–	–	–
<i>P</i> ^e	–	0,000 4	0,407 4	0,048 0	0,000 0	0,000 2	0,024 6	0,216 4	–	–	–

^a Moyenne des fractions de trouées: linéaire sur tout l'azimut ou logarithmique en modifiant la résolution azimutale (champ angulaire). ^b Ce n'est pas une moyenne, mais un résultat global et son erreur-type issus du traitement de quarante passages du Demon suivant la hauteur du soleil. ^c Erreur type. ^d Différence avec la valeur de référence (méthode de l'aiguille). ^e Valeur de *P* pour tester la différence^d par permutations aléatoires (*n* = 10 000). Seuil : *P* = 0,05.

graphies hémisphériques. Elle démontre que, si la forêt est considérée comme homogène sur le plan phytosociologique, elle ne l'est guère sous l'aspect structural. En effet, d'importantes variations locales se traduisent par des alternances de petites trouées (à 25 m, 140–160 m, 270 m) et de fortes densités du couvert (à 40 m, 100–125 m, 330 m). Les relations entre LAI et CO sont complexes [39] : le LAI n'est pas nécessairement très faible au niveau d'une large trouée, dont certaines directions azimutales peuvent être fortement obstruées par le feuillage.

3.1. Ouverture relative de la canopée et fractions de trouées

Le CO moyen est identique pour les photographies hémisphériques et le PCA : 8,0 % et 7,9 %, respective-

ment (écart : 0,1 %, *P* = 0,4733). Des différences sont cependant constatées dans la distribution angulaire des fractions de trouées (figure 2). Ainsi, pour les deux instruments, des écarts non négligeables sont observés sur les moyennes près du zénith à 7° (0,025, soit 16,7 %) et de l'horizon à 68° (0,017, 146,1 %). Ces écarts se réduisent si on re-échantillonne les photographies hémisphériques en considérant les classes d'angle du PCA. Ils sont alors de 0,011 (8,3 %), 0,014 (12,1 %), 0,003 (3,3 %), 0,009 (18,5 %) et de 0,016 (124,6 %), respectivement pour 0°–13°, 16°–28°, 32°–43°, 47°–58° et 61°–74°. Les distributions angulaires des fractions de trouées ne sont pas significativement différentes (test unilatéral de Wilcoxon, *P* = 0,916 8). La dispersion des fractions de trouées autour de la moyenne par classe d'angle est importante, particulièrement pour les photographies hémisphériques. Cette variabilité diminue lorsque l'angle zénithal augmente : la végétation apparaît de plus en plus épaisse et les trouées sont de plus en plus petites avec une distribution plus régulière. Pour l'intervalle angulaire de 65°–89°, qui correspond aux positions solaires utilisées par le Demon, la fraction de trouées est de 0,013, 0,028, et 0,020, respectivement pour les photographies hémisphériques, le PCA et le Demon. Ces valeurs peuvent être considérées comme proches, compte tenu des erreurs liées aux mesures à faible hauteur au-dessus de l'horizon. Au total, les trois instruments utilisés fournissent des résultats cohérents pour l'analyse de l'ouverture de la canopée et des fractions de trouées.

3.2. Indice foliaire

La méthode de l'aiguille et le Demon fournissent des estimations voisines : $4,7 \pm 0,3$ (erreur type) et $4,9 \pm 0,1$, respectivement (tableau II). La valeur de 4,9 est un résultat global, selon la procédure habituellement utilisée (figure 3). Le meilleur ajustement à l'équation de la droite est obtenu grâce aux moyennes logarithmiques ($r^2 = 0,92$ à partir de l'équation (5), contre $r^2 = 0,87$ pour les moyennes linéaires à partir de l'équation (4)). Le Demon surestime légèrement le LAI par rapport à notre référence (4,2 %).

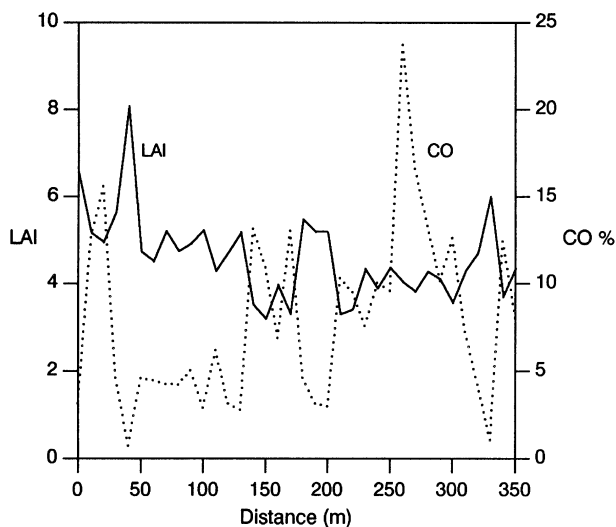


Figure 1. Profil d'indice foliaire (LAI) et d'ouverture de la canopée (CO) au long d'un transect dans une chênaie mature en forêt de Haguenau, Alsace.

Valeurs obtenues en utilisant les photographies hémisphériques (moyennes logarithmiques des fractions de trouées sur l'azimut au pas de $2 \times 180^\circ$, sur tout l'hémisphère, $\varepsilon = 0,002$, voir texte).

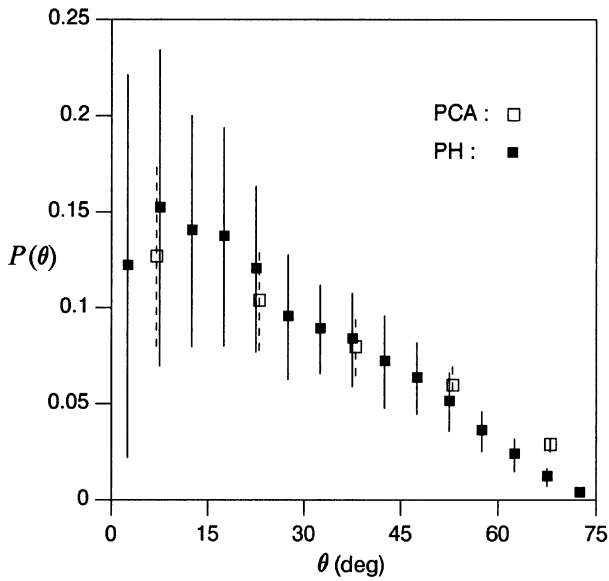


Figure 2. Fraction de trouées P en fonction de l'angle zénithal θ . Moyennes $\pm 0,5$, écart type ($n = 36$). PH : photographies hémisphériques ; PCA : Plant Canopy Analyzer.

Une comparaison statistique selon la méthode énoncée plus haut (voir 2.2 Acquisition et traitement des données) entre les valeurs du Demon et celles de l'aiguille ne peut se réaliser que sur deux séries. Aussi, la série des quarante valeurs partielles du Demon (moyenne logarithmique des fractions de trouées) a-t-elle été utilisée, fournissant un LAI moyen de $5,1 \pm 0,1$ (médiane : 5,1 ; amplitude : 3,4–7,2), nettement supérieur au résultat global par régression. La surestimation est alors de 0,4 (8,5 %), tout en n'étant pas significative ($P = 0,0665$). Les résultats obtenus selon les deux méthodes sont cohérents entre eux et avec ceux de l'aiguille.

Les photographies hémisphériques et le PCA fournissent les valeurs moyennes suivantes : $3,8 \pm 0,1$ (moyennes linéaires des fractions de trouées sur tout l'hémisphère) et $3,3 \pm 0,1$ (5 anneaux), respectivement. La différence de 0,5 entre ces moyennes est très significative ($P = 0,0003$). Par rapport à la méthode de l'aiguille, les sous-estimations sont de 0,9 (19,1 %) pour les photographies hémisphériques et de 1,4 (29,8 %) pour le PCA, différences hautement significatives ($P = 0,0004$ et $P = 0,0000$, respectivement).

L'omission des données provenant de certains anneaux périphériques tend à compenser la sous-estimation du LAI. Ainsi, l'augmentation de l'indice foliaire moyen est-il de 12 % ($3,7 \pm 0,1$), 27 % ($4,2 \pm 0,2$) et 36 % ($4,5 \pm 0,3$), respectivement pour un, deux et trois des anneaux périphériques omis parmi les cinq anneaux du PCA. La dernière valeur ne diffère que de 0,2 avec la valeur de référence ($P = 0,2164$). Il est à souligner que la variabilité des estimations s'accroît lorsque le champ angulaire zénithal s'amenuise (figure 3). Bien qu'il eut été possible de le faire sur les photographies hémisphériques [40], la suppression d'anneaux périphériques équivalents à ceux du

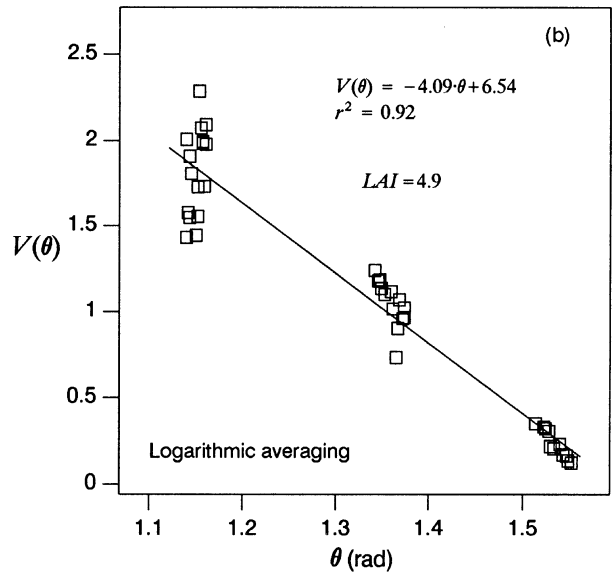
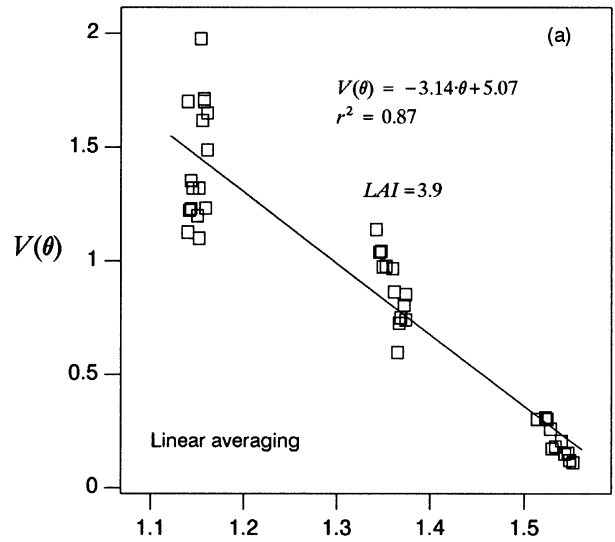


Figure 3. Nombre moyen de contacts V en fonction de l'angle zénithal θ utilisant la moyenne linéaire (a) et la moyenne logarithmique (b) des fractions de trouées sur l'azimut ($n = 40$). Estimations obtenues par le Demon.

PCA n'a pas été réalisée. Un tel traitement eut permis une comparaison plus rigoureuse. Néanmoins, ces résultats traduisent la manière courante d'utiliser les instruments : par les photographies hémisphériques et par le PCA, les fractions de trouées sont moyennées linéairement sur l'azimut (équation (4)) ou sont mesurées en intégrant suivant des anneaux — ce qui revient au même, puis des corrections sont pratiquées empiriquement par suppression d'anneaux périphériques.

En appliquant l'équation (4) sur l'ensemble de l'hémisphère, la sous-estimation du LAI est d'autant plus accentuée que la dispersion du feuillage s'écarte davantage du modèle aléatoire. Les photographies hémisphériques permettent d'analyser avec souplesse la répartition des frac-

tions de trouées dans toutes les directions de l'espace. Si les calculs sont effectués, non plus seulement en utilisant les moyennes linéaires des fractions de trouées sur 360° d'azimut, mais en utilisant des intervalles angulaires restreints (180° , 120° , 90° , 60° , 45° , et 15° , successivement) et en prenant le logarithme de ces moyennes (équation (6)), on estime alors l'indice foliaire selon l'équation (5). De plus, l'augmentation de la résolution azimutale a pour effet d'accroître l'indice foliaire. En effet, pour les 36 photographies hémisphériques, cette augmentation varie entre 2–31 %, 11–57 %, 13–60 %, 23–92 %, 27–104 %, 38–118 % et 61–153 % par photosite, soit en moyenne, une augmentation de 9 %, 22 %, 32 %, 47 %, 61 %, 80 % et de 110 %, respectivement pour une résolution de 180° , 120° , 90° , 60° , 45° , 30° et 15° , et par rapport à la valeur de base 4,2 pour la résolution de 360° (figure 4 et tableau II). Notons que dans ce traitement, aux valeurs nulles des fractions de trouées a été ajoutée une quantité $\varepsilon = 0,002$ de manière à pouvoir calculer leurs logarithmes. Cette quantité ε a été choisie comme une erreur relative dans la détermination d'un pixel noir ou blanc sur l'ensemble de l'image à la résolution de 512×512 . Une valeur $\varepsilon = 0,001$ (cette valeur est utilisée dans le logiciel Hemiview[®] [37] comme limite inférieure pour le calcul des nombres de contacts. Elle est justifiée par la résolution de l'image) correspondrait à l'erreur relative moyenne pour un secteur de l'hémisphère qui est complètement obstrué. C'est la première valeur qui a été retenue, en raison de l'importante variation du nombre de pixels ($251-2\,984$) par secteur angulaire en projection orthographique de l'image. L'augmentation régulière de la valeur du LAI qui est la conséquence de ce traitement s'explique par la probabilité accrue de rencontrer une fraction de trouée nulle à mesure que la résolution azimutale de l'analyse s'affine. Cet effet est d'autant plus marqué que la forêt est plus dense, ce qui peut entraîner une dérive considérable vers des valeurs irréalistes du LAI. En pratique, on peut considérer que la résolution azimutale optimum pour le peuplement étudié est située entre 180° et 120° . Alors, le LAI devient $4,6 \pm 0,2$ et $5,2 \pm 0,2$, respectivement, pour $\varepsilon = 0,002$. Les différences de LAI avec la valeur de référence sont alors de 0,1 (2,1 %) et 0,5 (10,6 %), la première n'étant pas significative ($P = 0,4074$), alors que la dernière l'est ($P = 0,048\,0$). Par comparaison, en choisissant $\varepsilon = 0,001$, les estimations auraient été de 4,7 (exactement la valeur de référence) et de 5,3, respectivement pour 180° et 120° de résolution azimutale. Pour $\varepsilon = 0$, la répartition du LAI selon la résolution azimutale varie en sens contraire de celui observé précédemment (figure 4), car les fractions de trouées nulles ne sont plus prises en compte. Ceci explique qu'à partir d'une résolution azimutale plus fine (60° , 45° et 15°), on observe une diminution du LAI à mesure que le nombre de portions obstruées de l'hémisphère augmente. Un maximum s'observe cependant à 90° (4,2). Dans ce cas, la sous-estimation de 0,5 avec la valeur de référence reste significative ($P = 0,026\,8$). Au total, ces résultats mettent en évidence le rôle d'un éventuel facteur de correction ε et surtout l'importance du choix de la

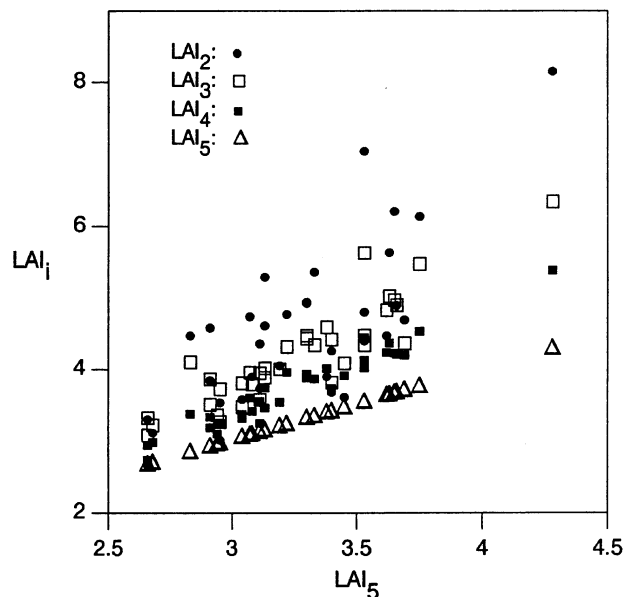


Figure 4. Effet sur le LAI de la suppression d'anneaux périphériques du PCA.

LAI₅ : les cinq anneaux sont utilisés. LAI_i : i , nombre d'anneaux utilisés au cours de traitements successifs des valeurs de transmittance.

résolution azimutale dans le calcul de l'indice foliaire pour permettre de mieux cerner l'hétérogénéité structurale de la forêt, et en conséquence, l'agrégation foliaire à l'échelle de la canopée.

4. Discussion

Il est relativement aisé d'expliquer les écarts entre les estimations selon les méthodes employées [22]. On peut distinguer les parts relatives aux principes de mesures, aux équipements, au traitement des données brutes et aux conditions expérimentales.

4.1. Principe de mesure et équipements

Les trois instruments utilisés ont en commun d'enregistrer les radiations dans le domaine visible, restreint au bleu dans le cas du Demon et du PCA. Les systèmes optiques diffèrent fortement par leur résolution angulaire. Ainsi, l'angle de visée est d'environ 1° pour le Demon (le diamètre apparent du disque solaire est de $0,5^\circ$). Les optiques *fish-eye* ont un champ angulaire de 74° et de 90° , respectivement pour le PCA et la photographie hémisphérique. Les données brutes fournies diffèrent également : valeurs de transmittance du rayonnement direct pour le Demon, du diffus pour le PCA, niveaux de gris transformés en pixels noirs et blancs par seuillage pour les photographies hémisphériques, qui sont recueillies sous rayonnement diffus. L'utilisation du Demon est assujettie à la trajectoire apparente du soleil, donc à la date des mesures.

La détermination des fractions de trouées sur les photographies hémisphériques est peu fiable lorsque les trouées

sont de très petite taille – elles sont alors sous-estimées – et lorsque les trouées sont de grande taille – elles sont alors surestimées – lorsqu'un même seuil est appliqué sur l'ensemble de la photographie pour classer les pixels en ciel et feuillage. L'espace hémisphérique est discrétisé en azimut et en zénith sur les photographies hémisphériques – permettant une analyse spatiale très fine des trouées – alors qu'il ne l'est qu'en anneaux zénithaux pour le PCA ; dans ce cas, la mesure de transmittance est fortement biaisée en cas de grande trouée opposée à un feuillage dense, car le capteur prend une moyenne, à moins d'utiliser un cache et de faire deux mesures séparées. D'une façon générale, les mesures de transmittance et des fractions de trouées aux angles d'incidence extrêmes sont peu sûres en raison des phénomènes de dispersion des rayonnements (PCA) et des réflexions multiples (photographies hémisphériques) au travers du feuillage.

4.2. Traitement des informations brutes et algorithmique

De nombreux travaux dans différents types de forêts signalent que les méthodes indirectes, basées sur le modèle de Poisson, sous-estiment l'indice foliaire. Ainsi, Gower et al. [7] constatent que cette sous-estimation est d'environ 25–30 % dans la plupart des canopées forestières. Sur notre site, la sous-estimation est de 18 % et de 30 %, respectivement pour les photographies hémisphériques et le PCA.

Les trois instruments sont accompagnés d'outils de traitement des données permettant l'inversion des fractions de trouées. L'algorithme pour réaliser cette inversion découle des travaux de Miller et de Lang. Les résultats obtenus à l'aide de l'algorithme original [32] tendent à sous-estimer systématiquement le LAI, car elles ne prennent pas en compte l'agrégation foliaire. Pour corriger ce biais, Lang et Xiang ont proposé, sur une base théorique solide [33], de calculer la moyenne logarithmique des fractions de trouées, préalablement traitées linéairement sur une distance déterminée par les dimensions foliaires spécifiques. Cette procédure peut être implantée aisément en photographie hémisphérique et, avec moins de souplesse, sur le PCA. Dans ces cas, le traitement s'effectue en fonction de l'azimut, ce qui autorise du même coup une analyse de l'hétérogénéité azimutale de la canopée. Notons que les calculs selon les équations (4) et (5) aboutissent à des résultats similaires lorsque l'hypothèse de distribution aléatoire est vérifiée (isotropie azimutale de la distribution du feuillage). Gardingen et al. [24] signalent que la plupart des travaux ne distinguent pas entre ces deux procédures de calcul. Le rapport d'indices foliaires estimés par les équations (4) et (5) peut être considéré comme une approximation de l'indice d'agrégation Ω [41]. Ce rapport est de 0,9 (4,2/4,6 avec $\varepsilon = 0,002$, ou 3,8/4,2 avec $\varepsilon = 0$), typique d'une forêt feuillue fermée [7, 23], à comparer avec celui (0,7) trouvé par Planchais et Pontailier [20] dans une hêtraie de l'Île-de-France.

Le traitement des données par les capteurs *fish-eye* peut différer suivant les implantations logicielles. Le champ angulaire zénithal de ces capteurs est modulable par

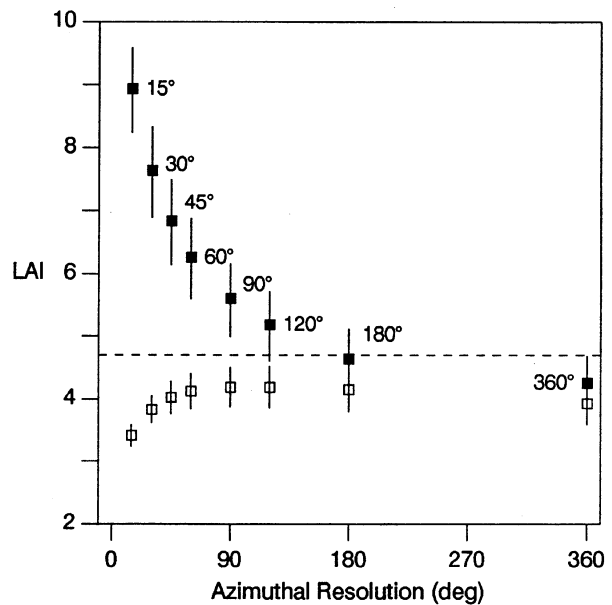


Figure 5. Effet de divers niveaux d'agrégation azimutale des fractions de trouées sur l'estimation du LAI.

Les abscisses représentent la gamme des résolutions azimutales pour lesquelles le LAI est calculé. Ligne tiretée : LAI par la technique de l'aiguille. Symboles : LAI moyen $\pm 0,5$ écart type ($n = 36$). Carrés pleins : les fractions de trouées nulles sont remplacées par $\varepsilon = 0,002$ pour pouvoir calculer leurs logarithmes. Carré vides : $\varepsilon = 0$. Voir texte.

suppression d'anneaux périphériques. En effet, divers travaux [13, 15, 16, 20] attribuent une part importante de la sous-estimation de l'indice foliaire par le PCA aux phénomènes de dispersion de la lumière dans le bleu par le feuillage près de l'horizon, ce qui tendrait à biaiser positivement les fractions de trouées à ce niveau. Ce phénomène est, à notre connaissance, peu documenté dans la littérature [13, 14], les auteurs se contentant de le citer. Pour les photographies hémisphériques, nous ne l'avons pas observé. En revanche, les petites trouées bas sur l'horizon tendent à disparaître en fonction du seuillage appliqué, ce qui peut être partiellement corrigé sans affecter significativement les grandes trouées, en appliquant un filtre de contraste approprié (*sharpening*) sur l'image, ce qui, à son tour, diminue les estimations de LAI. Planchais et Pontailier [20] ont observé une augmentation de LAI de 14 % et 25 %, respectivement, pour un et deux anneaux omis, à comparer aux 12 % et 27 % dans la présente étude. Ils ont, par ailleurs, fourni une analyse détaillée des erreurs associées à cette procédure. Le résultat lié à cette omission varie selon le site considéré et la hauteur du couvert. Cependant, l'omission des anneaux périphériques modifie plus ou moins fortement la distribution zénithale des trouées. Ceci a pour effet d'augmenter l'indice foliaire, sa variabilité spatiale ainsi que les erreurs associées à son estimation (figure 5 et [20, 40]).

Les fractions de trouées traitées par le PCA sont pondérées en fonction de l'angle zénithal, de manière à rendre compte des corrections d'aires lorsque l'on passe du plan

horizontal à l'hémisphère. Cette pondération n'a pas été utilisée dans le présent travail en photographie hémisphérique, mais elle est facile à implanter. Certains logiciels (Cimes [35], Gla[®] [42], Winphot[®] [43]) la proposent afin de conformer le traitement des photographies hémisphériques avec le standard du PCA et, ainsi, de faciliter les comparaisons.

En résumé, la pondération des fractions de trouées en fonction de l'angle zénithal permet de mieux tenir compte de la dimension réelle des trouées dans l'hémisphère. Cette pondération n'est pas généralisée sur tous les logiciels. Le remplacement des fractions de trouées nulles par une valeur ε (erreur relative sur la détermination d'un pixel), afin de pouvoir calculer leur logarithme, peut contribuer à améliorer l'estimation du LAI dans les canopées très fermées où son effet est très sensible. Il devra être associé aux calculs par moyennes logarithmiques des fractions de trouées suivant diverses résolutions angulaires. L'analyse de l'hétérogénéité azimutale de la canopée prendra sa pleine signification qui paraît plus importante que l'omission quelque peu arbitraire de données provenant des zones proches de l'horizon.

4.3. Conditions expérimentales

Finalement, des erreurs de mesure propres à chaque technique, aux performances des instruments, aux conditions météorologiques régnant lors des mesures et au facteur personnel influencent d'une manière ou d'une autre les résultats. Par exemple, le seuillage en photographie hémisphérique joue un grand rôle et comporte une part d'appréciation subjective. La manière de tenir le Demon selon les difficultés du parcours en sous-bois constitue un second exemple. La disponibilité d'un PCA supplémentaire pour les mesures de référence hors couvert aurait eu raison des erreurs liées à l'interpolation entre deux mesures par un instrument unique. Il est probable que si les mesures avaient été faites le 25 juin sur un feuillage pleinement développé et sur une gamme de positions solaires beaucoup plus étendue ($\theta_{min} = 27^\circ$ à 12h TU) que le 25 octobre ($\theta_{min} = 62^\circ$), les erreurs phénomologiques et angulaires – qui se compensent mutuellement – sur les estimations du Demon auraient été éliminées. De même, la saison tardive pour l'expérience a eu une influence non négligeable dans la sous-estimation des valeurs par les capteurs *fish-eye*. L'image de la canopée le 21 octobre ne peut refléter qu'incomplètement le feuillage échantillonné au sol au cours du 16 janvier suivant.

5. Conclusion

Les méthodes optiques, Demon, PCA et photographies hémisphériques, ont fourni des valeurs d'indice foliaire et d'ouverture de la canopée dans une chênaie de l'est de la France. Ces résultats ont été comparés et évalués. Les

estimations du Demon sont les plus proches de celles de la méthode de l'aiguille qui a servi de référence. Il est cependant nécessaire de relativiser ce rapprochement, car les estimations du Demon dépendent de la position du soleil pendant la période de mesure. L'utilisation de la moyenne logarithmique des fractions de trouées est à l'avantage de cette technique. Quant au PCA, il sous-estime les valeurs d'indice foliaire, qui peuvent cependant être corrigées par l'abandon des données de fractions de trouées mesurées près de l'horizon. Dans beaucoup de cas, l'écart avec les valeurs de référence peut alors être réduit, malgré le caractère empirique de cette méthode. Les photographies hémisphériques permettent une analyse directionnelle précise de la distribution des trouées tant en zénith qu'en azimut. Si l'abandon de données près de l'horizon va dans le même sens que celui opéré sur le PCA vers une amélioration des résultats, la prise en compte d'une moyenne logarithmique par agrégation des fractions de trouées sur l'azimut permet, sans pertes de données, de mieux refléter l'anisotropie azimutale de la distribution du feuillage. L'hypothèse d'isotropie azimutale inhérente au modèle de Poisson est alors utilisée localement et non plus globalement. Une utilisation appropriée du modèle de Poisson fournit ainsi des résultats plus réalistes. En définitive, « le LAI estimé par le processus d'inversion peut ne pas être l'exacte mesure du LAI de la canopée réelle, même s'il pouvait être mesuré avec précision. Cependant, une canopée idéale avec un LAI estimé se comportera d'une manière très semblable à une canopée réelle tant que l'interception des rayonnements est concernée » [37].

Remerciements. Ce travail, partie de la thèse de doctorat du premier auteur, a été financé par le Programme national de télédétection spatiale 1998 (Modèles nouveaux pour l'estimation du LAI forestier par télédétection sur unités hétérogènes. Développements théoriques et mesures associées, CNRS, Contrat N° 98RR1/0169). Il a également bénéficié du soutien du Programme d'utilisation scientifique de l'avion de recherche atmosphérique et de télédétection Arat (Cnes, Insu, IGN, Météo France), qui a fourni des enregistrements radiométriques aéroportés de très haute résolution. Nous remercions vivement N. Bréda, qui a bien voulu mettre à notre disposition le Demon et le PCA LAI-2000, et pour son aide dans les analyses. Nous sommes redevables à l'équipe de l'Office national des forêts (ONF), Haguenau, particulièrement à P. Geldreich, qui nous a facilité le travail de terrain et nous a donné accès à sa base de données forestières. Nous sommes très reconnaissants envers les trois examinateurs qui ont accepté d'analyser le manuscrit et de faire des suggestions qui ont permis d'améliorer considérablement le texte original. Enfin, nous exprimons toute notre gratitude à M. Raffy pour l'intérêt qu'il a manifesté à ce travail.

Références

- [1] Landsberg J.J., Gower S.T., Applications of Physiological Ecology to Forest Management, Academic Press, San Diego, 1997.
- [2] Bréda N., L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel, Rev. For. Fr. 51 (1999) 135–150.
- [3] Lang A.R.G., Application of some of Cauchy's theorems to estimation of surface area of leaves, needles and branches of plants, and light transmittance, Agr. Forest. Meteorol. 55 (1991) 191–212.
- [4] Chen J.M., Black T.A., Defining leaf area index for non-flat leaves, Plant, Cell Environ. 15 (1992) 421–429.
- [5] Ehleringer J.T., Field C.B., Scaling Physiological Processes. Leaf to Globe, Academic Press, Londres, 1993.
- [6] Norman J.M., Campbell G.S., Canopy structure, in : Pearcy R.W., Ehleringer J.R., Mooney H.A., Rundel P.W. (Eds.), Plant Physiological Ecology: Field Methods and Instrumentation, Chapman and Hall, Londres, 1989, pp. 301–325.
- [7] Gower S.T., Kucharik C.J., Norman J.M., Direct and indirect estimation of leaf area index, f_{APAR} , and net primary production of terrestrial ecosystems, Remote Sens. Environ. 70 (1999) 29–51.
- [8] Andrieu B., Baret F., Indirect methods of estimating crop structure from optical measurements, in : Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Sinoquet H. (Eds.), Crop Structure and Light Microclimate: Characterization and Applications, Sciences Update, Inra Éditions, Paris, 1993, pp. 285–322.
- [9] Nilson T., Inversion of gap frequency data in forest stands, Agric. For. Meteorol. 98–99 (1999) 437–448.
- [10] Welles J.M., Norman J.M., Instrument for indirect measurement of canopy architecture, Agron. J. 83 (1991) 818–825.
- [11] Neumann H.H., Den Hartog G., Shaw R.H., Leaf area measurements based on hemispheric photographs and leaf-litter collection in deciduous forest during Autumn leaf fall, Agric. For. Meteorol. 45 (1989) 325–345.
- [12] Chason J., Baldocchi D., Huston M., A comparison of direct and indirect methods for estimating forest leaf area, Agric. For. Meteorol. 57 (1991) 107–128.
- [13] Chen J.M., Black T.A., Adam R.S., Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of forest stand, Agric. For. Meteorol. 56 (1991) 129–143.
- [14] Fassnacht K.S., Gower S.T., Norman J.M., McMurtrie R.E., A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests, Agric. For. Meteorol. 71 (1994) 183–207.
- [15] Dufréne E., Bréda N., Estimation of deciduous forest leaf area index using direct and indirect methods, Oecologia 104 (1995) 156–162.
- [16] Chen J.M., Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands, Agric. For. Meteorol. 80 (1996) 135–163.
- [17] Welles J.M., Cohen S., Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation, J. Exp. Bot. 47 (1996) 1135–1342.
- [18] Chen J.M., Rich P.M., Gower S.T., Norman J.M., Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements, J. Geophys. Res. 102 (1997) 29429–29443.
- [19] Peper P.J., McPherson G., Comparison of five methods for estimating leaf area index of open-grown deciduous trees, J. Arboriculture 24 (1998) 98–111.
- [20] Planchais I., Pontailler J.Y., Validity of leaf areas and angles estimated in a beech forest from analysis of gap frequencies, using hemispherical photographs and plant canopy analyser, Ann. For. Sci. 56 (1999) 1–10.
- [21] Soudani K., Étude de la structure et de la dynamique spatiale et temporelle des canopées forestières : approche par méthodes optiques indirectes et par télédétection thèse de doctorat, université Louis-Pasteur, Strasbourg, 1999.
- [22] Frazer G.W., Trofymov J.A., Lertzman K.P., Canopy openness and leaf area in chronosequences of coastal temperate rainforests, Can. J. For. Res. 30 (2000) 239–256.
- [23] Chen J.M., Cihlar J., Plant canopy gap-size analysis theory for improving optical measurements of leaf-area index, Appl. Optics 34 (1995) 6211–6222.
- [24] Gardingen P.R. van, Jackson G.E., Hernandez-Daumas S., Russel G., Sharp L., Leaf Area Index estimates obtained for clumped canopies using hemispherical photography, Agric. For. Meteorol. 94 (1999) 243–257.
- [25] Kucharik C.J., Norman J.M., Gower S.T., Characterization of radiation regimes in nonrandom forest canopies: theory, measurements, and a simplified modeling approach, Tree Physiol. 19 (1999) 695–706.
- [26] Barclay H.J., Trofymov J.A., Leach R.I., Assessing bias from bores in calculating leaf area index in mature Douglas fir with the LI-COR canopy analyzer, Agric. For. Meteorol. 100 (2000) 255–260.
- [27] Gregoire T.G., Valentine H.T., Sampling methods to estimate stem length and surface area of tropical tree species, For. Ecol. Manage. 83 (1996) 229–235.
- [28] Lang A.R.G., McMurtrie R.E., Benson M.L., Validity of leaf area indices of *Pinus radiata* forests estimates from transmittances of the sun's beam, Agric. For. Meteorol. 57 (1991) 157–170.
- [29] Baret F., Andrieu B., Folmer J.C., Hanocq J.F., Claude S., Gap fraction measurement from hemispherical infrared photography and its use to evaluate PAR interception efficiency, INRA Bioclimatologie, B.P. 918413 Montfavet Cedex, France, 1991.
- [30] Sokal R.R., Rohlf F.J., Biometry, 3rd Ed., Freeman, 1995, New York. (BIOMstat for Windows®, Statistical Analysis for Biologists, Version 3.3, Exeter Software, Setauket, New York (<http://www.ExeterSoftware.com/>)).
- [31] Black T.A., Chen J.M., Lee X., Sagar R.M., Characteristics of shortwave and longwave irradiances under a Douglas-fir forest stand, Can. J. For. Res. 21 (1991) 1020–1028.
- [32] Lang A.R.G., Simplified estimate of leaf area index from transmittance of the sun's beam, Agric. For. Meteorol. 41 (1987) 179–186.
- [33] Lang A.R.G., Xiang Y., Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies, Agric. For. Meteorol. 37 (1986) 229–243.
- [34] Miller J.B., A formula for average foliage density, Aust. J. Bot. 15 (1967) 141–144.
- [35] Walter J.M.N., CIMES. A package of Programs for the Assessment of Canopy Geometry by Hemispherical Photographs. Université Louis-Pasteur-Strasbourg-I, 1999.
- [36] Fournier R.A., Rich P.M., Landry R., Hierarchical characterization of canopy architecture for boreal forest, J. Geophys. Res. 102 (1997) 445–454.
- [37] Rich P.M., Characterizing Plant Canopies with Hemispherical Photographs, Remote Sens. Rev. 5 (1990) 13–29 (HEMVIEW®2.1 software: <http://www.delta-t.co.uk/index.html>).
- [38] Walter J.M.N., Torquebiau E.F., The computation of forest leaf area index on slope using fish-eye sensors, C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la vie 323 (2000) 801–813.
- [39] Trichon V., Walter J.M.N., Laumonier Y., Identifying spatial patterns in the tropical rain forest structure using hemispherical photographs, Plant Ecology 137 (1998) 227–244.
- [40] Walter J.M.N., Interpreting canopy architecture of deciduous and evergreen forests using hemispherical photographs, in : Marceau D. (Ed.), Scaling and Modelling in Forestry: Application in Remote Sensing and GIS, International Workshop Montréal, 19–21 Mars 1998, publieur à venir, Montreal, 1998, pp. 103–107.
- [41] Planchais I., Sinoquet H., Foliage determinants of light interception in sunny and shaded branches of *Fagus sylvatica* (L.), Agric. For. Meteorol. 89 (1998) 241–253.
- [42] Frazer G.W., Canham C.D., Lertzman K.P., Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation. Copyright © 1999: Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York (<http://www.ecostudies.org/>, or <http://www.rem.sfu.ca/forestry/index.htm>).
- [43] ter Steege H., WINPHOT 5.0. A programme to analyze vegetation indices, light and light quality from hemispherical photographs (Manual), Tropenbos-Guyana Reports 97–3, Tropenbos-Guyana Programme and Utrecht University, The Netherlands, 1997 ([http://www.tropenbos.nl/tropenbos-home.html](http://www.tropenbos.nl/tropenbos/tropenbos-home.html)).
- [44] Krebs C.J., Ecological Methodology, 2nd ed., Addison-Welsey Educational Publishers, Menlo Park, 1999.