

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

Alexandre Piboule

▶ **To cite this version:**

Alexandre Piboule. 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. Sciences du Vivant [q-bio]. 2001. hal-02828323

HAL Id: hal-02828323
https://hal.inrae.fr/hal-02828323

Submitted on 7 Jun 2020

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.

Université Henri Poincaré,
Faculté de sciences.

Ecole Nationale du Génie Rural,
des Eaux et des Forêts.

D.E.A. de BIOLOGIE FORESTIERE

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.

Alexandre Piboule

Laboratoire d'accueil : Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois (LERFOB), U.M.R. E.N.G.R.E.F.-I.N.R.A., 1092.

Maître de stage : Henri Frochot, Equipe Croissance et Production.

Rapporteurs :

- Erwin Dreyer
- Jean-Christophe Hervé

Août 2001

RESUME

Cette étude vise à évaluer un modèle de cartographie de la lumière sous couvert forestier feuillu. Une analyse des modèles existants nous a permis d'en choisir un qui soit adapté à une cartographie fine à l'échelle du peuplement : tRayci. Nous l'avons testé sur deux peuplements équiennes monospécifiques : l'un de Hêtres, l'autre de Bouleaux. Pour chaque peuplement, des mesures dendrométriques ont alimenté la maquette utilisée par le modèle pour simuler l'éclairement relatif. Cet éclairement, intégré sur la période de végétation, a été calculé pour un certain nombre de points. Sur ces mêmes points des photographies hémisphériques ont permis d'établir une comparaison avec le modèle. Celle-ci montre une bonne concordance malgré une dispersion des photographies hémisphériques autour du modèle, que nous expliquons en partie par une imprécision inhérente à l'analyse des photographies. Il en ressort la nécessité de comparer le modèle à des mesures directes afin de mieux le calibrer. Nous avons de plus réalisé une analyse de sensibilité sur les paramètres d'entrée du modèle, dans le but de simplifier la description des peuplements. Les 64 simulations réalisées ont permis de tirer un certain nombre de conclusions. Ainsi nous avons mis en évidence le problème posé par la simplification de la description de l'extension des houppiers, l'importance cruciale de la gestion des effets de bords et la possibilité de tolérer une certaine imprécision sur la mesure des paramètres dendrométriques. Il est désormais nécessaire de calibrer le modèle par des mesures directes. Une application intéressante consisterait ensuite à l'utiliser pour étudier la dynamique de régénération en fonction de la répartition spatiale de la lumière.

Mots clef : Lumière / Modèle / Photographies Hémisphériques / *Fagus sylvatica* L. / *Betula pendula* L.

ABSTRACT : Validation and sensibility analysis of a light model, for light cartography in forest stands.

This study aims to evaluate a model of cartography of light under broadleaved forest cover. An assessment of existing models allowed us to choose one which was adapted to a detailed cartography of light at the stand scale : tRayci. We have tested it on two even-aged monospecific stands : one of beech and one of birch. For each stand, tree measurements have supply the stand representation used by the model to simulate the percentage of the above canopy light (PACL). This PACL, integrated on the vegetation growth period was calculated for a set of points. On these points, hemispherical photography allowed comparison with the model. This comparison shows a good agreement in spite of a dispersion of hemispherical photography around the model. We explain this by an inaccuracy in photography analysis. It emerges from this the necessity of comparing the model with direct measurement, in order to best calibrate the model. In addition we have completed a sensibility analysis of input parameters of the model, to simplify the stand description. The 64 simulations made lead to some conclusions. We have highlight the problem of crown extension description, the crucial importance of side-effects management and the possibility to tolerate some inaccuracy on measurement of the tree parameters. In the future it will be necessary to calibrate the model with direct light measurements. After this calibration an interesting application will be to use the model to study the regeneration dynamic according to light repartition.

Keywords : Light / Model / Hemispherical Photography / *Fagus sylvatica* L. / *Betula pendula* L.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier :

- Jean-François Dhôte et Henri Frochot qui m'ont suivi tout au long de ce stage ;
- Andreas Brunner qui m'a permis d'utiliser son modèle et a répondu à mes question concernant celui-ci ;
- Michel Pitsch, pour avoir réalisé l'analyse des photographies hémisphériques et Daniel Rittie, sans qui je n'aurais jamais pu faire les mesures de houppier à temps ;
- Catherine Collet, Francis Colin, Kamel Soudani, Nathalie Breda, Jean-Claude Pierrat, Jean-Christophe Hervé pour leur aide précieuse et leurs conseils avisés ;
- Claude Varlet-Grancher, Isabelle Planchais, Hervé Sinoquet, Philippe Balandier, Benoît Courbaud et Erwin Dreyer qui m'ont aidé à cerner et définir le sujet ;
- Michel Ravart qui m'a aidé pour la localisation des arbres ;
- La division de la Forêt de Haye et celle de Lunéville-Bayon de l'Office National des Forêts ainsi que Monsieur Mercier, Maire de la commune de Méhoncourt, qui nous ont autorisé à réaliser des mesures dans les deux peuplements étudiés ;
- Toutes les personnes qui m'ont aidé lors de ma prospection des peuplements.

1. INTRODUCTION

La lumière est un facteur clef de la dynamique végétale, du fait qu'elle est la source d'énergie de la photosynthèse et qu'elle intervient dans la morphogenèse. On peut l'aborder à différentes échelles en fonction des objectifs, depuis la captation des photons par les pigments photosynthétiques, jusqu'au rayonnement global reçu par un peuplement forestier au cours de l'année. Nous l'aborderons par la répartition de l'éclairement, intégré sur la période de végétation, au sein d'un peuplement forestier. Les applications de ce niveau d'analyse sont nombreuses. Ayant réalisé une carte d'éclairement au niveau du sol, on peut, par exemple, l'utiliser pour comprendre la dynamique de la régénération d'une parcelle. On peut également envisager une cartographie de l'éclairement à hauteur du houppier des arbres afin d'en étudier la dynamique de croissance. De façon plus générale, ce type de cartographie peut être utilisé pour comprendre tout phénomène spatial dépendant de la façon dont est distribuée la lumière en forêt.

Il y a plusieurs façons d'obtenir ce type de cartographie. La première méthode consiste à mesurer le rayonnement intercepté par des surfaces photosensibles élémentaires, sur la zone et la période d'étude. C'est la méthode des mesures directes. La deuxième possibilité consiste à utiliser des méthodes indirectes d'estimation de l'éclairement en un point. Celles-ci utilisent une mesure du couvert végétal faisant obstacle au passage de la lumière et une simulation de la transmission du rayonnement solaire à travers cet obstacle. L'une de ces méthodes est celle des photographies hémisphériques. Dans ce cas on mesure en un point la projection du couvert végétal sur l'hémisphère céleste grâce à un film photographique. Cette projection est ensuite utilisée pour simuler l'extinction des rayons solaires. Une autre méthode indirecte est celle des modèles de transfert radiatif au sein d'un peuplement. Cela consiste à réaliser un maquette informatique en trois dimensions de l'obstacle végétal, à partir de mesures géométriques du couvert, et à simuler le transfert des rayons solaires au sein de cette maquette. Ces modèles de transfert radiatif permettent en particulier, à partir d'une seule description du couvert, d'obtenir une cartographie sur toute la surface considérée. Il est particulièrement efficace d'opter pour cette approche lorsqu'on souhaite obtenir une résolution élevée pour la cartographie de l'éclairement.

L'étude présentée ici a consisté à choisir et à évaluer un modèle de transfert radiatif sur des peuplements feuillus. Nous avons opté pour le modèle tRayci, mis au point par *Brunner (1998)* sur des forêts de Douglas en Colombie Britannique (Canada), et l'avons appliqué à deux peuplements : une placette d'environ ¼ d'hectare de futaie pure de Bouleau (*Betula pendula* L.), et une d'environ un hectare de futaie pure de Hêtre (*Fagus sylvatica* L.).

Nos objectifs étaient les suivants :

- valider le modèle sur les deux peuplements feuillus choisis,
- analyser la sensibilité du modèle afin :
  - de pouvoir optimiser la récolte de données par simplification de la mesure de certains paramètres difficilement accessibles ou longs à acquérir, en fonction des conséquences de ces simplifications sur la simulation ;
  - de voir s'il est possible d'accélérer le temps de calcul en jouant sur la résolution du modèle, sans trop perdre en qualité de simulation.

Nous avons choisi d'effectuer la validation du modèle en référence à la méthode des photographies hémisphériques. Nous avons ainsi pu évaluer la qualité propre de la représentation du couvert par le modèle, en nous affranchissant des hypothèses sur l'éclairement en tant que tel, communes aux deux méthodes. De plus, étant donné la durée du

D.E.A. et les contraintes techniques, il n'était pas envisageable de réaliser des mesures directes sur toute la période de végétation. Nous réservons donc ce second volet absolument indispensable de la validation à une étude ultérieure.

2. APPROCHE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1. La lumière

Les informations essentielles concernant cette partie sont issues de *Varlet-Grancher et al. (1989)*, *Guyot (1997)*, *Schmerber (1997)* et *Pearcy et al. (1989)*.

La lumière est constituée d'ondes électromagnétiques, associées à des particules élémentaires, les photons. Sa nature ondulatoire permet de la décrire par des longueurs d'onde (correspondant à des couleurs dans le spectre visible). Sa nature particulaire permet de décrire sa transmission au sein d'un milieu par des lois géométriques.

La part du rayonnement solaire qui parvient directement en un point sans avoir subi ni réflexion, ni réfraction, est nommée éclairement direct. Le rayonnement issu de l'interaction entre particules de l'atmosphère et rayonnement solaire, diffusé par toutes les directions de l'hémisphère céleste, est appelée éclairement diffus. On nomme « rediffusions » l'ensemble des rayonnements directs ou diffus qui, avant de parvenir à un point, ont été réfléchis, réfractés ou transmis par un obstacle solide ou liquide (en particulier les éléments végétaux et le sol).

Le rayonnement global est divisé, en fonction de la longueur d'onde, en domaines ultra-violet, visible et infrarouge. La fraction du visible comprise entre 400 et 700 nm *(McCree, 1972 et 1973)* est appelée P.A.R. (Photosynthetically Active Radiation) : c'est la plage du spectre solaire qui intervient dans les processus photochimiques de la photosynthèse. On considère le rayonnement global dans son ensemble lorsqu'on s'intéresse à des phénomènes qui dépendent des échanges énergétiques, tels que la transpiration.

On peut définir le rayonnement selon deux approches : soit en quantité d'énergie, soit en densité de flux de photons (P.F.D., photon flux density). La densité de flux de photon dans le domaine du P.A.R. est notée P.P.F.D. (PAR photon flux density). C'est la grandeur utilisée lorsqu'on s'intéresse à la photosynthèse, car cette dernière implique des phénomènes quantiques, mieux reliés à des quantités de photons qu'à une quantité d'énergie totale. Les capteurs thermoélectriques permettent de mesurer l'énergie lumineuse reçue par une surface, quelque soient les longueurs d'ondes considérées. Les capteurs photoélectriques, permettent de mesurer une densité de flux de photons. Ces capteurs, en fonction de leur revêtement, sont sensibles à des plages de longueur d'onde différentes. Parmi eux, les capteurs GaAsP (Gallium Arsenide Phosphide) sont souvent utilisés car leur réponse spectrale correspond au P.A.R..

Lorsqu'on veut simuler le transfert du rayonnement, il faut avoir accès à sa répartition parmi les différentes directions de l'hémisphère céleste. Pour obtenir l'éclairement direct, on calcule la course du soleil pendant la période d'étude. On répartit ensuite le rayonnement direct total entre un certain nombre de directions discrètes échantillonnant cette course. Pour le rayonnement diffus, on discrétise l'hémisphère céleste en un certain nombre de secteurs d'angles solides (résolution angulaire), entre lesquels on répartit le rayonnement diffus total. Cette répartition se fait selon un modèle qui définit une proportion plus ou moins grande du rayonnement total pour une même surface sur l'hémisphère, selon qu'elle est située au zénith ou à l'horizon. Ainsi on définit les modèles U.O.C. (Uniform Overcast Sky condition) et

S.O.C. (Standard Overcast Sky condition). Ces modèles sont décris plus précisément dans *Brunner (1998)* et *Mitchell et Whitmore (1993)*.

Dans ce type de simulation, il faut également affecter des parts relatives du rayonnement global au direct et au diffus. L'approche la plus simple utilise une proportion de rayonnement diffus exprimée en pourcentage.

2.2. Relation entre lumière et couvert végétal

Un couvert forestier (ou plus généralement végétal) est constitué d'une multitude d'éléments foliaires et ligneux ayant une certaine surface et une certaine répartition dans l'espace. Les rayonnements sont absorbés, réfléchis, réfractés ou transmis par ces éléments. La part absorbée constitue l'extinction du rayonnement. Les parts réfléchies, réfractées et transmises constituent les rediffusions.

Il existe différentes approches pour décrire ce couvert. On utilise en particulier deux indices (détaillés dans *Sinoquet et Andrieu, 1993,* et *Jacquet et Maite, 2000*). Le L.A.I. (Leaf Area Index) représente la surface foliaire totale en m^2 par unité de surface du sol (en m^2). Le L.A.D. (Leaf Area Density) représente la surface foliaire totale en m^2 par m^3 d'espace contenant les feuilles. On peut définir de façon similaire le W.A.I. (Wood Area Index) et le W.A.D. pour les éléments ligneux ainsi que le P.A.I. (Plant Area Index) et le P.A.D. prenant en compte à la fois les éléments foliaires et ligneux.

Dans le cas des photographies hémisphériques, on réalise une projection optique des éléments végétaux sur la voûte céleste pour un point donné. Les modèles de transfert radiatif représentent le couvert sous forme d'une maquette informatique en trois dimensions, à partir de mesures géométriques plus ou moins détaillées de ce couvert.

Dans les deux cas, pour un point donné, on peut se ramener à une projection des éléments végétaux sur l'hémisphère céleste. A partir de là, on peut définir la notion de fraction de trouée P0 (détaillée dans *Sinoquet et al., 1993,* et *Sinoquet, 1993*). P0 dans une direction définie par un azimut et un angle zénithal, est égale à la probabilité pour un rayon provenant de cette direction de ne pas être intercepté par les éléments végétaux. Sur une petite surface normale à la direction du rayon considéré, P0 est égale à la fraction de l'hémisphère céleste projetée sur cette surface, qui n'est pas cachée par des éléments foliaires ou ligneux. A partir du moment où l'on dispose d'une projection des éléments végétaux sur l'hémisphère céleste en un point et de la répartition du rayonnement solaire total entre les différentes directions de l'hémisphère, on peut calculer l'extinction du rayonnement depuis toutes ces directions. Il faut noter que dans cette théorie les rediffusions sont négligées puisqu'on ne considère que les trajets en ligne droite depuis l'hémisphère céleste jusqu'au point étudié.

Les photographies hémisphériques et un grand nombre de modèles de transfert radiatif ont en commun cette approche de l'extinction du rayonnement par la théorie de la fraction de trouée. Mais les modèles réalisent en plus la projection des éléments végétaux qu'ils représentent. Ceux-ci sont en général distribués de façon statistique. Une loi d'extinction de Bouguer (également nommée loi de Beer-Lambert) permet d'obtenir la projection de la distribution dans une direction donnée : $P0(\alpha,\theta) = e^{-G(\alpha,\theta).LAD.L}$ (*Sinoquet et al., 1995*). α est l'azimut de la direction et θ son angle zénithal. LAD (Leaf Area Density) représente la surface foliaire en m^2 par m^3. L est la longueur de trajet parcourue au sein du couvert. G caractérise la distribution statistique des éléments végétaux. Celle-ci prend en compte le degré d'agrégation des éléments foliaires, la distribution de leur azimut et celle de leur inclinaison zénithale. Notons que certains modèles gèrent les rediffusions à l'aide de la notion de fonction de phase (décrite dans *Sinoquet et al., 1993,* et *Sinoquet, 1993*).

2.3. Les modèles de transfert radiatif

Généralités

Les modèles de transfert radiatif utilisent une représentation du couvert en trois dimensions pour simuler le transfert du rayonnement solaire à travers ce couvert. On peut les différencier selon deux aspects distincts :

- la méthode de représentation du couvert,
- l'algorithme de simulation du transfert radiatif.

La modélisation du couvert

On peut classer les modèles en trois grandes familles.

- Les modèles surfaciques (**Fig. 1**) représentent chaque élément foliaire ou ligneux par une ou plusieurs surfaces élémentaires. Ils nécessitent en entrée une description géométrique de chaque élément de surface, qui peut être soit digitalisé, soit reconstitué par des simulations de développement morphologique. On peut citer comme exemples les modèles développés par *Dauzat (1994)* grâce au logiciel AMAP, *Chen et al. (1994)* ou *Boquera et al. (1997)*.

- Les modèles volumiques représentent les parties végétales sous la forme d'une distribution statistique de petites surfaces dans des volumes élémentaires. Cette distribution peut être plus ou moins réaliste en prenant ou non en compte l'agrégation du feuillage, la distribution de l'azimut des feuilles et celle de leur inclinaison zénithale. On peut distinguer deux sous-catégories selon le type de volume élémentaire considéré :
  - Les modèles discrets (**Fig. 2**) divisent tout l'espace étudié en cellules élémentaires. La complexité des modèles dépend du type de cellule élémentaire. *Sinoquet et al. (1990)* considèrent des niveaux horizontaux d'une certaine épaisseur et d'étendue horizontale infinie dans le cas de canopées homogènes. *Sinoquet et Bonhomme (1992)* utilisent des tubes à section carré de longueur infinie dans le cas de cultures en rangs. *Planchais et Pontailler (1997)* divisent l'espace en cubes élémentaires. En entrée, ces modèles nécessitent une description du contenu de chaque cellule, qui est obtenue soit par une description cellule par cellule du peuplement existant, soit par une reconstitution théorique de celui-ci.
  - Les modèles géométriques (**Fig. 3**) représentent les végétaux par des formes simples. Ainsi les houppiers des arbres ont été modélisés par des cylindres *(Canham et al., 1999)*, des cônes ou des ellipsoïdes *(Bartelink, 1995, Wang et Jarvis, 1990b)*, des disques superposés *(Ter-Mikaelian et al., 1997)*, des ensembles d'ellipsoïdes représentant des amas de feuilles *(West et Wells, 1992)*, etc. Une revue assez complète de ces modèles est présentés par *Brunner (1998)*. En entrée, ces modèles nécessitent un certain nombre de mesures géométriques plus ou moins détaillées sur chaque arbre.

La simulation du transfert radiatif

On peut également classer les modèles en fonction de l'algorithme de simulation du transfert radiatif (différentes approches revues par *Aries et al., 1993*).

- L'algorithme du lancer de rayon stochastique (tirage aléatoire des rayons parmi une distribution) au sens strict (méthode de Monte Carlo) consiste à lancer un très grand nombre de photons depuis l'hémisphère céleste et à suivre le trajet de chacun, en simulant les rediffusions au sein du couvert, jusqu'à ce qu'il soit absorbé. On obtient en sortie un bilan radiatif pour chaque surface élémentaire. C'est donc une information à l'échelle de la feuille, voire d'une partie de feuille. Cet algorithme n'est applicable que dans le cas des modèles

surfaciques. Il sert en général de référence, comme dans *Dauzat (1994)*, *Chelle et Andrieu (1997)* ou *Boquera et al. (1997)*.

- La méthode analytique des radiosités consiste à établir un système linéaire d'équations représentant les flux radiatifs entre les surfaces élémentaires représentant les éléments foliaires et ligneux, prises deux à deux, en fonction des surfaces élémentaires absorbantes situées sur le trajet les séparants. Elle fournit également une information à l'échelle de la surface élémentaire sous forme d'un bilan radiatif. Elle est applicable strictement aux modèles surfaciques mais a été étendue au modèles discrets (radiosités volumiques) en considérant des volumes et non des surfaces. Il faut noter que la version volumique fait appel à la notion de trouée pour évaluer l'extinction sur le trajet séparant deux volumes. La version surfacique a été utilisée par exemple dans *Dauzat (1994)*, et la version volumique dans *Sinoquet (1989)*.

- Les algorithmes se basant sur la théorie des fractions de trouées *(Sinoquet et al., 1993, Sinoquet, 1993)* a été expliquée dans la partie **2.2.**. En sortie elle fournit l'éclairement en un point. Elle est applicable dans tous les cas, mais est surtout utilisée pour les modèles volumiques. Cet algorithme est par exemple utilisé dans les modèles discrets de *Sinoquet et Bonhomme (1992)* et de *Sinoquet et al. (1990)* ainsi que dans les modèles géométriques de *West et Wells (1992)*, *Stadt et Lieffers (2000)* et *Brunner (1998)*.

3. MATERIEL ET METHODES

3.1. Le modèle

Choix du modèle

Nous avons éliminé les modèles surfaciques étant donné la quantité de données nécessaires en entrée, les rendant inapplicables à l'échelle d'une parcelle forestière. Nous avons exclu les modèles discrets autres que ceux utilisant des cellules cubiques parce qu'il ne sont adaptés qu'à des peuplements présentant une certaine régularité spatiale. Nous avons également exclu les modèles discrets et géométriques nécessitant un nombre de paramètres par arbre trop élevé pour être opérationnels sur de grandes surfaces. Le modèle choisi nous a semblé être le meilleur compromis entre réalisme de la représentation des arbres et difficulté d'acquisition des données. De plus il présente les avantages de gérer les troncs, d'être économe en espace mémoire et en temps de calcul et d'être opérationnel.

Le modèle choisi, tRayci (dont la **table 1** donne une liste des paramètres), a été mis au point et implémenté par *Brunner (1998)*. C'est un modèle volumique. Il utilise une maquette informatique en trois dimensions du peuplement étudié, où chaque arbre est localisé et représenté par un modèle de houppier et un modèle de tronc. L'algorithme de simulation du transfert radiatif est celui des fractions de trouées. La sortie est, pour un point, l'éclairement relatif (proportion du P.P.D.F. mesuré au dessus de tout obstacle) direct, diffus et total sur la période de calcul, définie par l'utilisateur (la durée minimale possible de simulation est d'un jour). La résolution spatiale est très flexible, dans la mesure où l'éclairement relatif peut être calculé pour tout point de la maquette. On peut également réaliser des cartes, des profils ou des échantillonnages de points représentatifs du houppier d'un arbre.

Représentation des arbres

Le modèle de représentation des houppier reprend l'approche de *Koop (1989)*. La **figure 4** en montre un exemple. Un arbre est défini par rapport à l'axe vertical passant par le centre de son tronc. Sur cet axe sont placés les points correspondants à la hauteur totale de l'arbre, à la

hauteur de base du houppier et à la hauteur de plus grande largeur du houppier. Dans le plan horizontal perpendiculaire à l'axe, passant par ce dernier point, on place les 4 à 8 points correspondant aux largeurs de houppier maximales dans 4 à 8 directions choisies. Chacun de ces points est relié par un arc d'une part au point sommet et d'autre part au point de base de houppier. Les arcs sont définis par deux coefficients de forme, un pour la partie supérieure du houppier (arcs reliés au sommet) et un pour sa partie inférieure (arcs reliés à la base du houppier). Ces coefficients de forme permettent une grande variété de courbures (**Fig. 5**). Cette méthode permet une grande souplesse de représentation des houppiers avec un nombre raisonnable de paramètres.

La répartition de la surface foliaire au sein des houppiers est décrite par un unique paramètre synthétique : le LAD (Leaf Area Density, densité de surface foliaire). Ce paramètre représente en fait ici le P.A.D. (les feuilles plus les tiges contenues dans un m^3 de houppier, cf. paragraphe **2.2.**). Cette surface est supposée répartie de façon aléatoire (non agrégée) dans ce volume (modèle de Poisson), composée d'éléments de petite taille par rapport au volume du houppier, selon une distribution sphérique (aléatoire) de l'inclinaison et de l'azimut de ces éléments, ce qui se traduit par $G(\alpha,\theta) = 0{,}5$ pour tout couple (α,θ). Ce choix, assez fréquent dans ce type de modèles, permet de simplifier les calculs d'interception lumineuse et de résumer l'information foliaire en un seul paramètre.

Chaque tronc est représenté par un cylindre partant du sol, s'arrêtant au point de base du houppier, et défini par le diamètre mesuré à 1,30 m.

Une des particularités du modèle est de convertir cette représentation par formes géométriques en une représentation discrète afin d'effectuer les calculs (**Fig. 6**). Ainsi l'utilisateur choisit une taille de cellule de section carrée élémentaire. On obtient ainsi une grille horizontale. Pour chaque colonne de base carrée, l'intersection avec les volumes géométriques est calculée. On obtient ainsi un ensemble de volumes parallélépipédiques définis par leur position sur la grille horizontale, la hauteur de leur face inférieure, la hauteur de leur face supérieure et la référence du volume géométrique représenté (numéro de l'arbre auquel appartient cette cellule de houppier). Les troncs ne sont pas convertis de la sorte et restent sous la forme de cylindres, afin d'éviter les sous- ou sur- estimations grossières qui résulteraient d'une taille élémentaire de cellules supérieures aux diamètres à 1,30 m. Cette représentation discrète permet d'accélérer grandement les calculs et d'optimiser l'espace de stockage par rapport à un modèle discret classique, puisque seul l'espace occupé est représenté.

Simulation de la transmission du rayonnement

La division de l'hémisphère céleste peut être faite à des résolutions angulaires de 1, 3, 5, 9 ou 15 degrés azimutaux et zénithaux, ce qui correspond respectivement à un échantillon de 32 400, 3 600, 1 296, 400 et 144 rayons. Un coefficient permet de choisir la distribution du rayonnement diffus par secteur (par exemple U.O.C. ou S.O.C., définis en partie **2.1.**). Pour la part directe, la position du soleil est calculée toutes les minutes et la quantité de photons émise depuis cette position est affectée au secteur d'angle solide le plus proche. Un paramètre d'entrée permet de répartir le rayonnement total entre le diffus et le direct. Les troncs bloquent totalement le passage de la lumière.

Il faut en outre noter que le modèle néglige les rediffusions : les éléments foliaires sont considérés comme totalement absorbants.

3.2. Stratégie d'échantillonnage

Choix des sites

En fonction de l'objectif de validation et d'évaluation de la sensibilité du modèle, de la durée du D.E.A. et des contraintes techniques du laboratoire d'accueil, nous avons défini les conditions de choix suivantes :

- il fallait, maximiser la variabilité probable des conditions de lumière ;
- afin de pouvoir évaluer l'influence du paramètre LAD, il fallait travailler sur au moins deux essences présentant *a priori* des répartitions de la surface foliaire très différentes ;
- pour limiter l'influence des peuplement adjacents non mesurés, nous devions chercher à avoir des surfaces contiguës relativement grandes et « carrées », ce qui, étant donné la contrainte précédente, imposait une limite sur le nombre de peuplements différents ;
- pour pouvoir avoir accès au LAD nous devions limiter au maximum le mélange intime des essences, étant donné qu'il n'existe pas encore de méthode pour mesurer ce paramètre sur un arbre en peuplement ;
- la mesure de 8 projections de houppier par arbre en présence de sous-étage paraissant peu réaliste, il semblait nécessaire de travailler sans sous-étage.

A partir de ces contraintes, nous avons choisi les deux placettes suivantes :

- un peuplement régulier et pur de Hêtre d'une surface de 100 m * 105 m, d'environ 145 ans, de diamètre moyen 40 cm et de hauteur moyenne 40 m. Il est situé en parcelle 461 de la Forêt Domaniale de Haye, à l'Est de Nancy (54). Il n'y a pas de sous-étage. La placette inclut dans son coin Nord-Ouest une placette permanente de l'I.N.R.A., où il n'y a jamais eu aucune éclaircie (témoin). Le reste est constitué d'un peuplement ayant subi des éclaircies classiques. Ce peuplement a été touché en partie par la tempête de décembre 1999, ce qui a créé des trouées de tailles différentes, dont une est comprise en partie dans la placette permanente ;
- un peuplement régulier et pur de Bouleau de 55 m * 65 m, d'environ 40 ans, de diamètre moyen 15 cm et de hauteur moyenne 16 m. Il est situé en parcelle 1 de la Forêt Communale de Méhoncourt (54), au Sud-Ouest de Lunéville. Le sous-étage impénétrable de Prunellier et d'Aubépine présent sur environ ¼ de la surface a été supprimé. Le peuplement présente quelques petites trouées, mais est beaucoup plus homogène que celui de Hêtre.

Ces deux placettes sont complémentaires pour l'évaluation du modèle. Il ne s'agit nullement de comparer entre elles ces deux situations, très différentes sur de nombreux critères.

Choix des points de validation

Comme nous l'avons vu, le modèle sera validé par rapport à des photographies hémisphériques. Or celles-ci nécessitent un temps de prise de vue et de traitement non négligeable. Nous avons par conséquent estimé le nombre maximal de photographies qu'il était envisageable de réaliser. Ce nombre était de 100 à 120 photographies au total.

De plus nous voulions évaluer le modèle sur la plus grande gamme d'éclairement possible, en essayant d'échantillonner tout le gradient séparant les extrêmes, afin de pouvoir mettre en évidence un éventuel biais du modèle dépendant de la valeur prédite.

Etant donné le nombre de photographies réalisables, un maillage systématique aurait été trop lâche pour garantir d'échantillonner une gamme suffisante de situations. Nous avons

préféré réaliser des transects qui relient les points maximisant l'éclairement relatif (points clairs) à ceux le minimisant (points sombres), en plaçant sur chaque transect un point tous les mètres afin d'être sûr de bien décrire les gradients (la méthode de choix des points sombres et clairs est expliquée dans le paragraphe suivant). De plus les transects ont été prolongés de cinq mètres à chaque extrémité, dans le but d'augmenter les chances d'obtenir les extrêmes et de pouvoir visualiser les éventuels effets de plateau. Ces transects ont été placés dans des zones centrales des placettes (voir **3.4.**, gestion des effets de bords). Ces zones représentent environ ¼ de la surface de chacune des placettes, soit 50 m * 50 m dans les Hêtres et 25 m * 25 m dans les Bouleaux. Nous avons réalisé deux transects dans chaque peuplement afin d'avoir une répétition pour chacun (voir **figs. 7 et 8**).

Sur la zone centrale choisie, nous avons placé une grille de maille 1 m. Pour chacun des points de cette grille, nous avons déterminé la distance à chacun des arbres de l'ensemble de la placette (et pas seulement la zone centrale). C'est à partir de ces données que nous avons choisi les points sombres et les points clairs.

Pour déterminer les points sombres, nous avons calculé pour chaque point de la grille la distance moyenne aux n arbres les plus proches (n allant de 3 à 10). Nous avons choisi les points pour lesquels ces distances étaient à la fois minimales et stables quand n augmentait (points sortant toujours dans les premiers lors du tri). Pour le peuplement de Hêtres, nous avons choisi le premier point sortant au sein de la partie non éclaircie de la placette, et le premier sortant au sein de la partie éclaircie. En effet les conditions de densité étant très différentes entre les deux parties, on pouvait supposer que le critère choisi n'avait pas la même signification en terme de lumière dans les deux cas.

Pour déterminer les points clairs, nous avons, pour chacun des points de la grille, déterminé la distance à l'arbre le plus proche. Nous avons choisi les points maximisant cette distance.

Nous avons ensuite relié un point sombre à un point clair afin d'obtenir deux transects distincts et ne se croisant pas. Nous avons ainsi obtenu un total de 72 points dans les Hêtres et 45 points dans les Bouleaux, soit un total de 117 points, ce qui ne sort pas de la fourchette que l'on s'était fixée.

3.3. Mesures

Mesures dendrométriques

Pour chacun des deux peuplements, nous avons effectué les mesures suivantes :

- localisation de tous les arbres par le centre de leur tronc à l'aide d'un théodolite et d'un télémètre à ultra-sons par rapport à des piquets de référence placés préalablement ;
- mesure au vertex pour chaque arbre de sa hauteur totale, de sa hauteur de base de houppier (définie comme la hauteur où les premières feuilles apparaissent, hors gourmands et branches basses isolées) et de sa hauteur de largeur maximale de houppier ; mesure du diamètre à 1,30 m (au mètre ruban) ;
- mesure pour chaque arbre de 8 projections de houppier par rapport au centre du tronc, dans les directions suivantes : N, NE, E, SE, S, SO, O, NO. Ces mesures ont été réalisées à l'aide d'une boussole, d'un télémètre à ultra-sons et d'un miroir des cimes (appareil permettant de se placer à la verticale du bord d'un houppier).

Photographies hémisphériques

Les photographies hémisphériques ont été prises sur les points des transects définis précédemment, à 1 m du sol, par temps couvert, homogène et sans vent, à l'aide d'un objectif Fisheye Nikkor 8 mm F2.8. L'appareil était positionné au dessus du point, mis à l'horizontal et orienté vers le nord magnétique. Trois photographies d'expositions différentes étaient prises par points afin de pouvoir choisir la meilleure pour l'analyse. Les photographies ont été seuillées sous le logiciel Photoshop 6.0. Cette opération consiste à passer d'une image en niveaux de gris à une image en deux couleurs où le noir représente la végétation, et le blanc le ciel. Cette étape est critique car elle influe assez fortement sur le résultat et présente des difficultés pratiques. Ainsi, même avec un ciel homogène, les différences de luminosité, l'exposition choisie et la transparence des feuilles créent des hétérogénéités de contraste. Un seuillage global de la photographie conduit donc à des erreurs grossières : effet de sous-seuillage dans certaines zones (une partie des feuilles se transforme en ciel) et effet de sur-seuillage dans d'autres (des zones de ciel sont assimilées aux feuilles adjacentes). La **figure 9** montre ces défauts de seuillages dans des cas extrêmes. Pour limiter ces problèmes, nous avons réalisé le seuillage en délimitant, sur la photographie, des zones homogènes du point de vue du contraste (estimées à l'œil). Les photographies en bichromie noir et blanc obtenues ont été analysées avec le logiciel HemiImage *(Brunner, 1998)* afin d'obtenir l'éclairement relatif direct, diffus et total sur la période allant du 1er mai au 31 octobre. Le paramètre de distribution de la luminosité du ciel a été fixé à 1,23 (correspondant à la distribution SOC évoquée en partie **2.1.**), la répartition entre direct et diffus à 50 %, et la résolution à 1 degré (résolution maximale possible). Aucune correction cosinus n'a été appliquée, car nous ne faisons pas de comparaisons avec des mesures directes par capteurs. Nous avons utilisé les mêmes constantes pour les simulations avec le modèle tRayci.

Les transects ont ensuite été précisément localisés *a posteriori* par rapport aux arbres alentours, de telle sorte que les éventuelles erreurs de positionnement soient minimisées.

3.4. Paramètres estimés

Coefficients de forme

Nous ne disposions d'aucune méthode pour mesurer les coefficients de forme d'un arbre au sein d'un peuplement. Nous avons mis au point un protocole qui consistait à prendre une photographie du houppier, dans une direction reliant le centre le la photographie à un point situé à la fois dans le plan contenant la plus grande largeur de houppier, et sur l'axe central de l'arbre. L'inclinaison de cette direction était mesurée afin de calculer, à partir de la projection obtenue par la photographie, les coordonnées d'un certain nombre de points périphériques caractéristiques du houppier. Nous pouvions ensuite faire un ajustement sur les points pour obtenir les coefficients de forme. Malheureusement cette méthode s'est avérée inapplicable en peuplement pour des problèmes de confusion entre le houppier mesuré et les arbres situés derrière.

Nous avons donc dû choisir une valeur arbitraire pour les coefficients. Nous avons pris la valeur de 2 pour les deux essences, aussi bien pour les coefficients de la partie supérieure du houppier que pour ceux de sa partie inférieure. Ce choix s'appuie sur deux arguments.

- Un coefficient de 2 permet d'obtenir un courbure égale à celle d'un arc elliptique de mêmes extrémités, c'est donc l'intermédiaire exact entre la ligne droite (cône) et l'angle droit (cylindre).

- Une majorité de modèles, quand ils représentent un houppier de feuillu par une forme géométrique globale, proposent une forme elliptique (souvent des ellipsoïdes de révolution) *Bartelink (1995)*, *West et Wells (1992)*, *Wang et Jarvis (1990a)*, *Oker-Blom et al. (1991)*, *Canham et al. (1999)*, *Stadt et Lieffers (2000)*.

Une comparaison visuelle des photographies hémisphériques réelles et simulées par le modèle (par exemple **fig. 10** pour les Hêtres et **fig. 11** pour les Bouleaux) montre que cette hypothèse conduit à une représentation réaliste des houppiers.

Estimation du LAD

Nous n'avons pas encore de méthode permettant de mesurer ce paramètre pour un arbre. Mais comme nous étions en peuplement monospécifique, nous avons tout de même pu avoir une estimation de ce paramètre sous l'hypothèse que cette valeur est constante pour une espèce dans un site donné. Ainsi nous avons utilisé la théorie des fractions de trouées, en reprenant une loi d'extinction de Bouguer : $P0 = e^{-G.LAD.L}$. Pour obtenir le LAD, nous avons fait pour chacun des peuplements une régression linéaire de la forme $-\ln(P0) = G.LAD * L$, P0 étant la fraction de trouée et L la longueur de trajet au sein du houppier. Le modèle fait l'hypothèse que G = 0,5. La pente est donc égale à 0,5*LAD.

Pour obtenir des couples (P0, L) nous avons choisi, pour chaque peuplement, 10 photographies hémisphériques, 5 dans chaque transect. Les photographies ont été choisies de façon à échantillonner régulièrement toute la gamme croissante d'éclairement relatif total d'un transect. Ces photographies ont été divisées en 18 secteurs zénithaux et 36 secteurs azimutaux, formant ainsi 648 zones.

D'une part, pour chacune de ces zones, la fraction de trouée P0 a été calculée grâce au logiciel Gap Light Analyser *(Frazer et al., 1999)*. D'autre part le modèle de transfert radiatif a fourni les longueurs de trajet L de chaque rayon central à une zone, en se basant sur la représentation de sa maquette informatique.

Les zones présentant des risques de divergence importants entre les photographies hémisphériques et le modèle ont été éliminées. Nous n'avons donc gardé que les zones qui visuellement ne contenaient ni bordure de houppier, ni tronc et qui garantissaient de ne pas avoir d'arbres situés hors de la placette mesurée sur la photographie.

Nous avons ensuite effectué la régression citée plus haut sur l'ensemble des couples (P0, L), représentant chacun une des zones d'une des photographies hémisphériques. Les **figures 12 et 13** donnent les graphiques de régression respectivement pour les Hêtres et les Bouleaux. La dispersion autour des droites de régressions est importante. Cela peut correspondre à une variabilité réelle du LAD entre arbres, et/ou à une variabilité apparente due à des imprécisions dans le seuillage des photographies hémisphériques. On obtient des valeurs de LAD pour les Hêtres et les Bouleaux de respectivement 0,66 m^2/m^3 et 0,79 m^2/m^3. Notons que le Bouleau a, contrairement à l'impression visuelle que nous avions eu, un LAD supérieur à celui du Hêtre.

Gestion des effets de bords

Les photographies hémisphériques représentent tout le champ de vision alors que le modèle ne traite que la placette mesurée. Ainsi celui-ci ne prend pas en compte l'obstacle créé par les peuplements situé autour de la placette : c'est ce que nous appelons les « effets de bords ». Afin d'obtenir par le modèle une valeur comparable aux photographies, nous avons donc dû gérer les peuplements adjacents à la placette. Pour cela nous avons eu recours à 3 niveaux de bords (voir **fig. 14**).

- En n'utilisant qu'une zone centrale de la placette effectivement mesurée pour les points de validation, nous avons mis en place une zone tampon pour les bords immédiats. La largeur de cette zone est alors respectivement de 25 m et 12 m pour les Hêtres et les Bouleaux.

- Nous avons ensuite simulé les bords proches en créant des peuplements théoriques autour de la placette mesurée. Ils ont été reconstitués à partir de l'observation des peuplements réels, ce qui nous a permis de repérer des grandes zones homogènes en densité. Nous avons représenté ces zones par une répartition homogène (mais non alignée) d'un arbre moyen calculé à partir de la placette mesurée. Les bords proches ainsi créés ont une largeur de respectivement 50 m et 25 m pour les Hêtres et les Bouleaux.

- Enfin nous avons recréé l'environnement lointain pour chacun des peuplements. Dans le cas du peuplement de Hêtre, la placette est entourée d'un massif forestier de grande étendue, nous nous sommes donc contentés de répliquer l'ensemble placette mesurée + bords proches tout autour. Dans le cas des Bouleaux (environné de peuplements divers dont des résineux), nous avons simulé l'occupation du sol environnante par des murs fictifs d'une certaine perméabilité. Chacun de ces murs représente l'obstruction au passage de la lumière réalisée par les peuplements présents sur les cotés de la placette, pour les angles zénithaux proches de l'horizon.

3.5. Validation du modèle par des photographies hémisphériques

Comme nous l'avons dit en introduction, nous avons choisi de valider le modèle par des photographies hémisphériques. Les différences entre les photographies hémisphériques et le modèle de transfert radiatif sont les suivantes :

- le modèle représente le peuplement sous la forme d'une maquette géométrique construite à partir de données dendrométriques mesurées, alors que la photographie hémisphérique utilise une projection optique du peuplement en un point ;

- le modèle répartit les feuilles selon une distribution statistique alors que la photographie donne une projection de la distribution réelle. Le modèle présente donc l'avantage de fournir une information en volume et non pas une projection. Par contre la photographie donne le résultat de la distribution réelle des feuilles et branches ;

- la photographie prend en compte tout le champ de vision alors que le modèle ne traite qu'une placette mesurée ;

- dans les deux cas l'extinction des rayons s'obtient par une proportion du rayonnement transmise ou probabilité d'interception, c'est-à-dire une fraction de trouée (P0). Dans le cas du modèle cette fraction est obtenue par une loi de Bouguer qui intègre la longueur de trajet et la densité de surface foliaire (LAD), alors que dans la cas de la photographie elle est calculée comme la proportion de blanc, sur la photographie (ciel), de la surface projetée du secteur d'angle solide considéré.

La comparaison des deux estimations permet donc d'évaluer la qualité de représentation du peuplement et la méthode de calcul des fractions de trouée du modèle, en s'affranchissant des paramètres concernant la distribution du rayonnement solaire et des rediffusions.

Pour l'interprétation des photographies hémisphériques, nous avons utilisé le logiciel HemImage, créé par *Brunner (1998)* pour évaluer son modèle. Ce programme présente l'intérêt, tout en s'appuyant sur la même théorie que d'autres logiciels d'analyse plus connus (comme GLA, *Frazer et al., 1999*, Hémiphot…), d'utiliser strictement les mêmes paramètres

d'entrée, et sous la même forme, que le modèle tRayci. La même période de calcul a été choisie dans les deux cas.

3.6. Méthodologie de l'analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité a consisté à étudier les effets de la simplification de certains paramètres du modèle, afin de répondre aux questions suivantes :

- est-il possible, sans trop dégrader les résultats de la simulation,
  - de représenter un houppier par quatre ou un seul rayon projeté au lieu de huit ?
  - de tolérer une certaine imprécision sur la mesure des paramètres caractéristiques d'un arbre ?
  - de mesurer les paramètres « arbres » sur un échantillon et de les considérer constants pour une espèce donnée dans un peuplement donné ?
  - d'obtenir les paramètres « arbres » par des relations d'allométrie en fonction du diamètre à 1,30 m ?
- quelle est l'influence sur la simulation d'une mauvaise estimation des paramètres mesurés pour chaque espèce ou pour la placette ?
- peut-on accélérer le temps de calcul en diminuant la résolution du modèle sans trop perdre en qualité de simulation ?

Nous avons donc réalisé un certain nombre de simulations alternatives à la simulation de base. Pour chaque simulation alternative, un seul paramètre d'entrée ou une seule option a été modifié en fonction de la question envisagée. Pour chaque simulation le calcul de l'éclairement relatif a été réalisé pour les points des transects précédemment décrits, soit 72 points pour les Hêtres et 45 pour les Bouleaux. Nous avons fait un choix parmi le plan d'expérience initial (présenté en **Table 2**) en fonction du temps disponible. Ainsi nous avons éliminé les tests sur la hauteur totale, le diamètre et le positionnement des arbres, car il nous a semblé que ces paramètres étaient de toute façon incontournables, et en tous cas moins susceptibles d'optimisation que les autres paramètres « arbres ». Dans le cas de la hauteur totale on peut ajouter que les peuplements étudiés présentent une trop grande homogénéité sur ce critère pour que les simulation apportent une information riche. Nous avons également ignoré le paramètre de répartition des feuilles en périphérie des houppiers pour une raison technique d'impossibilité de calcul (maquette trop volumineuse pour la version actuelle du logiciel). De plus nous avons supprimé les tests sur l'orientation de la placette qui sera de toute façon mesurée, et la simulation avec des cellules de représentation discrètes de 5 m * 5 m, compte tenu de l'approximation importante que cela représente. Nous avons donc effectivement réalisé 32 simulations par peuplement, soit un total de 64.

Nous avons choisi d'analyser les différentes simulations alternatives en référence à la simulation de base et non par rapport aux photographies hémisphériques car cela permet de voir l'effet propre des changements effectués.

3.7. Critères d'évaluation de la qualité des simulations

Dans cette analyse nous présenterons les résultats sous la forme de graphiques représentant l'éclairement relatif fourni par la ou les simulations évaluées, en fonction de celui fourni par la référence. Pour la validation du modèle, la référence sera l'estimation obtenue par les photographies hémisphériques, alors que dans le cas de l'analyse de sensibilité cette référence sera la simulation de base.

Pour chaque simulation évaluée, on réalisera une régression linéaire de la forme (simulation testée) = f(référence). Nous présenterons systématiquement dans des tableaux les

valeurs de la pente et de l'ordonnée à l'origine (exprimée en pourcentage d'éclairement total). Les pentes significativement différentes de 1 (à 5 %) seront mises en gras et soulignées ainsi que les ordonnées à l'origine significativement différentes de 0 (les nombres significatifs à 5 % mais non significatifs à 1 % seront suivis de la lettre p). Ainsi, si la modification effectuée dans la simulation alternative n'a pas d'effet, tous les points devraient être alignés sur la première bissectrice (de pente 1 et d'ordonnée à l'origine 0). Si la pente n'est pas différente de 1 mais que l'ordonnée à l'origine l'est de 0, on a un biais sous la forme d'un décalage systématique quel que soit l'éclairement relatif. Si, par contre, la pente est différente de 1, alors la droite de régression coupe la première bissectrice, ce qui signifie qu'il y un biais linéaire dont l'amplitude dépend de l'éclairement relatif.

Nous donnerons également l'écart-type résiduel (exprimé en pourcentage d'éclairement total), qui représente la dispersion des points autour de la droite de régression : c'est l'erreur hors biais. Notons que l'on obtient la marge d'erreur de part et d'autre de la moyenne en multipliant cet écart-type résiduel par la valeur d'une loi de Student pour le nombre de degrés de liberté et la probabilité (en général 5 %) considérés. Cette loi dans nos deux cas donne une valeur proche de 2.

Toutes ces remarques ne sont strictement vraies que dans le cas où la régression linéaire est adaptée. Dans le cas de courbures du nuage de points, les valeurs données n'auront pas de valeur quantitative. Cependant nous ne présenterons que les résultats de la régression linéaire car notre objet est de mettre en évidence les phénomènes et non de les quantifier avec une exactitude maximale. Par contre nous signalerons les tendances visuellement non linéaires.

4. RESULTATS

4.1. Validation du modèle

Les **figs. 15-18** et **19-23** présentent respectivement les résultats pour les peuplements de Hêtre et des Bouleau.

Remarques sur l'échantillonnage

Tout d'abord nous pouvons constater, sur les **figures 16** et **20**, que la gamme d'éclairement relatif total obtenue est faible, malgré les efforts d'échantillonnage pour la maximiser. Ainsi elle est comprise entre 15 et 25 % pour les deux placettes. Elle est légèrement moins étendue dans le cas des Bouleaux, ce qui est normal étant donné la plus grande homogénéité de ce peuplement. Il aurait donc été souhaitable d'étudier des trouées nettement plus grandes, ainsi que des zones denses plus étendues. De même, la présence de sous-étage aurait sans doute permis d'échantillonner des points de très faible éclairement relatif. Mais ces alternatives auraient posé de gros problèmes de surfaces d'étude et de mesures (dans le cas du sous-étage) étant donné la durée du D.E.A.. Notons également que l'intégration sur la saison de végétation gomme la variabilité.

De plus, on remarque en comparant les **figures 17** et **18** d'une part et **21** et **22** d'autre part, que la gamme d'éclairement relatif directe est dans les deux cas nettement plus étendue que celle d'éclairement relatif diffus. Ce phénomène est assez logique. En effet, les trouées dans ces deux peuplements ont des tailles relativement petites (moins d'un quart d'hectare). Elles sont donc surtout présentes dans les secteurs d'angles proches du zénith, les autres secteurs interceptant toujours un minimum de couvert du fait de l'ambiance forestière environnante. Or ces angles zénithaux ont une influence proportionnellement plus grande dans l'éclairement direct. Il est donc logique que la variabilité d'éclairement provoquée par les trouées soit plus marquée pour le direct.

L'observation des **figures 15** et **19** montre que les transects choisis permettent bien d'obtenir des gradients d'éclairement relatif et que le choix d'un point tous les mètres est pertinent étant donné la très courte distance sur laquelle cet éclairement varie. Pour ce qui est du choix des points sombres (S) et clairs (C), il semble pertinent dans l'ensemble, mais imprécis : on est proche des extrêmes, mais rarement exactement dessus, ce qui est logique étant donné que nous avons utilisé un critère de distance aux troncs. Ainsi les prolongements de 5 m à chaque extrémité des transects ont joué leur rôle : il permettent de s'assurer que l'on a effectivement les extrêmes dans la majorité des cas et de révéler des effets de plateaux (par exemple **fig. 15** transect 1, points S et C). Notons cependant que toutes ces remarques sont beaucoup moins nettes dans le cas des Bouleaux, où la gamme de variabilité est très faible.

Comparaison du modèle avec les photographies hémisphériques

Placette	Pente	Ordonnée à l'origine	Ecart type résiduel
Hêtres	**0,61**	**7,61 %**	1,84 %
Bouleaux	**0,01**	**20,13 %**	1,97 %

Dans le cas des Hêtres, on constate (**fig. 16**) que le modèle et les photographies hémisphériques concordent. Cependant la pente de la régression confirme l'impression visuelle d'une incohérence entre modèle et photographies pour les faibles valeurs simulées du modèle. L'écart-type résiduel est de 1,84 %. Notons cependant que le nuage n'est pas exactement linéaire (voir paragraphe **3.7.**).

Dans le cas des Bouleaux, le modèle semble donner une tendance très différente de celle des photographies hémisphériques (**fig. 20**). Cependant en regardant plus en détail la **figure 20** on a l'impression que cela est surtout dû à des points très excentrés par rapport à un nuage central dont l'orientation par rapport à la première bissectrice semble bonne, même s'il est légèrement décalé. Cela nous a suggéré l'hypothèse que l'essentiel de l'erreur était due aux photographies hémisphériques et non au modèle.

Pour le vérifier, nous avons examiné attentivement les photographies seuillées (en deux couleurs). Nous avons constaté des problèmes évidents. Ainsi sur un certain nombre de photographies on remarque des effets de sous-seuillage. Sur d'autres photographies, plus rares, on a un effet de sur-seuillage (voir partie **3.3.** et **figure 9**). Nous en avons cherché la cause sur les photographies non seuillées (en niveaux de gris). Nous avons alors constaté que certaines présentaient un moins bon contraste que d'autres entre les zones de feuilles les plus claires et le ciel. Nous avons donc cherché à tester l'hypothèse suivante : des erreurs de seuillage dues à des problèmes de contraste sur les photographies seraient en grande partie responsables des écarts avec le modèle. Pour tester cette hypothèse nous avons classé visuellement toutes les photographies de la placette des Bouleaux par difficulté croissante à distinguer les feuilles claires et le ciel.

Nous avons ensuite représenté, pour l'éclairement relatif total, l'écart (photographies hémisphériques – modèle), en fonction du l'ordre de classement obtenu (**fig. 23**). On constate une augmentation de l'écart quand la difficulté à distinguer les feuilles augmente. De plus l'examen des quelques photographies ne s'inscrivant pas dans cette tendance (ordres de classement 3, 6, 25, 28 et 43), montre qu'elles présentent des erreurs de seuillage similaires à celles des photographies s'inscrivant dans la tendance, dont l'écart sur l'éclairement relatif est comparable. Il semble donc très probable que la mauvaise qualité du nuage de points des Bouleaux soit essentiellement due à des erreurs de seuillage liées au contraste des photographies hémisphériques plutôt qu'au modèle. Cependant il n'est pas possible de quantifier ces erreurs, nous ne pouvons donc pas tirer de conclusions sur la validité du modèle dans le cas des Bouleaux.

Il est possible que le même problème soit à l'origine de l'incohérence, plus discrète, signalée pour les Hêtres. L'observation des photographies correspondantes suggère en effet ce même type d'erreurs, mais dans une moindre mesure. Cependant, dans le cas des Hêtres, cela est beaucoup plus difficile à évaluer étant donné l'ampleur nettement moindre du phénomène.

4.2. Analyse de sensibilité

Effet du nombre de rayons projetés utilisés pour représenter chaque houppier

Description de la simulation	Fig.	Nom Sim.	Placette	Pente	Ord. à l'orig	Ecart type résiduel
Un houppier est décrit par seulement 4 rayons orthogonaux, d'azimut 0, 90, 180 et 270 degrés.	24	HetRy4	Hêtres	**0,87**	**12,08 %**	0,89 %
		BouRy4	Bouleaux	**0,77**	**9,31 %**	0,51 %
Un houppier est décrit par 8 rayons, mais tous sont égaux à la moyenne des rayons mesurés de l'arbre.	25	HetRy1	Hêtres	0,90	**8,14 %**	1,29 %
		BouRy1	Bouleaux	**0,61**	**14,84 %**	0,95 %

On constate deux phénomènes, visibles sur les graphiques et confirmés par les pentes et/ou les ordonnées à l'origine significative (en gras souligné). Le premier consiste en un décalage des nuages au dessus de la première bissectrice : il y a surestimation systématique de l'éclairement pour les deux simplifications effectuées. Dans le cas de Ry1, on transforme des formes irrégulières en cercles de rayon moyen. Dans le cas de Ry4, on supprime un rayon sur deux et ceux qui restent sont reliés par des arcs d'ellipses. Dans les deux cas, si on considère des houppiers d'arbres voisins jointifs, cela conduit à créer des trous, ce qui explique la surestimation de l'éclairement. En effet, un rayon donné d'un arbre donné est remplacé par un rayon (égal à une moyenne ou un arc d'ellipse) soit plus court, soit plus long. Si le nouveau rayon est plus long, cela conduit en général à un chevauchement avec le houppier voisin : dans ce cas le modèle ne remplit le volume qu'une fois, ce qui compense en partie la surestimation du volume. Si le nouveau rayon est plus court, on obtient une sous-estimation du volume qui n'est pas compensée. Le second phénomène consiste en une courbure du nuage. Cela peut être la conséquence de la conjugaison de l'effet précédent, de l'hétérogénéité spatiale du caractère jointif des houppiers d'arbres voisins et de l'hétérogénéité spatiale du degré de symétrie radiale des houppiers. Pour ce qui est de l'écart-type résiduel, il est inférieur à 1 % sauf pour HetRy1, où la forte courbure du nuage peut expliquer cette valeur supérieure. Ces écart-types résiduels ne sont qu'indicatifs, le nuage n'étant pas linéaire.

Effet d'une imprécision dans la mesure des paramètres « arbres »

Description de la simulation	Fig.	Nom Sim.	Placette	Pente	Ord. à l'orig	Ecart type résiduel
Chaque rayon de houppier a été aléatoirement augmenté ou diminué de 5 % afin de simuler une imprécision.	26	HetRy5	Hêtres	**1,05**	**-0,83 %**	0,14 %
		BouRy5	Bouleaux	1,00	-0,16 %	0,09 %
Chaque hauteur de base de houppier a été aléatoirement augmenté ou diminué de 5 %.	27	HetHb5	Hêtres	**1,02p**	**-0,68 %**	0,20 %
		BouHb5	Bouleaux	**0,97p**	**0,68 %p**	0,21 %
Chaque Hm a été aléatoirement augmenté ou diminué de 5 %.	28	HetHm5	Hêtres	**1,02**	**-0,40 %**	0,05 %
		BouHm5	Bouleaux	0,99	0,18 %	0,10 %
Chaque rayon de houppier a été aléatoirement augmenté ou diminué de 10 %.	29	HetRy10	Hêtres	**0,95**	**0,82 %**	0,19 %
		BouRy10	Bouleaux	1,00	-0,37 %	0,26 %
Chaque hauteur de base de houppier a été aléatoirement augmenté ou diminué de 10 %.	30	HetHb10	Hêtres	**0,96**	**1,02 %**	0,34 %
		BouHb10	Bouleaux	1,06	-1,80 %	0,65 %
Chaque Hm a été aléatoirement augmenté ou diminué de 10 %.	31	HetHm10	Hêtres	**0,98**	**0,44 %**	0,18 %
		BouHm10	Bouleaux	1,00	0,01 %	0,18 %

N.B. : comme expliqué en **3.7.** les valeurs significatives à 5 % mais non significatives à 1 % sont suivis de la lettre p.

Dans tous les cas l'écart-type résiduel est très faible (toujours inférieur à 0,35 % sauf pour BouHb10 où il n'est que de 0,65 %) : l'erreur introduite est très réduite. Aucun biais n'est révélé dans le cas des Bouleaux sauf pour BouHb5. Pour les Hêtres, de très légers biais apparaissent systématiquement. Ils sont provoqués par de faibles inclinaisons des droites de régression par rapport à la première bissectrice ou par de légères courbures des nuages selon les cas. La détection de ces biais malgré les pentes très proches de 1 est permise par les très faibles écart-types résiduels et le grand nombre de points (72) qui rendent l'ajustement très précis. Il est difficile de les expliquer, du fait que pour un même paramètre, les tendances de ces biais sont différentes selon que l'on a introduit une imprécision de 5 ou de 10 %. Cela semble indiquer qu'ils sont dus aux distributions aléatoires définissant la répartition en plus ou en moins du pourcentage considéré.

Effet de l'utilisation de paramètres « arbres » constants par espèce

Description de la simulation	Fig.	Nom Sim.	Placette	Pente	Ord. à l'orig	Ecart type résiduel
Chaque rayon de houppier de chaque arbre est égal à la moyenne du rayon de même azimut sur l'espèce.	32	HetRyE	Hêtres	**0,70p**	**18,10 %**	2,69 %
		BouRyE	Bouleaux	0,80	**16,94 %**	1,72 %
Hb[(1)] pour chaque arbre est égal à la moyenne sur l'espèce.	33	HetHbE	Hêtres	**0,86**	**4,29 %**	0,89 %
		BouHbE	Bouleaux	**1,43p**	**-7,12 %**	1,52 %
Hm pour chaque arbre est égal à la moyenne sur l'espèce.	34	HetHmE	Hêtres	**0,98**	**0,30 %p**	0,18 %
		BouHmE	Bouleaux	**0,93**	**1,40 %**	0,20 %

Dans le cas de RyE, le résultat est catastrophique : le nuage, non linéaire, est fortement décalé, très difforme et a un fort écart-type résiduel (particulièrement pour les Hêtres). HbE présente les mêmes défauts mais avec une ampleur moindre. Cette simplification n'est donc pas satisfaisante non plus. Par contre dans le cas de HmE, la régression est très bonne et l'écart-type résiduel très faible, bien que Hm soit un paramètre présentant une très grande variabilité. La pente et l'ordonnée à l'origine révèlent tout de même un faible biais qui semble dû à une très légère courbure du nuage de points.

Effet de l'obtention des paramètres « arbres » par allométrie avec le diamètre à 1,30 m

Description de la simulation	Fig.	Nom Sim.	Placette	Pente	Ord. à l'orig	Ecart type résiduel	R^2
Les 8 rayons du houppier d'un arbres sont identiques et égaux à la valeur obtenue par la relation d'allométrie.	35	HetRyAl	Hêtres	**0,48**	**5,77 %**	1,36 %	74 %
		BouRyAl	Bouleaux	1,06	**7,53 %**	1,11 %	77 %
Hb[(1)] pour chaque arbre est obtenu par la relation d'allométrie.	36	HetHbAl	Hêtres	**0,92**	**2,11 %**	0,64 %	16 %
		BouHbAl	Bouleaux	**1,52**	**-10,62 %**	1,53 %	6 %
Hm pour chaque arbre est obtenu par la relation d'allométrie.	37	HetHmAl	Hêtres	**0,98**	**0,30 %p**	0,15 %	4 %
		BouHmAl	Bouleaux	**0,93**	**1,40 %**	0,20 %	<1 %

Nous utiliserons ici le terme d'allométrie au sens d'une relation entre deux grandeurs représentant des compartiments différents d'un arbre, mais il ne s'agit pas de l'allométrie au sens strict telle qu'on la trouve dans *Jean (1987)* ou *Franc et al. (2000)*. Les relations d'allométrie sont établies pour les trois paramètres testés par régression entre le paramètre considéré et le diamètre à 1,30 m. Pour chacun des deux peuplements, ces relations prennent en compte tous les arbres mesurés. Pour RyAl, la meilleur relation est polynomiale d'ordre 2, alors qu'elle est linéaire pour les autres paramètres. Les coefficients de détermination (R^2) des relations d'allométries sont présentés dans le tableau ci-dessus. On retrouve les mêmes

[(1)]Hb, hauteur de base de houppier est exprimée dans ce cas comme un pourcentage de la hauteur totale Ht, pour éviter que Hb > Ht.

problèmes que dans le cas de RyE et HbE pour RyAl et HbAl (nuage déformé et décalé). Rayons de houppiers et hauteurs de bases de houppiers semblent donc avoir une grande importance locale et nécessitent une mesure par arbre. De la même façon que pour HmE, HmAl donne un nuage avec un faible écart-type résiduel, un ajustement précis mais un très léger biais. Cela s'explique aisément par les R^2 des relations d'allométries correspondantes : il sont extrêmement faibles : la relation équivaut donc quasiment à la moyenne (on a des pentes pour cette relation de 0,16 et 0,04 respectivement pour les Hêtres et les Bouleaux).

Effet d'une mauvaise estimation des paramètres caractérisant les espèces

Description de la simulation	Fig.	Nom Sim.	Placette	Pente	Ord. à l'orig	Ecart type résiduel
LAD = -50 % de la valeur de LAD estimée.	38	HetLAD1	Hêtres	**0,93p**	**10,38 %**	0,80 %
LAD = -30 % de la valeur de LAD estimée.		HetLAD2	Hêtres	0,98	**4,44 %**	0,33 %
LAD = -10 % de la valeur de LAD estimée.		HetLAD3	Hêtres	1,00	**1,14 %**	0,08 %
LAD = +10 % de la valeur de LAD estimée.		HetLAD4	Hêtres	1,00	**-0,86 %**	0,06 %
LAD = +30 % de la valeur de LAD estimée.		HetLAD5	Hêtres	1,00	**-1,95 %**	0,13 %
LAD = +50 % de la valeur de LAD estimée.		HetLAD6	Hêtres	0,99	**-2,62 %**	0,17 %
LAD = +100 % de la valeur de LAD estimée.		HetLAD7	Hêtres	**0,98p**	**-3,44 %**	0,22 %
LAD = +200 % de la valeur de LAD estimée.		HetLAD8	Hêtres	**0,96**	**-3,91 %**	0,24 %
LAD = -50 % de la valeur de LAD estimée.		BouLAD1	Bouleaux	**0,71**	**20,25 %**	0,65 %
LAD = -30 % de la valeur de LAD estimée.		BouLAD2	Bouleaux	**0,84**	**10,32 %**	0,35 %
LAD = -10 % de la valeur de LAD estimée.		BouLAD3	Bouleaux	**0,95**	**2,84 %**	0,10 %
LAD = +10 % de la valeur de LAD estimée.		BouLAD4	Bouleaux	**1,04**	**-2,36 %**	0,09 %
LAD = +30 % de la valeur de LAD estimée.		BouLAD5	Bouleaux	**1,09**	**-5,98 %**	0,22 %
LAD = +50 % de la valeur de LAD estimée.		BouLAD6	Bouleaux	**1,13**	**-8,53 %**	0,33 %
LAD = +100 % de la valeur de LAD estimée.		BouLAD7	Bouleaux	**1,18**	**-12,10 %**	0,48 %
LAD = +200 % de la valeur de LAD estimée.		BouLAD8	Bouleaux	**1,19**	**-14,56 %**	0,60 %
Coefficients de forme supérieurs et inférieurs égaux à 1 (ligne droite).	39	Hetsi1	Hêtres	**1,14**	**6,95 %**	1,03 %
		Bousi1	Bouleaux	**0,70**	**22,26 %**	1,22 %
Coefficients de forme supérieurs et inférieurs égaux à 10 (courbure proche de l'angle droit).	39	Hetsi10	Hêtres	**0,83**	**-2,28 %**	0,69 %
		Bousi10	Bouleaux	**0,84**	**-4,55 %**	0,62 %
Coefficient de forme supérieur égal à 2 et coefficient de forme inférieur égal à 1.	40	Hets2i1	Hêtres	1,03	**4,03 %**	0,64 %
		Bous2i1	Bouleaux	0,96	**7,49 %**	0,57 %

Pour les deux essences une sous-estimation croissance du LAD conduit à une surestimation croissante de l'éclairement et inversement, ce qui est logique. L'ampleur du phénomène est plus grande pour les Bouleaux. Cela se traduit par un décalage par rapport à la première bissectrice. On remarque de plus une courbure du nuage pour les fortes sous-estimations du LAD (-50 % en particulier). Dans tous les cas, l'écart-type résiduel est très faible et augmente quand on s'éloigne de la première bissectrice. Pour le Hêtre, seules les valeurs testées extrêmes présentent une pente significativement différente de 1, ce qui implique qu'une relativement faible différence sur le LAD se traduit de façon homogène sur la gamme d'éclairement. Cela n'est pas vrai dans le cas des Bouleaux, où toutes les pentes sont significativement différentes de 1. De plus cette pente augmente progressivement depuis les plus faibles valeurs de LAD jusqu'aux plus fortes. En observant les graphiques, on explique cet effet par des courbures opposées, lorsqu'on sous-estime le LAD et lorsqu'on le surestime. Ces courbures tendent à accentuer l'écart à la première bissectrice quand l'éclairement relatif diminue. Les différences entre Bouleau et Hêtre peuvent s'expliquer par le volume bien plus

important des houppiers de Hêtre. Ainsi, quand le volume de houppier est grand il y a un effet de plateau : un rayon lumineux traversant une grande longueur sera de toute façon arrêté, qu'il y ait un peu plus ou un peu moins de m^2 de feuilles au m^3.

Les modifications sur les coefficients de forme provoquent un décalage et une courbure du nuage. Le passage à des coefficients égaux à 1 conduisent logiquement à une surestimation de l'éclairement qui s'explique par une diminution des volumes de houppiers. L'effet inverse se produit avec des coefficients égaux à 10. Les nuages ne sont pas linéaires : les écart-types résiduels sont probablement surestimés. La comparaison des différents graphiques semble montrer que ces effets sont directement liés au volume de houppier « perdu » ou « gagné ».

Effet d'une mauvaise estimation des paramètres caractérisant la placette

Description de la simulation	Fig.	Nom Sim.	Placette	Pente	Ord. à l'orig	Ecart type résiduel
Bords lointains supprimés. Il s'agit des réplications pour les Hêtres et des murs fictifs pour les Bouleaux.	41	HetBd1	Hêtres	**0,92**	**6,97 %**	0,50 %
		BouBd1	Bouleaux	**1,12**	**-1,30 %p**	0,32 %
Bords lointains et peuplements recréés supprimés. Il ne reste que la placette mesurée.	41	HetBd2	Hêtres	**0,17**	**37,30 %**	5,02 %
		BouBd2	Bouleaux	1,25	1,76 %	2,17 %

La suppression des bords lointains conduit à un décalage et une légère déformation du nuage, avec un écart-type résiduel assez faible. Cela est dû à la perte d'une partie de l'obstacle sur les angles zénithaux proches de l'horizon, globalement commune à l'ensemble des points. La faible déformation du nuage et le petit écart-type résiduel semblent indiquer que les bords proches sont suffisamment étendus pour éviter des effets de bords de proximité, qui seraient très variables d'un point à l'autre.

Par contre la suppression supplémentaire de ces bords proches recréés conduit à un nuage totalement déformé, traduisant cette fois une forte variabilité des effets de bords entre points. Pour mieux comprendre ce phénomène, nous avons tracé Bd2 en représentant le trajet sur les transects par des lignes reliants les points successifs, ainsi que les extrémités sombres et claires. On remarque qu'une certaine continuité apparaît dans le cas des Hêtres. En comparant cela à la **figure 7**, on peut en déduire que la forme obtenue est due à deux facteurs : la proximité relative des points aux bords et la densité d'arbres mesurés, situés entre le points considéré et un bord donné. Ainsi il en ressort que la zone tampon mesurée est insuffisante pour éliminer des effets de bords de proximité, rôle que remplissent les bords recréés. Dans le cas des Bouleaux, la densité et l'homogénéité plus importantes gomment cet effet, mais celui-ci est tout de même présent.

Effet de la diminution de la résolution du modèle

Description de la simulation	Fig.	Nom Sim.	Placette	Pente	Ord. à l'orig	Ecart type résiduel
Taille des cellules de la représentation discrète égale à 1 m * 1 m au lieu de 25 cm * 25 cm.	42	HetCel1	Hêtres	0,98	-0,10 %	0,42 %
		BouCel1	Bouleaux	1,07	-1,69 %	0,74 %
Résolution angulaire d'échantillonnage des directions de l'hémisphère diminuée à 3 degrés.	43	HetRe3	Hêtres	0,99	0,33 %	0,60 %
		BouRe3	Bouleaux	0,96	0,75 %	0,50 %
Résolution angulaire d'échantillonnage des directions de l'hémisphère diminuée à 5 degrés.	44	HetRe5	Hêtres	1,01	-0,28 %	1,10 %
		BouRe5	Bouleaux	0,97	0,90 %	1,10 %
Résolution angulaire d'échantillonnage des directions de l'hémisphère diminuée à 9 degrés.	45	HetR9	Hêtres	1,16	-2,74 %	2,51 %
		BouRe9	Bouleaux	0,92	2,37 %	1,96 %
Résolution angulaire d'échantillonnage des directions de l'hémisphère diminuée à 15 degrés.	46	HetRe15	Hêtres	0,82	3,84 %	2,63 %
		BouRe15	Bouleaux	**0,35p**	**14,29 %**	3,13 %

L'augmentation de la taille de la cellule unitaire de représentation discrète (cel1) à 1 m * 1 m entraîne une erreur relativement faible (inférieure à 1 %), sans biais.

La diminution de la résolution angulaire entraîne une augmentation de l'écart-type résiduel, sans biais significatif. Par contre cela s'accompagne d'un déformation du nuage assez peu claire. Ces phénomènes sont restreints dans le cas de Re3, (écart-type résiduel nettement inférieur à 1 %, faible déformation), mais prennent une ampleur non négligeable quand on passe à Re5 et surtout à Re9 et Re15.

5. DISCUSSION

5.1. La validation du modèle

Une des premières conclusions à tirer est que notre échantillonnage n'a pas été à la hauteur de nos ambitions sur la variabilité des conditions de lumières testées. D'un autre coté, étant donné la durée du D.E.A., il était difficilement envisageable d'étudier des trouées beaucoup plus grandes (qui aurait considérablement augmenté la surface de mesure) ou des peuplements avec sous-étage (difficulté à mesurer 8 projections de houppier par arbre). Une alternative aurait été de prendre en compte des points à différentes hauteurs dans le peuplement, mais cela pose un problème technique pour les prises de vues hémisphériques, qui aurait nécessité un temps de mise au point excessif dans notre cadre. Par contre l'échantillonnage, sur la gamme d'éclairement obtenue, a bien couvert l'ensemble du gradient.

Le choix des deux peuplements étudiés peut également être discuté. Il a fourni des extensions latérales de houppiers, des hauteurs moyennes et des densités nettement contrastées, mais le LAD est relativement proche pour les deux essences alors que nous espérions obtenir des extrêmes.

Enfin il faut souligner la nécessité de réaliser désormais une validation du modèle, dans le cadre de peuplements feuillus, avec des mesures directes de lumière sur une durée de l'ordre de la saison de végétation. Cela permettrait en outre de mieux analyser les écarts avec les photographies hémisphériques.

5.2. L'analyse de sensibilité

Elle a révélé les points suivants.

- Il semble difficile d'alléger la mesure des projections de houppier sans dégrader nettement la qualité de la simulation. Cela pose un problème de mesure pour des peuplements à sous-étage dense. En effet, dans ce cas les projections des houppiers des différentes strates se superposent. Il faut approfondir la réflexion sur la façon de représenter l'extension latérale du houppier, pour alléger les mesures sans que les problèmes décrits ne se manifestent.

- Une imprécision de plus ou moins 10 % sur la mesure des rayons de houppiers, de la hauteur de base de houppier et de la hauteur de largeur maximale de houppier, n'entraîne que de très faibles erreurs et biais. Notons que la hauteur de base de houppier semble plus sensible à ces imprécisions.

- Le choix de *Brunner (1998)* de mesurer la hauteur relative de plus grande largeur de houppier par espèce et non par arbre se justifie, malgré la très grande variabilité de ce paramètre, car cela n'entraîne qu'une très faible erreur et un très léger biais. Par contre il serait fortement dommageable à la qualité de la simulation de la faire pour la hauteur de base de houppier et surtout pour les rayons de houppiers (ce qui confirme la première remarque concernant ce paramètre).

- Le LAD semble nécessiter une estimation assez fine. Cependant une légère imprécision sur cette estimation n'entraîne qu'un décalage systématique et une erreur, tous deux de faible ampleur. Il est envisageable de corriger le biais avec des mesures de références dans le cas de peuplements purs, afin d'améliorer la précision sur l'estimation.

- La gestion des effets de bords, et en particulier des bords proches, apparaît comme absolument cruciale. Il serait intéressant de faire des simulations avec des peuplements théoriques afin d'évaluer la taille de la zone tampon mesurée nécessaire, ainsi que l'impact de l'écart entre peuplement de bordure recréée et réalité.

- Les simulations portant sur les coefficients de forme et les rayons de houppier indiquent que l'estimation correcte du volume des houppiers des arbres semble avoir une grande influence, alors que sa forme exacte en a moins (voir résultats sur Hm).

- Une diminution raisonnable de la résolution du modèle (passer de 1 à 3 degrés pour les rayons lumineux lancés, ou à des cellules de la représentation discrète d'un mètre de côté) permettent d'accélérer assez nettement la simulation en entraînant une erreur faible sans biais. Par contre une résolution plus faible (5 degrés ou plus) entraîne vite des erreurs assez conséquentes.

5.3. Bilan de l'analyse des résultats

Sur la gamme d'éclairement étudiée, le modèle semble globalement bien corrélé à l'estimation des photographies hémisphériques, même si un bruit important, probablement dû aux photographies, rend l'interprétation hasardeuse pour le peuplement de Bouleaux.

Pour ce qui est de l'optimisation de la récolte de données, il ne semble malheureusement pas apparaître de solutions pour simplifier la mesure des projections de houppiers sans dégrader fortement la simulation. Par contre, il n'apparaît pas nécessaire d'avoir une précision excessive pour la mesure des paramètres de hauteur, et on peut même envisager d'utiliser une valeur moyenne par espèce, pour un peuplement donné, de la hauteur de plus grande largeur de houppier. Dans le cas de simulation sur de grandes surfaces, on pourra se permettre de diminuer légèrement la résolution du modèle pour gagner en temps de calcul. Enfin il faudra impérativement mener une réflexion de fond sur la gestion des effets de bords, ainsi que sur l'accès au LAD et aux coefficient de forme dans des peuplements mélangés.

5.4. Les photographies hémisphériques

Cette étude a mis en évidence une imprécision sur l'estimation de l'éclairement relatif par les photographies hémisphérique. Ce problème peut être attribué à un effet de seuillage malgré la procédure relativement fine que nous avons utilisée. Il semble en effet qu'une grande part de l'erreur de seuillage vienne du mauvais contraste entre feuilles et ciel sur les photographies, et ce malgré trois prises de vues à des expositions différentes, et la prise des photographies par temps couvert uniforme. Ce problème est particulièrement marqué pour une essence comme le Bouleau qui a des feuilles claires. Nous envisageons donc d'essayer d'améliorer la finesse du seuillage, par exemple en testant des algorithmes travaillant avec des photographies couleurs ou en utilisant des logiciels perfectionnés d'analyse d'image.

De plus le D.E.A. nous a fait prendre conscience de la difficulté à avoir les conditions météorologiques nécessaires aux photographies hémisphériques. Ainsi de grandes campagnes de prises de vues sont problématiques du fait du nombre relativement faible de journées adéquates, en particulier si les temps de déplacement et de cheminement sont importants. L'alternative du modèle de transfert radiatif prend là tout son intérêt (sous réserve de le

valider) : sur une surface assez grande, les mesures sont très rentables en terme de description de l'éclairement et, de plus, très peu soumises aux aléas climatiques.

6. CONCLUSION

Comme nous l'avons vu, photographies hémisphériques et modèle tRayci sont deux méthodes d'estimation de l'éclairement en un point qui se basent sur la même théorie, celle des fractions de trouées. Nous avons pris comme référence les photographies pour évaluer le modèle car elles constituent un outil plus éprouvé. Cependant la partie validation a montré une incertitude quant à la source de l'écart entre modèle et photographies, avec une forte probabilité d'une erreur sur ces dernières. Il faut donc insister sur le fait que dans les deux cas il n'y a qu'une estimation de la réalité. Pour les photographies hémisphériques, la phase de seuillage conditionne fortement la qualité de la représentation de la végétation. Pour le modèle, c'est la représentation géométrique des houppiers et la répartition statistique des feuilles qui introduit l'imprécision.

C'est en partie pour cela que nous avons exprimé la nécessité de valider le modèle par des mesures directes, afin d'évaluer l'imprécision induite par la représentation du couvert, la représentation de la répartition des radiations solaires sur l'hémisphère céleste et dans le temps, la théorie des fraction de trouées et le fait de négliger les rediffusions. Cependant cette comparaison ne permettra nullement d'estimer les parts relatives des facteurs cités. De plus il est important de noter que les mesures directes présentent elles-mêmes une certaine imprécision due à la nature des capteurs, à leur calibrage et à la forte variabilité de la répartition instantanée des taches de soleil, sans parler des problèmes techniques qui peuvent perturber toute mesure continue.

Il convient donc d'insister sur le fait que modèles de transferts radiatifs, photographies hémisphériques, mesures directes et autres méthodes d'acquisition de l'éclairement ne sont jamais que des moyens d'estimer la réalité. Par conséquent ce qui compte principalement c'est le caractère explicatif des diverses estimations en ce qui concerne les phénomènes biologiques étudiés. Et de ce point de vue, le modèle de transfert radiatifs semble particulièrement intéressant du fait de l'intégration temporelle disponible (commune aux photographies) et de la forte résolution spatiale de l'information fournie, même s'il reste encore à mieux le relier aux autres méthodes d'estimation de l'éclairement. Nous envisageons donc, en parallèle d'une validation plus poussée, d'utiliser le modèle pour réaliser des cartes d'éclairement sur une parcelle forestière afin d'étudier la dynamique de la régénération. Le modèle tRayci sera ainsi utilisé comme un outils permettant d'accéder à la lumière en tant que critère spatial de compréhension des phénomènes de croissance.

REFERENCES

ARIES F., PREVOT L., MONESTIEZ P., 1993. **Geometrical canopy modelling in radiation simulation studies**, in « Crop structure and light microclimate : Characterization and applications », Varlet-Grancher, Bonhomme, Sinoquet, Ed. INRA, pp. 159-173.

BARTELINK H.H., 1995. **MAPFLUX : a spatial model of light transmission through forest canopies**, Hinkeloord Report N°15, Department of Forestry, Agricultural University, Wageningen, Netherlands, 30 pages.

BOQUERA M.E., BARET F., CHELLE M., ARIES F., ANDRIEU B., 1997. **Modélisation 3D du maïs pour la simulation de la réflectance**. Actes du séminaire sur la modélisation architecturale, Paris, 10 au 12 mars 1997, pp. 89-98.

BRUNNER A., 1998. **A light model for spatially explicit forest stand models**. Forest Ecology and Management, vol. 107, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, pp. 19-46.

CANHAM C.D., COATES K.D., BARTEMUCCI P., QUAGLIA S., 1999. **Measurement and modelling of spatially explicit variation in light transmission through interior cedar-hemlock forests of British Columbia**, Can. J. For. Res. vol. 29, pp. 1775-1783.

CHELLE M., ANDRIEU B., 1997. **Modèles surfaciques du microclimat radiatif dans les couverts végétaux : radiosité mixte et lancer de rayons stochastiques**. Actes du séminaire sur la modélisation architecturale, Paris, 10 au 12 mars 1997, pp. 79-88.

CHEN S.G., CEULEMANS R., IMPENS I., 1994. **A fractal-based *Populus* canopy structure model for the calculation of light interception**. Forest Ecology and Management, vol. 69, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, pp. 97-110.

DAUZAT J., 1994. **Simulation des échanges radiatifs sur maquettes informatiques de *Elaeis guineensis*, Radiative transfer simulation on computer models of *Elaeis guineensis***, Oléagineux, vol. 49, N°3, pp. 81-90.

FRANC A., GOURLET-FLEURY S., PICARD N., 2000. **Une introduction à la modélisation des forêts hétérogènes**. ENGREF Nancy, 312 pages.

FRAZER G.W., CANHAM C.D., LERTZMAN K.P., 1999. **Gap Light Analyzer (GLA), version 2.0 : Imaging sofware to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, user manual and program documentation**. Copyright © 1999 : Simon Frazer University, Burnaby, British Columbia, and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York.

GUYOT G., 1997. **Climatologie de l'environnement, de la plante aux écosystèmes**. Eds. Masson, 505 pages.

JACQUET A., MAITE C., 2000. **Synthèse bibliographique sur les principes et techniques de mesures indirectes de l'indice foliaire (LAI) en vue d'une application sur des pommiers à cidre. Proposition d'un choix de matériel et d'une procédure d'étalonnage**, Cahiers Techniques INRA, N°43, pp. 9-19.

JEAN R.V., 1987. **Une approche mathématique de la biologie**. Eds. Gaëtan Morin. 407 pages.

KOOP Henk, 1989. **Forest Dynamics, SILVI-STAR : a comprehensive monitoring system**. Eds. Springer-Verlag. 229 pages.

MCCREE K.J., 1972. **The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants**. Agric. Meteorol. Vol. 9, pp. 191-216. Cité dans Varlet-Grancher et al. 1989.

MCCREE K.J., 1973. **The measurement of photosynthetically active radiation**. Solar energy. Vol. 15, pp. 83-87.

MELONI S., 1999. **A simplified description of the tree-dimensional structure of agroforestry trees for use with a Radiative transfer model**. Agroforestry Systems, vol. 43, Kluwer Academic Publishers, pp. 121-134.

MITCHELL P.L., WHITMORE T.C., 1993. **Use of hemispherical photographs in forest ecology : calculation of absolute amount of radiation beneath the canopy**. OFI Occasional Papers n°44. Oxford Forestry Institute, Oxford, U.K., 39 pages.

OKER-BLOM P., KAUFMANN M.R., RYAN M.G., 1991. **Performance of a canopy light interception model for conifer shoots, trees and stands**, Tree Physiology vol. 9, Heron Publishing, Victoria Canada, pp. 227-243.

PEARCY R.W., EHLERINGER J., MOONEY H.A., RUNDEL P.W., 1989. **Plant Physiological Ecology. Field methods and instrumentation**. Eds. Chapman & Hall, 457 pages.

PLANCHAIS I., PONTAILLER J.Y., 1997. **Application d'un modèle de pénétration de la lumière à une jeune plantation de Hêtres avec abri latéral**, Ann. Sci. For., vol. 54, Ed. INRA/Elsevier, pp. 243-260.

SCHMERBER C., 1997. **La lumière et la forêt**. Bulletin technique de l'Office National des Forêts n°34, numéro spécial, 145 pages.

SINOQUET H., 1989. **Modélisation de l'interception des rayonnements solaires dans une culture en rangs. I. Aspects théoriques**. Agronomie vol. 9, Elsevier / INRA, pp. 125-135.

SINOQUET H., MOULIA B., GASTAL F., BONHOMME R., VARLET-GRANCHER C., 1990. **Modeling the radiative balance of the components of a well-mixed canopy : application to a white clover-tall fescue mixture**. Acta Oecologia, vol. 11 (4), pp. 469-486.

SINOQUET H., 1993. **Modelling radiative transfer in heterogeneous canopies and intercropping systems**, in « Crop structure and light microclimate : characterization and applications », Varlet-Grancher, Bonhomme, Sinoquet, Ed. INRA, pp. 229-252.

SINOQUET H., ANDRIEU B., 1993. **The geometrical structure of plant canopies : characterization and direct measurement methods**, in « Crop structure and light microclimate : Characterization and applications », Varlet-Grancher, Bonhomme, Sinoquet, Ed. INRA, pp. 131-158.

SINOQUET H., VARLET-GRANCHER C., BONHOMME R., 1993. **Modelling radiative transfer within homogeneous canopies : basic concepts**, in « Crop structure and light microclimate : characterization and applications », Varlet-Grancher, Bonhomme, Sinoquet, Ed. INRA, pp. 207-228.

SINOQUET H., BONHOMME R., 1992. **Modelling radiative transfer in mixed and row intercropping systems**. Agricultural and Forest Meteorology vol. 62, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, pp. 219-240.

SINOQUET H., OLIOSO A., GUYON D., ZURFLUH O., 1995. **Modélisation des transferts radiatifs dans le domaine solaire : modèles « classiques »**, in Actes de l'Ecole-

Chercheurs en bioclimatologie Le Croisic 3-7 avril 1995, Tome 1 : de la plante au couvert végétal, Ed. INRA, pp. 333-350.

STADT K.J., LIEFFERS V.J., 2000. **MIXLIGHT : a flexible light transmission model for mixed-species forest stands**, Agricultural and Forest Meteorology vol. 102, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, pp. 235-252.

TER-MIKAELIAN M.T., WAGNER R.G., SHROPSHIRE C., BELL F.W., SWANTON C.J., 1997. **Using a mechanistic model to evaluate sampling designs for light transmission throught forest plant canopies**. Can. J. For. Res., vol. 27, pp. 117-126.

VARLET-GRANCHER C., GOSSE G., CHARTIER M., SINOQUET H., BONHOMME R., ALLIRAND J.M., 1989. **Mise au point : rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal**. Agronomie, vol. 9, Elsevier / INRA, pp. 419-439.

WANG Y.P., JARVIS P.G., 1990a. **Description and validation of an array model – MAESTRO**, Agricultural and Forest Meteorology vol. 51, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, pp. 257-280.

WANG Y.P., JARVIS P.G., 1990b. **Influence of crown structural properties on PAR absorption photosynthesis, and transpiration in Sitka spruce : application of a model (MAESTRO)**, Tree Physiology vol. 7, Heron Publishing, Victoria Canada, pp. 297-316.

WEST P.W., 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 vol. 60, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, pp. 199-231.