

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCE DE L'ENVIRONNEMENT**

**Par
Josée Dubois**

**L'IMPORTANCE DE L'AGRÉGATION SPATIALE LORS DE L'ESTIMATION DE
L'INDICE FOLIAIRE DE PEUPELEMENTS RÉSINEUX PAR TÉLÉDÉTECTION.**

Juillet 2003

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Résumé

La télédétection est devenue indispensable à l'étude des différents écosystèmes et ce, particulièrement dans le domaine forestier. Toutefois, la validité de certains paramètres environnementaux acquis à partir des outils de télédétection demeure encore sujet à controverse. L'indice de surface foliaire (ISF ou LAI = « Leaf Area Index », terme plus fréquemment rencontré dans la littérature) est l'un de ces paramètres que l'on peut mesurer à partir de différents outils de télédétection. Il y a, entre autres, la photographie hémisphérique qui estime une valeur de LAI à petite échelle puis l'image satellite qui permet d'obtenir une mesure de LAI à plus grande échelle en utilisant l'indice de végétation à différence normalisée (IVDN ou NDVI « Normalized Difference Vegetation Index »). Cependant, travailler à plusieurs échelles implique le phénomène d'agrégation spatiale. L'agrégation spatiale masque un problème d'hétérogénéité des surfaces à l'étude. Ceci modifie la définition originale de l'entité géographique étudiée et influence, notamment, les valeurs de LAI extraites des modèles NDVI-LAI. Dans cette étude sur des paramètres estimés en milieu forestier, un calcul de variance spatiale a été effectué sur des orthophotos numériques afin de tenir compte du niveau d'hétérogénéité et de déterminer des surfaces homogènes. Des photographies hémisphériques ont permis ensuite d'estimer des valeurs de LAI pour des sites homogènes et hétérogènes puis, par une inversion du modèle non-linéaire NDVI-LAI, on obtient des valeurs de LAI modélisées. Dans cette étude, les valeurs de LAI mesurées pour les surfaces homogènes variaient de 3,9 en moyenne (écart type de 1,0) par rapport aux valeurs modélisées et de 0,5 (écart type de 3,9) pour les surfaces hétérogènes. Les surfaces hétérogènes suggèrent que les modèles n'ont pas tenu compte de l'effet d'agrégation spatiale. L'homogénéité des surfaces d'étude réduirait l'effet d'agrégation spatiale et apporterait une meilleure estimation du LAI. Cette approche permet d'améliorer la relation NDVI-LAI où le LAI est extrait des modèles.

Abstract

Remote sensing data applied to ecosystem studies, particularly in the forest domain, is of prime importance. However, the validity of certain parameters obtained from remote sensing documents, including the Leaf Area Index (LAI), remains controversial. It is possible to derive this parameter from different remote sensing instruments. Particularly, there is the hemispherical photography procedure which produces an estimation of LAI at small scale and the LAI obtained from the NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) at large scale, calculated from satellite images. However, using different instruments implicitly introduces a scaling effect which involves spatial aggregation. In order to define the level of spatial aggregation it is required that we analyse the level of heterogeneity of the surfaces being measured. Without this, the geographical entity being studied needs to be redefined, and this modifies the LAI values obtained from NDVI-LAI models. To measure the heterogeneity and, in order to determine homogeneous surfaces, a spatial variance approach was used and applied to digital orthophotos of the study area. The LAI values measured for homogeneous surfaces varied by 3.9 on average (standard deviation, 1.0) compared to modelled values and by 0.5 (standard deviation, 3.9) for heterogeneous surfaces. Heterogeneous surfaces suggest that the NDVI-LAI model has not considered the effect of spatial aggregation. Introducing the concept of homogeneity of the surfaces when establishing the NDVI-LAI relationship reduces the spatial aggregation effects on the NDVI values and produces a better LAI estimation. This approach improved the NDVI-LAI model and the extracted LAI values.

REMERCIEMENTS.

Je désire remercier tous ceux et celles qui m'ont conseillé et soutenu tout au long de ce projet de maîtrise qui, après quelques années de labeurs a maintenant pris fin. Je remercie spécialement mon directeur de maîtrise, Denis Gratton, qui m'a toujours supporté et encouragé à ne pas lâcher malgré les quelques embûches rencontrées.

Je tiens également à remercier Jean-Michel Walter de l'Institut de Botanique de Strasbourg pour ses précieux conseils et son accueil chaleureux lors de mon séjour à Strasbourg. Je remercie également Pierre-André Bordeleau pour son support moral et pour toutes les fois où il était là pour répondre à mes nombreuses questions et mes collègues de maîtrise avec qui j'ai travaillé au LIAGE, dont Caroline et Patrick.

Je désire remercier aussi les dirigeants de Parcs Canada qui m'ont permis de travailler en collaboration avec le Parc national de la Mauricie ainsi que tous les gens qui y travaillent et plus spécifiquement Michel Thériault qui me supervisait, de même que Albert van Dyk et Denis Masse. Un remerciement aux deux gardes forestiers qui sont venus me porter secours au 28ième kilomètre l'automne 1998, lorsque ma voiture ne voulait plus démarrer car mes lumières étaient demeurées allumées toute la journée!

**Peu de choses sont impossibles à qui est assidu et compétent...
Les grandes oeuvres jaillissent non de la force mais de la
persévérance
«Samuel Johnson».**

**La réussite, c'est obtenir ce que l'on veut. Le bonheur, c'est
apprécier ce que l'on obtient «Johnson H. Brown».**

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	ii
Abstract	iii
REMERCIEMENTS.....	iv
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	ix
SECTION I : INTRODUCTION.....	2
1.1- INTRODUCTION.....	2
1.2- PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	5
1.2.1- Problématique.....	5
1.2.2- Objectifs de l'étude.....	6
SECTION II : TRAVAUX ANTÉRIEURS.....	9
2.1- INDICE FOLIAIRE : DÉFINITION ET CARACTÉRISATION D'UN PARAMÈTRE ENVIRONNEMENTAL.....	9
2.1.1- Définitions de l'indice foliaire.....	9
2.1.2- Facteurs affectant le LAI et l'hétérogénéité du milieu forestier.....	10
2.2- ESTIMATION DE L'INDICE FOLIAIRE.....	11
2.2.1- Différentes techniques pour mesurer le LAI.....	11
2.2.2- Instruments servant à estimer l'indice foliaire.....	13
2.3- DÉFINITION DES INDICES DE VÉGÉTATION.....	15
2.4- MISE EN RELATION DU NDVI ET DU LAI.....	16
2.5- PROBLÈMES RENCONTRÉS AVEC LA RELATION NDVI-LAI.....	17
2.5.1- Changement d'échelle.....	17
2.5.2- Dimension de la surface d'étude et résolution spatiale.....	18
2.5.3- Échelle de mesure et effet d'agrégation spatiale.....	19
2.5.4- Variance spatiale et homogénéisation de la surface d'étude.....	20
SECTION III : MÉTHODOLOGIE.....	23
3.1- PRÉSENTATION DU SECTEUR D'ÉTUDE.....	23
3.1.1- Description générale.....	23
3.1.2- Description et localisation des sites de mesure.....	24
3.2- DESCRIPTION ET PRISE DES DONNÉES DE TERRAIN.....	25
3.2.1- Prises de données sur le terrain : photographies aériennes et création d'orthophotos.....	25
3.2.2- Utilisation de la variance spatiale dans la détermination de surfaces homogènes.....	26
3.2.3- Prise de données sur le terrain ; utilisation et traitement des photographies hémisphériques.....	30
3.3- ANALYSE DES DONNÉES DE TERRAIN ; ESTIMATION DU LAI.....	31
3.3.1- Calcul du LAI à partir du logiciel WINPHOT.....	31
3.3.2- Calcul du LAI à partir de CIMES.....	32
3.3.3- Calcul de la contagion foliaire.....	33
3.4- DESCRIPTION ET TRAITEMENT DES DONNÉES SATELLITES.....	37
3.4.1- Description de l'image satellite.....	37
3.4.2- Correction atmosphérique et extraction du NDVI.....	38

3.5- INVERSION DU MODÈLE NDVI-LAI ; INTÉGRATION DES VALEURS DE NDVI DE L'IMAGE SATELLITE LANDSAT TM DANS DES MODÈLES THÉORIQUES.....	42
3.6- ESTIMATION DES VALEURS DE LAI MESURÉES IN SITU SUR DES SURFACES NON-HOMOGÈNES.	43
3.7 ANALYSE STATISTIQUE.....	44
SECTION IV : RÉSULTATS.....	47
4.1- DÉTERMINATION DES DIFFÉRENTS PHOTOSITES.	47
4.2- ESTIMATION DU LAI.....	48
4.2.1- Logiciel WINPHOT	48
4.2.2- Programme LAISLP	49
4.2.3- Programme CLUMP	51
4.3- VALEURS DE NDVI DES DIFFÉRENTS SITES.	53
4.4- UTILISATION DU MODÈLE NDVI-LAI.....	55
4.5- VALEURS DE NDVI ET VALEURS DE LAI DE SITES HÉTÉROGÈNES.	57
4.6- VALIDATION DE L'UTILISATION DE LA VARIANCE SPATIALE COMME OUTIL DE MESURE DE L'HOMOGENÉITÉ DES SURFACES D'ÉTUDE.....	63
SECTION V : DISCUSSION.	67
5.1- TRAITEMENT DES PHOTOGRAPHIES HÉMISPHERIQUES.	68
5.2- UTILISATION ET CORRECTION DES VALEURS DE NDVI ; IMPACT SUR LE MODÈLE NDVI-LAI.	70
5.3- VARIANCE SPATIALE : MESURE DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ ET CONTRÔLE DE L'AGRÉGATION SPATIALE.	72
SECTION VI : CONCLUSION.....	76
RÉFÉRENCES.....	79

LISTE DES FIGURES

<i>FIGURE 2.1- Représentation de la réflectance de deux entités géographiques (la végétation et l'eau) en fonction de la longueur d'onde (Bonn et Rochon, 1996).</i>	<i>12</i>
<i>FIGURE 2.2- Représentation du trajet de certaines longueurs d'onde sur la végétation.....</i>	<i>13</i>
<i>FIGURE 2.3- Exemple d'une lentille hémisphérique (à gauche) et d'une photographie hémisphérique (à droite) d'un peuplement de conifères.....</i>	<i>14</i>
<i>FIGURE 3.1- Carte représentant le site d'étude et sa localisation au Québec. Note : l'encadré correspond à la portion de l'image utilisée du satellite Landsat 5.</i>	<i>23</i>
<i>FIGURE 3.3- Schéma représentant la transformation d'une photographie aérienne en orthophoto.....</i>	<i>28</i>
<i>FIGURE 3.4- Schéma représentant la détermination d'un photosite à l'aide de la variance, où DN correspond aux valeurs de niveaux de gris composant la photographie aérienne.</i>	<i>29</i>
<i>FIGURE 3.5- a) représentation de la projection équidistante, en b) représentation de l'hémisphère dans un plan en trois dimensions, où α représente l'angle azimutal et θ représente l'angle zénithal (Walter, 2002)</i>	<i>30</i>
<i>FIGURE 3.6- Image satellite Landsat TM 1995 rehaussée avec 3 canaux de base (TM3, TM4, TM5), section du Parc national de la Mauricie. Note : les trois secteurs d'étude sont représentés par un encadré.....</i>	<i>37</i>
<i>FIGURE 3.7- Schéma représentant le trajet parcouru par le rayonnement solaire avant son arrivée au capteur.....</i>	<i>39</i>
<i>FIGURE 3.8- Schéma représentant les différentes étapes pour obtenir les valeurs de NDVI à partir des valeurs numériques de l'image satellite Landsat TM.....</i>	<i>40</i>
<i>FIGURE 3.9- Image satellite Landsat TM 1995 représentant le NDVI, section du Parc national de la Mauricie avec les sites d'étude.</i>	<i>41</i>
<i>FIGURE 4.1- Photographie hémisphérique d'épinettes blanches (Picea glauca Moench.) prise en septembre 1998.....</i>	<i>48</i>
<i>FIGURE 4.2- Représentation graphique des différentes valeurs de LAI mesurées pour l'ensemble des photosites et obtenues selon trois méthodes (WINPHOT, CLUMP et LAISLP).</i>	<i>52</i>
<i>FIGURE 4.3- Histogramme représentant les valeurs de NDVI, obtenues à partir de l'image Landsat TM 1995, pour l'ensemble des photosites étudiés.....</i>	<i>53</i>
<i>FIGURE 4.4- Graphique montrant les valeurs de NDVI en fonction de deux modèles atmosphériques (LOWTRAN et MODTRAN).</i>	<i>54</i>
<i>FIGURE 4.5- Graphique représentant les différents gains ajustés sur les valeurs de NDVI. Utilisation de deux modèles atmosphériques (LOWTRAN et MODTRAN).....</i>	<i>54</i>
<i>FIGURE 4.6- Image satellite Landsat TM (1995) représentant la localisation des 23 différents sites sélectionnés aléatoirement (points rouges).</i>	<i>57</i>
<i>FIGURE 4.7- Graphique représentant les valeurs de NDVI des sites hétérogènes et homogènes. Utilisation de deux modèles atmosphériques (MODTRAN et LOWTRAN) et différents gains ajustés.</i>	<i>59</i>
<i>FIGURE 4.8- Graphique représentant les valeurs de LAI obtenues selon les divers programmes (WINPHOT, LAISLP et CLUMP) en fonction des photosites hétérogènes.....</i>	<i>60</i>
<i>FIGURE 4.9- Graphique représentant les valeurs de NDVI (1995) en fonction des valeurs de LAI mesurées (WINPHOT et LAISLP) pour les sites homogènes et hétérogènes.....</i>	<i>60</i>
<i>FIGURE 4.10- Graphique montrant les valeurs de NDVI en fonction des valeurs de LAI mesurées (LAISLP_Chen et Cihlar) et modélisées (modèle de Chen et modèle de Chen et Cihlar), pour les sites hétérogènes et homogènes.</i>	<i>62</i>
<i>FIGURE 4.11- Orthophoto de la variance ; représentation de la variance spatiale sur une surface homogène et une surface hétérogène.</i>	<i>63</i>
<i>FIGURE 4.12- Histogramme montrant les valeurs de variance spatiale pour les sites homogènes et les sites hétérogènes.</i>	<i>65</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>TABLEAU 2.1- Tableau représentant quelques-unes des différentes méthodes directes et indirectes pour estimer l'indice foliaire (Bréda, 1993 ; Chason et al, 1991 ; Fassnacht et al, 1994).....</i>	<i>12</i>
<i>TABLEAU 3.1- Valeurs des différents gains ajustés et largeur de la bande spectrale des bandes TM3 et TM4, utilisés dans le calcul de la luminance.</i>	<i>40</i>
<i>TABLEAU 4.1- Valeurs de variance spatiale calculées à chacun des photosites pour les différents secteurs de l'étude.</i>	<i>47</i>
<i>TABLEAU 4.2- Valeurs de LAI effectif, de coefficient de ségrégation de Piélou et valeurs de LAI, obtenues avec le logiciel WINPHOT.....</i>	<i>49</i>
<i>TABLEAU 4.3- Valeurs de LAI effectif obtenues avec le programme LAISLP, indice de contagion de Chen et Cihlar et valeurs de LAI.....</i>	<i>50</i>
<i>TABLEAU 4.4- Valeurs de LAI effectif et de fraction de trouées, obtenues avec le programme CLUMP, de même que les valeurs de LAI.....</i>	<i>51</i>
<i>TABLEAU 4.5- Tableau représentant les données de LAI modélisées, obtenues à partir des valeurs de NDVI de l'image satellite (1995) et valeurs de LAI mesurées (LAISLP_Chén et Cihlar). .</i>	<i>56</i>
<i>TABLEAU 4.6- Tableau descriptif des données et des caractéristiques des photosites hétérogènes.</i>	<i>58</i>
<i>TABLEAU 4.7- Tableau représentant les données de LAI obtenues à partir des valeurs de NDVI (1995) intégrées aux modèles non-linéaire de Chen (1996) et Chen et Cihlar (1996) et valeurs de LAI mesurés (LAISLP_Chén et Cihlar) pour les sites hétérogènes.....</i>	<i>61</i>
<i>TABLEAU 4.8- Tableau de la moyenne des différences et écart type entre les valeurs de LAI mesurées (LAISLP_Chén et Cihlar) et les valeurs de LAI modélisées des sites homogènes et hétérogènes.....</i>	<i>63</i>

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AVHRR :	Advanced Very High Resolution Radiometer
CC :	Canopy Cover (couvert angulaire)
CO :	Canopy Openness (ouverture relative de la canopée)
Cp :	coefficient de ségrégation
DN :	Digital Number
Dpi :	dutch per inch
DSF :	Direct Site Factor
FOV :	Field Of View
GCP:	Ground Control Point
GF :	Gap Fraction (fraction de trouées)
GPS :	Global Positioning System
ISF :	Indice de surface foliaire
ISF :	Indirect Site Factor (terme retrouvé seulement en annexe)
Ip	coefficient de ségrégation de Piélou
Ipw :	coefficient de ségrégation de Piélou pondéré
LAI :	Leaf Area Index
LAle :	Leaf Area Index effective
Landsat :	Land Satellite
Le :	Leaf area index effective
LOWTRAN :	LOW resolution TRANsmission
meanoE :	indice de contagion de Chen et Cihlar
MLA :	Mean Leaf Angle
MNE :	Modèle Numérique d'Élévation
MODTRAN :	MODerate TRANsmission
MSS :	Multi Spectral Scanner
NDVI :	Normalized Difference Vegetation Index
NLAPS :	National Landsat Archive Production System
NOAA :	National Oceanic and Atmospheric Administration

OS :	fraction Open Sky (fraction de ciel visible sous la canopée)
PAI :	Plant Area Index
PAR :	Photosynthetically Active Radiation
PPFD :	Photosynthetically Active Photon Flux Density
RFR :	Red : Farred Ratio
SO :	Site Openness (ouverture relative du site)
SR :	Simple Ratio
TM :	Thematic Mapper
TRAC :	Tracing Radiation and Architecture of Canopies
TSF :	Total Site Factor
VI :	Vegetation Index
VAI :	Vegetation Area Index

CHAPITRE I :

INTRODUCTION

SECTION I : INTRODUCTION.

1.1- INTRODUCTION.

Le milieu forestier couvre la majeure partie du territoire québécois et il joue un rôle important dans les différents écosystèmes (Bonn, 1996). Il est donc essentiel d'approfondir nos connaissances se rapportant au milieu forestier, principalement en raison de la place occupée par la forêt boréale sur l'ensemble du territoire canadien. Dans cette étude, différentes techniques de télédétection, exploitant les propriétés optiques des feuilles, seront utilisées pour fournir des données relatives à la végétation. La télédétection va permettre de caractériser un paramètre environnemental, soit l'indice de surface foliaire (ISF ou LAI = «Leaf Area Index», fréquemment retrouvé dans la littérature) et d'extraire un indice de végétation tel le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Le LAI et le NDVI sont obtenus à partir d'outils de télédétection qui enregistrent l'énergie émise ou réfléchi par la végétation et ce, à différentes échelles (Bonn et Rochon, 1996 ; Danson, 2000). La possibilité de travailler à plusieurs échelles soulève des interrogations sur la représentativité des objets retrouvés à l'intérieur de ces différentes surfaces d'étude. Ces incertitudes sont associées à l'effet d'agrégation spatiale constamment présent et en étroite relation avec l'échantillonnage. Le phénomène d'agrégation spatiale se définit comme étant le regroupement et l'organisation des entités géographiques à l'intérieur d'une surface d'étude. La résolution spatiale, ou l'échelle de mesure, utilisée afin d'acquérir les différentes données, est donc affectée par le phénomène d'agrégation spatiale associé à la cible étudiée.

Tout d'abord, l'estimation des valeurs de LAI, au moyen de méthodes optiques indirectes, fait appel au rayonnement solaire direct et diffus qui traverse, ou est réfléchi par, la canopée. La photographie hémisphérique permet l'étude de la végétation à l'échelle de l'arbre, en donnant de l'information sur la géométrie et la distribution des ouvertures de la canopée. Le LAI est ensuite obtenu par procédure d'inversion, puisque la photographie hémisphérique capte le rayonnement solaire passant à travers la canopée et l'information résultante correspond à la portion de ciel visible, communément appelée la fraction de trouées. Cette portion de ciel, par inversion, donne de l'information sur l'aspect architectural de la canopée,

soit le LAI. Les valeurs de LAI provenant des photographies hémisphériques sont aussi affectées par un phénomène d'agrégation ou de contagion foliaire, provoqué par le regroupement des unités de base composant les objets à l'étude. Chez les conifères, par exemple, les aiguilles sont regroupées en faisceau, les faisceaux sont regroupés sur une branche et les branches sont plus ou moins regroupées pour former la cime de l'arbre. Ce phénomène de contagion occasionne une erreur lors de l'estimation du LAI et un ajustement doit être apporté aux valeurs de LAI (Cihlar *et al.*, 1995 ; Frazer *et al.*, 1997).

D'une autre façon, l'image satellite permet d'extraire des indices de végétation basés sur des valeurs de réflectance, obtenues des différentes bandes du spectre. Le NDVI est un indice de végétation, utilisant les valeurs de réflectance du rouge et du proche infrarouge, sous la forme d'un rapport de bandes spectrales. Ces bandes ont été sélectionnées puisque les plantes réfléchissent peu dans le rouge et fortement dans le proche infrarouge, par rapport aux surfaces non-végétales (Chen, 1996a). Le NDVI nous informe sur la végétation retrouvée à l'intérieur d'une surface, d'une dimension correspondant à celle du pixel, à partir duquel l'information spectrale est acquise. Du côté du LAI, il représente également une quantité de végétation mesurée à l'intérieur d'une parcelle d'étude, réfléchissant peu le rouge et fortement le proche infrarouge. Ces mêmes longueurs d'onde correspondent à celles utilisées pour extraire les valeurs de NDVI. Par conséquent, le LAI peut être associé aux valeurs de NDVI puisque ces deux paramètres étudient et réagissent de la même façon dans le domaine spectral pour les mêmes structures végétales. De ce fait, des chercheurs ont créé et testé des modèles reliant le NDVI et le LAI où le LAI est obtenu à partir de divers instruments optiques (Aman *et al.*, 1992 ; Chen, 1996a ; Chen et Cihlar, 1996 ; Spanner *et al.*, 1990 ; Wulder *et al.*, 1996 ; Yin et Williams, 1997).

Ces modèles NDVI-LAI sont spécifiques et se retrouvent en grand nombre dans la littérature. La relation établie entre ces deux paramètres est souvent faible et certains éléments contribuent à affaiblir cette relation. Leblanc *et al.* (1997) ont noté une faible relation NDVI-LAI, suite aux variations apportées par la présence du sous-bois affectant la densité des couverts végétaux. De même, la présence d'une surface forestière hétérogène peut apporter un biais dans l'estimation du LAI et dans l'extraction des valeurs de NDVI, si la résolution

spatiale est trop élevée (Cihlar *et al.*, 1997 ; Teillet *et al.*, 1997). Ainsi, lors d'étude sur la forêt, il devrait y avoir une homogénéisation de la surface de mesure, de sorte que la composition des surfaces d'étude soit comparable, améliorant du même coup la relation établie entre le LAI et le NDVI.

Le présent document vise à améliorer notre connaissance de la problématique concernant ce projet réalisé dans le cadre de la maîtrise en sciences de l'environnement. Les objectifs sont ensuite déterminés de façon à pouvoir apporter une ou plusieurs solutions à cette problématique. Le document se poursuit avec une revue de littérature portant sur les différents sujets concernés tels l'indice de surface foliaire, les méthodes d'estimation de l'indice de surface foliaire, les indices de végétation, la mise en relation des indices de végétation et de l'indice de surface foliaire, les problèmes rencontrés avec la relation NDVI-LAI, de même que certains travaux antérieurs se rapportant aux sujets énoncés précédemment.

Ayant pris connaissance du sujet, la méthodologie est la section suivante rendant possible l'atteinte et la réalisation des différents objectifs élaborés lors de la mise en contexte du projet. La méthodologie débute par une localisation et une description du secteur d'étude, suivi d'une définition des sites de mesure sélectionnés. Ensuite, il est question de la prise et du traitement des données de terrain, permettant d'obtenir des valeurs de LAI à partir des sites de mesure ou photosites. L'utilisation et la correction des images satellites permet d'extraire des valeurs de NDVI. La littérature permet de repérer des modèles NDVI-LAI qui sont adéquats, à partir desquels on y insère nos paramètres estimés, ce qui offre la possibilité de travailler avec les modèles théoriques. L'ensemble des opérations et des calculs effectués est répertorié dans la section des résultats, sous la forme de graphiques et de tableaux facilitant la visualisation des données obtenues. L'analyse de ces résultats constitue le chapitre de la discussion, permettant de vérifier si les objectifs fixés pour ce projet ont été atteints. Le tout se termine par une conclusion offrant un retour global sur l'étude réalisée dans le cadre de ce projet de maîtrise.

1.2- PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.

1.2.1- Problématique.

La caractérisation de la végétation, et plus spécifiquement l'étude du milieu forestier, demande une attention particulière puisque le couvert forestier est considéré comme hétérogène (Liu *et al.*, 1999 ; Walter et Himmler 1996). Ainsi, la prise de données, de même que les méthodes d'échantillonnage employées doivent être rigoureuses. Les informations obtenues, suite à l'échantillonnage, se rapportent à une quantité de végétation se retrouvant à l'intérieur d'une surface d'une dimension connue et variable. Ces informations peuvent être analysées à partir des valeurs de NDVI et des valeurs de LAI. Le NDVI est un paramètre extrait de l'image satellite, tandis que le LAI est un second paramètre estimé ici à partir de mesure au sol, à l'aide de la photographie hémisphérique. Ces deux paramètres sont utilisés pour créer des modèles NDVI-LAI qui, connaissant les valeurs de NDVI, évitent les tâches laborieuses de mesure *in situ* et permettent d'obtenir des valeurs de LAI. La mise en relation du NDVI, extrait de pixels représentant différentes dimensions spatiales et du LAI, extrait d'instruments mesurant des parties de canopée, amène à se questionner sur la versatilité du modèle NDVI-LAI et sur la précision du LAI extrait. Dans ce sens, est-il valable de comparer et de mettre en relation deux paramètres ne représentant pas nécessairement le même élément au sol ?

Lors de la création d'un modèle NDVI-LAI, la résolution spatiale devrait être considérée car la surface de mesure au sol, servant au calcul du LAI, devrait couvrir la grandeur du pixel à partir duquel on a extrait le NDVI. Préalablement à l'échantillonnage, il doit y avoir une sélection adéquate d'une échelle de mesure, ou ce qu'on appelle résolution spatiale, correspondant au niveau d'agrégation des éléments caractérisant l'objet à l'étude (Dionne, 1997 ; Marceau *et al.*, 1994). Les objets étudiés résultent de l'agrégation de divers éléments qui nécessitent un échantillonnage approprié (Marceau *et al.*, 1993). La représentativité et la définition des objets analysés sont à considérer lorsque l'on traite des images numériques. Une image numérique est composée d'une matrice de pixels. Chaque pixel possède une valeur associée à l'intégration des ondes électromagnétiques émises ou réfléchies par les

surfaces concernées (Dionne, 1997). Un élément qui peut influencer les valeurs de réflectance, servant au calcul du NDVI, est la dimension de la surface de visée. Plus une surface de mesure est petite, plus la réponse spectrale entre les pixels pour un même objet risque d'être différente (Guyot, 1988). Cette différence diminue lorsque le pixel atteint la taille de l'objet étudié. On parle alors de résolution spatiale optimale qui correspond à la taille du pixel où la variance spatiale est à son plus bas niveau (Dionne *et al.*, 1995 ; Marceau *et al.*, 1993). La variance spatiale est un outil permettant l'analyse du niveau d'agrégation retrouvé sur une surface. La variance spatiale correspond donc à l'ensemble de la réponse spectrale des différents pixels qui elle, dépend de la composition et des caractéristiques structurales du peuplement. La variance spatiale d'une image fait référence à l'homogénéité ou à l'hétérogénéité du couvert et dans le cas de la végétation peut influencer les valeurs de LAI obtenues par télédétection (Aman *et al.*, 1992 ; Peterson *et al.*, 1986). Cette étude propose donc l'utilisation d'outils de télédétection tels que, la photographie hémisphérique et l'image satellite Landsat TM pour contrôler l'effet d'agrégation spatiale. L'hypothèse générale de ce projet stipule que le phénomène d'agrégation spatiale a un effet sur l'estimation du LAI, issu d'images satellites.

1.2.2- Objectifs de l'étude.

Les objectifs pour cette étude sont nombreux. Dans un premier temps, il y a des objectifs d'ordre général et méthodologique qui vont permettre d'obtenir des valeurs de NDVI et d'estimer des valeurs de LAI. Un premier objectif est d'estimer des valeurs de LAI, à l'aide de la photographie hémisphérique, en tenant compte de l'homogénéité de la surface de mesure, au moyen de la variance spatiale. Les valeurs de LAI sont obtenues à partir de deux logiciels différents. Un second objectif est d'extraire des valeurs de NDVI à partir d'une image satellite Landsat 5 TM aux endroits de prise de photographies hémisphériques et d'appliquer une correction atmosphérique adéquate aux valeurs de NDVI.

Les objectifs spécifiques peuvent ensuite être établis soient ;

- 1) travailler avec les modèles théoriques NDVI-LAI retrouvés dans la littérature, intégrer nos valeurs de NDVI dans les modèles théoriques et effectuer une comparaison entre les valeurs de LAI mesurées et les valeurs de LAI modélisées des sites homogènes, considérant le phénomène d'agrégation spatiale.
- 2) valider nos résultats avec des valeurs de LAI obtenues des sites hétérogènes, intégrer ces valeurs dans les modèles théoriques NDVI-LAI pour comparer les valeurs de LAI mesurées et les valeurs de LAI modélisées et confirmer l'importance de tenir compte du phénomène d'agrégation spatiale lors de l'estimation du LAI provenant d'images satellites.

CHAPITRE II :

TRAVAUX ANTÉRIEURS

SECTION II : TRAVAUX ANTÉRIEURS.

2.1- INDICE FOLIAIRE : DÉFINITION ET CARACTÉRISATION D'UN PARAMÈTRE ENVIRONNEMENTAL.

2.1.1- Définitions de l'indice foliaire.

L'indice de surface foliaire ou LAI (Leaf Area Index) est un paramètre structural et environnemental défini par Watson (1947), représentant le rapport entre la surface des feuilles projetées sur la surface totale de terrain qu'occupe cette végétation (Bolstad et Gower, 1990 ; Bonn et Rochon, 1996 ; Neumann *et al.*, 1989). Le LAI est un paramètre très important servant à caractériser l'écosystème terrestre (Fassnacht *et al.*, 1997). L'indice de surface foliaire est recherché pour l'analyse architecturale de la végétation, permettant l'étude des interactions forêt-environnement et ce, à différentes échelles (Aman *et al.*, 1992 ; Bréda, 1993 ; Strachan et McCaughey, 1996). Le LAI contribue à fournir des informations pour certains processus écologiques tels que le taux de photosynthèse, l'interception des précipitations, l'évapotranspiration, la respiration, de même que plusieurs autres (Bolstad et Gower, 1990 ; Gholz *et al.*, 1976 ; Nemani *et al.*, 1993).

Dans la littérature et selon les chercheurs, il est possible de retrouver le LAI sous différentes appellations. On rencontre indice foliaire, indice de surface foliaire, indice de superficie foliaire et parfois index de surface foliaire (Bonn et Rochon, 1996 ; Smith *et al.*, 1993 ; White *et al.*, 1997 ; Woods *et al.*, 1991 ; Wulder *et al.*, 1996). Il existe des variations dans la définition du LAI qui sont en fonction, soit des auteurs ou de la méthodologie utilisée. En plus du LAI communément rencontré et utilisé, il existe aussi d'autres termes reliés aux structures végétales ciblées dont le VAI (Vegetation Area Index) de Fassnacht *et al.* (1994), le PAI (Plant Area Index) selon Neumann *et al.* (1989), et le Green LAI (Green Leaf Area Index) de Curran (1983) (Frazer *et al.*, 1997). Selon la littérature, les valeurs de LAI pour l'ensemble des forêts de conifères peuvent varier entre 1 et 16 m²/m², toutefois, des valeurs entre 3 et 8 m²/m² sont plus souvent rencontrées (Running *et al.*, 1986 ; Peterson *et al.*, 1987 ; Spanner *et al.*, 1990 ; Bonan, 1993 ; Wulder *et al.*, 1996). Le LAI étant un indice, les unités

m^2/m^2 ne se retrouvent pas toujours dans les textes scientifiques et seront dans le cas présent, absent pour le reste du document.

2.1.2- Facteurs affectant le LAI et l'hétérogénéité du milieu forestier.

L'indice foliaire peut varier selon le type de végétation. Les essences résineuses présentent des feuilles persistantes et aciculaires, leur conférant une canopée plutôt conique ou cylindrique, comparativement aux essences feuillues arborant une cime large et arrondie (Hosie, 1980). La canopée des conifères, de même que celle des feuillus, démontre une organisation architecturale parfois complexe (Running, 1990). Les conifères présentent un regroupement des structures végétales à plusieurs niveaux : aiguilles, faisceaux, branches, cimes des arbres et groupe d'arbres (Chen, 1996b). Cette complexité affecte le processus de transfert radiatif au niveau de la canopée et fausse la mesure de l'indice foliaire. La valeur de l'indice foliaire est obtenue en considérant une distribution aléatoire du feuillage, ce qui est inexact chez les conifères. On doit apporter un ajustement à la valeur de l'indice foliaire avec l'utilisation d'un coefficient de ségrégation ou indice de contagion (Chen *et al.*, 1991 ; Chen et Cihlar, 1995a ; Chen et Cihlar, 1995b ; Chen et Cihlar, 1996 ; Fassnacht *et al.*, 1994 ; Smith *et al.*, 1993).

Le phénomène de regroupement des composantes végétales, rencontré chez les résineux, vient influencer la densité du peuplement et de la canopée, provoquant des variations dans les valeurs de LAI. Par exemple, dans le cas de l'épinette noire (*Picea mariana*), si on est en présence d'une canopée dense alors le LAI reste constant et si la canopée est clairsemée les valeurs de LAI seront plus dispersées (Woods *et al.*, 1991). D'un autre côté, un peuplement de faible ou forte densité va aussi faire varier les valeurs de LAI, en fonction de la méthodologie employée pour mesurer le LAI (mesures directes ou indirectes) et la surface échantillonnée. Selon Woods *et al.* (1991), la grande variabilité des valeurs de LAI, associée aux couverts végétaux ouverts, est reliée non pas à une compétition pour la lumière mais aux contraintes physiques affectant la croissance des végétaux.

Outre le type de végétation, il y a aussi les facteurs environnementaux, associés au type de milieu, qui influencent les valeurs de LAI et l'hétérogénéité du milieu forestier. Les facteurs

environnementaux sont nombreux, il y a entre autre le climat, le couvert nival, le taux d'humidité, les précipitations, le type de sol et l'eau retenue dans le sol (Chen, 1996c ; Waring *et al.*, 1978). Ces facteurs sont tous plus ou moins inter-reliés et une combinaison de ces facteurs apporte une variation dans la valeur du LAI. La forêt est un environnement complexe présentant un certain niveau d'hétérogénéité, ce qui rend son étude plus ardue. L'hétérogénéité du milieu forestier influence l'estimation du LAI des couverts forestiers résineux. Les variations occasionnées par la pratique sylvicole, les épidémies d'insectes, les feux de forêts et la pollution contribuent à l'hétérogénéité de la forêt et aux variations du LAI. L'âge et la topographie du milieu forestier ont également un impact sur le degré d'hétérogénéité du milieu, par une variation dans la densité du couvert forestier. Un peuplement plus ou moins dense va laisser passer une certaine quantité de lumière qui peut contribuer à une présence plus ou moins importante de végétation à l'intérieur du sous-bois. Ainsi, plusieurs éléments peuvent apporter des variations aux valeurs de LAI, ce qui demande une attention particulière lors de l'estimation de ce paramètre.

2.2- ESTIMATION DE L'INDICE FOLIAIRE.

2.2.1- Différentes techniques pour mesurer le LAI.

La télédétection, avec ces différents outils, permet d'acquérir de l'information sur le couvert végétal à partir de diverses échelles (Chen et Cihlar, 1996 ; Laurini et Milleret-Raffort, 1993 ; Nemani et Running, 1989 ; Strachan and McCaughey, 1996). Le LAI peut être obtenu soit par des méthodes directes ou des méthodes indirectes (Tableau 2.1) (Bréda, 1993 ; Chason *et al.*, 1991 ; Fassnacht *et al.*, 1994 ; Norman et Campbell, 1989 ; Pierce et Running, 1988). Il existe des méthodes directes longues et fastidieuses ayant recours à la destruction du couvert végétal afin d'obtenir une valeur de LAI. Dans la littérature, les relations allométriques sont également utilisées dans certaines études, comme méthodes directes destructives, afin d'estimer un indice foliaire (Bréda, 1993 ; Fassnacht *et al.*, 1994 ; Smith *et al.*, 1991 ; Waring *et al.*, 1978). D'un autre côté, les méthodes indirectes sont plus rapides et minimisent les efforts sur le terrain, tout en offrant la possibilité d'étudier cette même végétation sur plus d'une année. Ces méthodes emploient le domaine optique soit, le rayonnement solaire avec

les différentes longueurs d'onde, pour estimer le LAI. Les méthodes indirectes sont les méthodes préconisées dans ce projet.

TABLEAU 2.1- Tableau représentant quelques-unes des différentes méthodes directes et indirectes pour estimer l'indice foliaire (Bréda, 1993 ; Chason *et al*, 1991 ; Fassnacht *et al*, 1994)

Méthodes directes	Méthodes indirectes
Méthodes destructives (coupe)	LAI-2000 LICOR
Récolte de la litière	DEMON
Méthode des points quadrats	Le Ceptometer
Méthode de l'aiguille	Photographie hémisphérique
Relations allométriques	Capteur satellite

L'ensemble des longueurs d'onde composant le spectre électromagnétique réagit différemment selon la végétation. Il existe un ensemble de courbes de réflectance associé à chacune des entités géographiques étudiées en télédétection. La réflectance étant le rapport de l'énergie réfléchi par la végétation sur l'énergie incidente reçue par cette même végétation, dans un intervalle de longueurs d'onde (Robin, 1995). La végétation présente une courbe de réflectance générale avec de légères variations associées au type de végétation, à la saison et à la période de croissance (Figure 2.1). C'est ce qu'on appelle la signature spectrale, permettant de caractériser les objets étudiés (Lillesand et Kiefer, 1994 ; Robin, 1995).

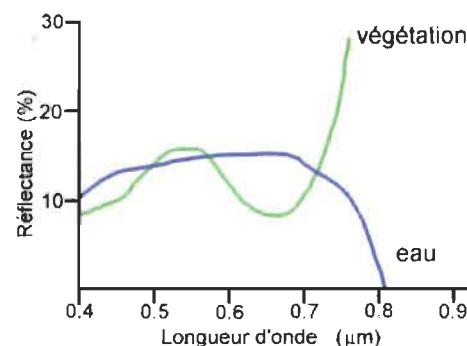


FIGURE 2.1-Représentation de la réflectance de deux entités géographiques (la végétation et l'eau) en fonction de la longueur d'onde (Bonn et Rochon, 1996).

La végétation démontre une forte absorption dans les longueurs d'onde du rouge et du bleu puis une réflexion dans le vert, ce qui permet de voir la végétation de cette couleur (Figure 2.2). Il y a également une forte réflectance du proche infrarouge associée aux constituants cellulaires des feuilles (Bonn et Rochon, 1996 ; Guyot, 1988). Les réactions de la végétation dans ces longueurs d'onde sont utilisées pour estimer une valeur de LAI, puisque ces longueurs d'onde sont enregistrées par différents instruments.

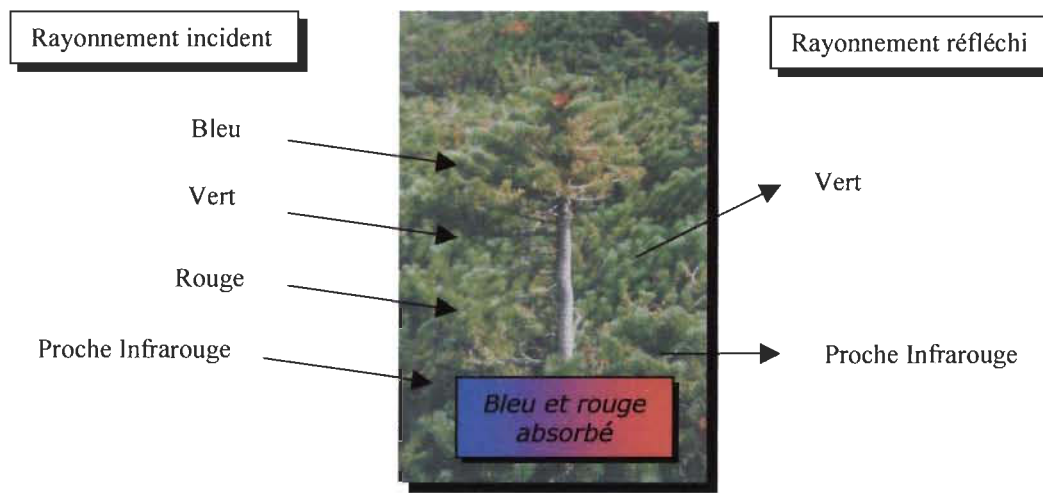


FIGURE 2.2- Représentation du trajet de certaines longueurs d'onde sur la végétation.

2.2.2- Instruments servant à estimer l'indice foliaire.

Il existe plusieurs appareils optiques servant à l'estimation du LAI et utilisant le rayonnement solaire. Comme mentionné dans le tableau 2.1, il y a le LAI-2000 de LI-COR, le DEMON, la photographie hémisphérique, les capteurs satellites et plusieurs autres. Le LAI-2000 de LI-COR, employé fréquemment par les chercheurs, est un système nécessitant une mesure simultanée au-dessus et sous le couvert forestier. Il est muni d'une lentille hémisphérique qui mesure le rayonnement simultanément dans 5 secteurs angulaires autour du zénith. Le LAI-2000 permet d'obtenir une mesure indirecte du LAI (Bréda, 1993). Le DEMON est un appareil mesurant l'énergie solaire. Le DEMON utilise la transmittance du couvert végétal pour obtenir, par inversion, une estimation du LAI (Bréda, 1993). La photographie hémisphérique a été développée par Hill (1924), dans le cadre d'études sur la couverture nuageuse (Hill, 1924). Depuis longtemps utilisée par plusieurs chercheurs, la photographie

hémisphérique permet l'étude de l'énergie solaire reçue par la végétation (Bonhomme et Chartier, 1972 ; Bréda, 1993 ; Rich, 1990). La figure 2.3 présente une lentille hémisphérique ou «fish-eye» et un exemple de photographie hémisphérique résultant de cette lentille.

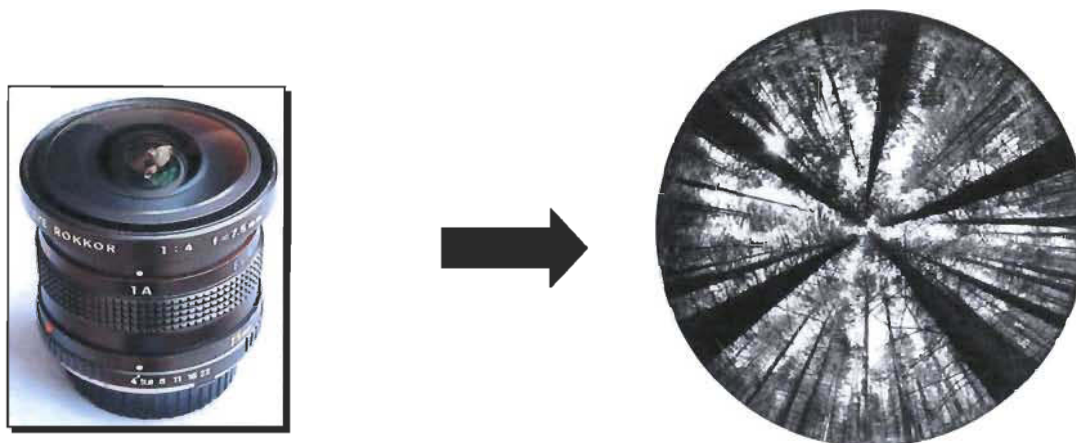


FIGURE 2.3- Exemple d'une lentille hémisphérique (à gauche) et d'une photographie hémisphérique (à droite) d'un peuplement de conifères.

La photographie hémisphérique est un outil pratique caractérisant la canopée. Elle permet d'évaluer les conditions d'éclairement de la canopée et d'estimer une valeur de LAI (Frazer *et al.*, 1997). L'image obtenue de la photographie hémisphérique représente la fraction de trouées ou la portion de ciel visible. La photographie est numérisée puis introduite dans des programmes d'analyse. Frazer *et al.*, (1997) présentent plusieurs programmes traitant les photographies hémisphériques. Ces programmes calculent le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR), le pourcentage d'ouverture dans la canopée, la densité de flux de photons actifs pour la photosynthèse (PPFD) et le LAI selon différents algorithmes et méthodes (Frazer *et al.*, 1997). Le PAR fait référence au rayonnement solaire incident reçu par la végétation et enregistré par la photographie hémisphérique. Le PPFD correspond à la quantité de photons (400-700 nm) qui atteint une surface par unité de temps (Frazer *et al.*, 1997).

Le principe de la photographie hémisphérique est basé sur la détermination de la fraction de trouées, retrouvée au niveau de la canopée. Une partie du rayonnement solaire qui traverse la canopée peut être interceptée par les feuilles. La possibilité d'être interceptée est fonction de

la densité du couvert, de la longueur du rayonnement et de l'orientation foliaire. En supposant que les structures foliaires sont petites, distribuées aléatoirement et ne transmettant pas la lumière, la fraction de trouées selon un angle zénithal donné peut être reliée au LAI. De ce fait, différentes méthodes permettent d'obtenir une valeur de LAI (Bonhomme *et al.*, 1974 ; Norman et Campbell, 1989 ; Walter, 2002 ; Welles et Norman, 1991). Cependant, dans le cas de la canopée des conifères, il est inapproprié de considérer la distribution foliaire comme étant aléatoire. Les valeurs de LAI obtenues se définissent comme étant des valeurs de LAI effectif (LAI_e) (Chen et Cihlar, 1996). Comme mentionné ultérieurement, il est possible d'apporter un ajustement aux valeurs de LAI_e, au moyen d'un coefficient de ségrégation ou indice de contagion. Cet ajustement vient minimiser l'effet de regroupement des différentes structures composant la canopée (Chen, 1996c ; Chen et Cihlar, 1995a ; Chen et Cihlar, 1995b ; Smith *et al.*, 1993). Smith *et al.* (1993) rapporte une sous-estimation de 62 % de la valeur de l'indice foliaire chez le sapin de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.), si l'on ne considère pas la distribution foliaire. Dans la littérature, on retrouve un instrument optique développé par Chen et Cihlar au Centre Canadien de Télédétection, le TRAC (Tracing Radiation and Architecture of Canopies). Le TRAC permet d'obtenir des informations sur des paramètres architecturaux de la canopée, dont la dimension des trouées (Chen, 1996a ; Chen, 1996c ; Chen et Cihlar, 1995a ; Chen et Cihlar, 1995b). En utilisant le TRAC, des valeurs d'indice de contagion de 0,70 et 0,71 ont été obtenues pour des peuplements d'épinettes noires (Chen et Cihlar, 1996). D'un autre point de vue, une étude de Gower et Norman (1991) a démontré une valeur moyenne de 1,56 comme indice de contagion a été obtenue pour quatre espèces différentes de conifères.

2.3- DÉFINITION DES INDICES DE VÉGÉTATION.

L'intérêt de l'imagerie satellitaire s'avère d'une grande importance lorsqu'il est question de l'étude des écosystèmes forestiers et de ses composantes, sur de grandes surfaces . Les différentes longueurs d'onde du spectre, réfléchies par la végétation, sont captées par les multiples satellites afin de fournir des informations concernant le couvert forestier. Les capteurs satellites permettent de calculer des indices de végétation à partir des valeurs de réflectance des différentes bandes spectrales. Les bandes spectrales les plus utilisées pour

l'étude de la végétation sont les bandes spectrales du rouge et du proche infrarouge. Le rouge est en majeure partie absorbé en fonction de la concentration en pigments foliaires dont principalement les chlorophylles a et b (Aman et al., 1992 ; Bonn et Rochon, 1996 ; Guyot, 1988). Du côté du proche infrarouge, il y a une dispersion du rayonnement solaire par les chloroplastes causant une forte réflectance (Aman et al., 1992). Les pigments foliaires et la cellulose qui constituent les parois cellulaires sont transparents, ce qui limite l'absorption et augmente la réflectance dans le proche infrarouge (Guyot, 1988). La plupart des indices de végétation sont formulés en utilisant les valeurs de réflectance de ces deux bandes spectrales, sous forme d'une combinaison ou d'un rapport de bandes (Chen, 1996a).

La littérature peut nous fournir une multitude d'indices de végétation (IV), selon l'information recherchée. Parmi ces indices, on retrouve le PVI (Perpendicular Vegetation Index) de Richardson et Wiegand (1977), le SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) de Huete (1988), le SR (Simple Ratio) de Pearson et Miller (1972) et le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) de Rouse et al. (1974) et plusieurs autres (Baret et Guyot, 1991 ; Brown et al., 2000 ; Chen, 1996a ; Guyot, 1988). Le SR et le NDVI démontrent de meilleurs résultats lorsqu'il est question d'obtenir de l'information sur la végétation (Aman et al., 1992 ; Chen 1996a ; Gamon et al., 1995). Le NDVI est l'indice de végétation le plus communément rencontré et employé pour l'extraction du LAI (Leblanc et al., 1997 ; Wulder, 1998 ; Wulder et al., 1996). Ainsi, le NDVI utilise les valeurs de réflectance des longueurs d'onde du rouge et du proche infrarouge sous forme d'un rapport de bandes qui diffère selon le capteur employé (MSS de Landsat, TM de Landsat, AVHRR de NOAA, etc.) (Asrar *et al.*, 1984 ; Chen, 1996a ; Kite et Spence, 1995 ; Running *et al.*, 1986 ; Yin et Williams, 1997).

2.4- MISE EN RELATION DU NDVI ET DU LAI.

L'utilisation des bandes spectrales a permis de mettre en relation l'indice foliaire et les indices de végétation. Il existe plusieurs relations établies entre les indices de végétation et le LAI (Baret et Guyot, 1991). L'estimation des valeurs de LAI à partir de méthodes indirectes optiques et l'utilisation des indices de végétation a permis de créer de nombreux modèles

retrouvés dans la littérature. Depuis quelques années, plusieurs auteurs tentent de relier le LAI et les indices de végétation (Asrar *et al.*, 1984 ; Running, 1990). Un des premiers essais, afin d'obtenir une valeur de LAI d'images satellites, a été réalisé avec une image provenant du satellite Landsat utilisant le capteur Thematic Mapper (Running, 1990). Le modèle NDVI-LAI est un modèle bien connu et utilisé par les chercheurs (Baret et Guyot, 1991 ; Chen et Cihlar, 1996 ; Curran *et al.*, 1992). Le NDVI est de plus en plus recherché dans les études sur la structure de la canopée et dans les relations avec le LAI (Teillet *et al.*, 1997). Le modèle NDVI-LAI est complexe puisqu'il diffère d'une étude à l'autre, selon le capteur utilisé pour obtenir le NDVI et aussi selon la méthodologie employée pour estimer le LAI. Le modèle NDVI-LAI peut être spécifique à un environnement et au type de peuplement étudié (Cihlar *et al.*, 1997). Il existe plusieurs modèles impliquant la relation NDVI-LAI et ces modèles peuvent être représentés soit par une fonction linéaire ou non, curvilinéaire ou logarithmique (Aman *et al.*, 1992 ; Chen, 1996a ; Chen et Cihlar, 1996).

2.5- PROBLÈMES RENCONTRÉS AVEC LA RELATION NDVI-LAI.

La relation entre le NDVI et le LAI est souvent problématique et dans la plupart des cas, la relation est considérée comme étant faible. Il existe plusieurs facteurs qui contribuent, plus ou moins directement, à affaiblir la relation. Le problème peut être relié à la méthodologie utilisée pour acquérir les valeurs de NDVI et les valeurs de LAI. Par exemple, on remarque une faible relation entre le NDVI et le LAI lorsque la canopée est ouverte, ce qui influence le rapport des longueurs d'onde du PIR et du R, utilisé au moment de l'extraction du NDVI (Nemani *et al.*, 1993 ; Nemani et Running, 1989). D'autres éléments sont ciblés tels que les problèmes occasionnés par la prise des données affectant la définition de l'objet étudié. Il y a aussi la contribution des autres éléments entourant l'objet à l'étude et l'organisation spatiale de l'objet étudié qui affectent la relation NDVI-LAI.

2.5.1- Changement d'échelle.

Le changement d'échelle est un problème souvent rencontré lors d'étude sur la végétation et cela demeure un problème inhérent à l'étude de la relation NDVI-LAI (Marceau, 1998). Le

problème de changement d'échelle n'est pas un phénomène nouveau et demeure toujours un sujet d'étude (Hay *et al.*, 2001). Ce problème a été matière à discussion lors d'ateliers présentés, entre autres, en Floride (États-Unis) en 1985 et puis à Montréal (Canada) en 1998 (Marceau, 1998). Les problèmes de changement d'échelle nous obligent à se questionner sur la validité de la relation NDVI-LAI et à regarder les différents facteurs pouvant être en cause.

Une première chose à effectuer est de définir les entités géographiques étudiées et d'en connaître la composition (Hay *et al.*, 2001 ; Marceau, 1998). Une fois l'objet défini, il est possible de déterminer la surface qu'il occupe et de décider l'échelle de mesure appropriée pour l'étude de cet objet. Par la suite, une variation d'échelle demandera de reconsidérer l'objet étudié, à l'intérieur d'une nouvelle dimension de surface. Les dimensions spatiale et temporelle sont importantes dans les problèmes d'échelle (Malingreau et Belward, 1992). La dimension spatiale correspond à une échelle de mesure, qui doit coïncider avec la taille de la surface à partir de laquelle les mesures sont réalisées. Du côté de la dimension temporelle, le cycle naturel des composantes de la biosphère, la fréquence des observations et les mesures effectuées, de même que la possibilité d'obtenir des données à long terme, doivent être considérées dans les problèmes de changement d'échelle (Malingreau et Belward, 1992). L'étude d'un environnement forestier, avec toute ces complexités, nécessite la sélection d'une dimension adéquate d'une surface de mesure afin d'obtenir les informations voulues (Hay *et al.*, 2001 ; Malingreau et Belward, 1992). La dimension de la surface d'étude est fonction de la taille des objets qui la composent. À titre d'exemple, un changement au niveau des données satellites peut influencer l'estimation du LAI sensible aux indices de végétation (Cihlar *et al.*, 1997).

2.5.2- Dimension de la surface d'étude et résolution spatiale.

La dimension de la surface d'étude est un critère important lorsque l'on désire obtenir des informations sur le couvert forestier. Le choix d'une dimension adéquate n'est pas une tâche facile et même quelquefois incontrôlable. Selon la disponibilité des données et des instruments utilisés, il est parfois impossible de sélectionner la grandeur de la fenêtre d'analyse ou du pixel. La définition d'un pixel correspond à la dimension de la surface

d'étude soit, la plus petite surface homogène composant une image (Robin, 1995). La taille du pixel varie selon les instruments ayant servis à enregistrer les données. L'étude de la végétation demande l'utilisation de pixels de différentes grandeurs. Selon sa dimension, un pixel peut représenter un seul objet ou l'intégration de plusieurs objets donnant alors une réponse spectrale mixte. La dimension du pixel fait référence à ce qu'on appelle la résolution spatiale. La résolution spatiale est déterminée à partir de la résolution géométrique des différents capteurs servant à enregistrer l'image. Les satellites possèdent une résolution géométrique indiquant la dimension du champ instantané de vue (Marceau *et al.*, 1993 ; Wulder, 1998). La résolution géométrique dépend de la hauteur de prise de vue et des qualités spectrales du capteur. Prenons comme exemple, le satellite Landsat avec le capteur Thematic Mapper qui possède une résolution spatiale de 30 m, sauf pour le canal de l'infrarouge thermique (canal 6), pourvu d'une résolution de 120 m (Bonn et Rochon, 1996).

Différentes études ont été réalisées afin de déterminer la résolution spatiale propre à un objet (Dionne *et al.*, 1995 ; Marceau *et al.*, 1993). La méthode de la résolution spatiale optimale offre la possibilité d'obtenir la résolution spatiale représentant la meilleure correspondance entre l'objet sur l'image et celui retrouvé sur le terrain. Cette méthode est basée sur une classification spectrale pixel à pixel avec l'opportunité de discriminer les objets forestiers en fonction de leurs caractéristiques spatiales et spectrales (Dionne *et al.*, 1995). Selon les différentes propriétés et particularités des objets étudiés et dépendamment de leur disposition à l'intérieur d'une surface, on doit reconsidérer l'échelle de mesure. Ce problème se rencontre lors de l'utilisation des modèles NDVI-LAI, permettant d'estimer une valeur de LAI connaissant le NDVI. Ces modèles sont développés et créés sans prendre en considération les problèmes de changement d'échelle.

2.5.3- Échelle de mesure et effet d'agrégation spatiale.

Lors d'étude sur la végétation, il est primordial de connaître et de définir quelles sont les informations recherchées. L'étude d'un arbre ou d'un peuplement ne requiert pas la même échelle de mesure. L'information désirée est la même mais la dimension de la surface d'étude va différer. La végétation demeure un sujet complexe à étudier, de part la multitude

d'espèces végétales, la variété dans la géométrie de la canopée et l'organisation structurale à l'intérieur de la voûte végétale. À titre d'exemple, étudier la végétation à l'échelle de l'arbre avec l'image satellite Landsat TM, possédant une résolution spatiale de 30 m, n'est pas approprié. Il en est de même pour l'étude d'un peuplement avec une image satellite NOAA (AVHRR), de résolution inférieure à Landsat TM. L'opportunité d'étudier la végétation selon plusieurs échelles avec différents outils introduit le phénomène d'agrégation spatiale. L'effet d'agrégation spatiale est dépendant de l'échelle de mesure et par le fait même, de la résolution spatiale. L'agrégation spatiale se définit par la combinaison et l'arrangement, à l'intérieur d'un pixel ou d'une surface de mesure, de plusieurs composantes du paysage (Bielski et Cavayas, 1998). Ainsi, à chaque échelle de mesure est associée un effet d'agrégation spatiale, représenté par un mélange particulier d'éléments composant la surface d'étude et définissant l'objet étudié (Dionne, 1997 ; Marceau *et al.*, 1994). Le phénomène d'agrégation spatiale, associé à l'échelle de mesure, peut être contrôlé par l'analyse de la variance spatiale retrouvée à l'intérieur d'une surface d'étude.

2.5.4- Variance spatiale et homogénéisation de la surface d'étude.

La variance spatiale, utilisée par plusieurs auteurs, relie la résolution spatiale et les caractéristiques de l'environnement permettant l'analyse de la structure spatiale d'une image (Marceau *et al.*, 1993 ; Woodcock et Strahler, 1984 ; Woodcock et Strahler, 1987). Le variogramme est une méthode employée pour la représentation de la structure spatiale d'une image, en utilisant une mesure de la variation spatiale en fonction d'une certaine distance (Woodcock *et al.*, 1988). Une méthode similaire pour étudier la structure spatiale d'une image est l'utilisation de graphiques de la variance locale en fonction de la résolution spatiale (Dionne *et al.*, 1995 ; Woodcock et Strahler, 1987). La variance spatiale est utilisée dans la détermination d'une échelle d'observation appropriée, pour la définition d'objets composant une scène. La réponse spectrale des différents objets composant une scène fait varier la variance spatiale. L'utilisation de la variance spatiale permet de déterminer la meilleure résolution spatiale selon la cible visée. Ainsi, à l'intérieur d'une maille d'échantillonnage, une variance spatiale élevée indique l'intégration de plusieurs réponses spectrales, associées à différents objets. Il est question alors d'un milieu ou d'une surface hétérogène ne

permettant pas l'étude d'un objet en particulier. C'est le cas d'études portant sur l'analyse du couvert forestier, par l'utilisation de modèles NDVI-LAI, retrouvés dans la littérature. Ces modèles ignorent la composition de la surface d'étude, négligent l'apport du sous-bois, la présence d'éléments au sol et la variabilité des propriétés spectrales des feuilles. Tous ces facteurs contribuent à la présence d'un certain degré d'hétérogénéité retrouvé en milieu forestier, ne permettant pas l'étude spécifique d'un objet. La détermination d'une résolution spatiale adéquate est possible lorsque la variance spatiale demeure la même (ne varie plus) pour une surface de mesure donnée, signifiant une homogénéité de la surface. Comme mentionné ultérieurement, cette résolution est appelée résolution spatiale optimale et est unique à chaque entité étudiée (Dionne, 1997 ; Marceau *et al.*, 1993 ; Marceau *et al.*, 1994). Cela signifie que les différents milieux urbain, forestier, agricole et plus spécifiquement les peuplements de feuillus et de résineux possèdent une résolution spatiale optimale qui leur est propre. Les critères à considérer lors d'étude sur la végétation sont le changement d'échelle, la définition de l'entité géographique étudiée, la composition de la surface d'étude associée à l'homogénéité de la surface de mesure, une stabilisation de la variance spatiale, la détermination d'une résolution spatiale appropriée et une échelle de mesure adéquate en fonction de l'objet étudié.

CHAPITRE III :

MÉTHODOLOGIE

SECTION III : MÉTHODOLOGIE.

3.1- PRÉSENTATION DU SECTEUR D'ÉTUDE.

3.1.1- Description générale.

Le Parc national de la Mauricie a été choisi comme secteur d'étude en raison de son étendue (536 km²) et la diversité de sa flore. L'aire d'étude est localisée au Québec (Canada) dans la région de la Mauricie (Figure 3.1). La topographie générale du Parc de la Mauricie correspond au relief typique du bouclier canadien avec la présence de monts à sommets arrondis d'altitude semblable (350 m), avec des vallées encaissées (Barnoti, 1984). Les critères de sélection du secteur d'étude étaient l'accessibilité du site, une forte proportion de conifères et une superficie minimale de 1000 m². Trois sites de mesure ont été sélectionnés à l'intérieur du parc.



FIGURE 3.1- Carte représentant le site d'étude et sa localisation au Québec. Note : l'encadré correspond à la portion de l'image utilisée du satellite Landsat 5.

3.1.2- Description et localisation des sites de mesure.

L'observation de photographies aériennes infrarouge fausse couleur (1 : 15000) et de cartes écoforestières, de même qu'une sortie sur le terrain, a permis de délimiter les sites d'étude. L'homogénéité était un critère recherché lors de la détermination d'un secteur d'étude afin de mieux identifier les entités à l'étude, soit la forêt de conifères. L'homogénéité du secteur d'étude a été confirmée par la présence d'un peuplement monospécifique, avec un sous-bois semblable (strate arbustive faible avec mousse et sphaigne composant le tapis forestier), d'une maturité et densité connue et présentant un faible taux de perturbations forestières reliées à l'absence d'interventions sylvicoles et ce, depuis l'inauguration du parc en 1970. Trois secteurs ont été identifiés pour la prise de mesure. Ils étaient tous accessibles par le chemin principal de 63 km qui sillonne le parc. Il y avait un site localisé dans le secteur Mékinac, un autre site tout près du lac Édouard et un dernier site se retrouvant à proximité du lac Allais. Les espèces végétales dominantes étaient l'épinette blanche (*Picea glauca* Moench.) et l'épinette noire (*Picea mariana* Mill.). Les peuplements étaient d'âge mature, d'une bonne densité avec une hauteur variant entre 12 et 20 m. L'ensemble des sites présentaient un relief relativement plat.

Le premier secteur se trouvait à l'entrée est du parc, soit près de la municipalité de St-Jean-des-Piles. Il est composé d'une parcelle d'une des plus vieille et importante plantation d'épinettes blanches au Canada (plus de 70 ans). Ce site longe la rivière St-Maurice et représente une surface rectangulaire d'environ 200 m par 1000 m. C'est un peuplement d'âge mature reboisé dans les années 30 par la compagnie «Consolidated-Bathurst Limited» (Plan de réhabilitation, 1987). Le deuxième secteur était accessible à partir du ruisseau Marchand qui se déverse dans le lac Édouard, du côté ouest du lac. Il était localisé aux environs du 16^{ième} km du chemin parcourant le parc, à partir de l'entrée est. Le troisième secteur se retrouvait dans la partie ouest du parc plus précisément à l'ouest du lac Allais, soit au 28^{ième} km. Le Parc national de la Mauricie a réalisé des études à cet emplacement car cette parcelle de végétation est considérée comme représentative d'un échantillon de forêt boréale.

3.2- DESCRIPTION ET PRISE DES DONNÉES DE TERRAIN.

3.2.1- Prises de données sur le terrain : photographies aériennes et création d'orthophotos.

Une série de photographies aériennes infrarouge fausse couleur au 1 : 15000, datées du mois d'août 1996, a été utilisée afin de déterminer des secteurs où il était possible de retrouver des parcelles de terrain composées en majorité de conifères. Les conifères ont été sélectionnés car leur feuillage varie peu selon les changements climatiques saisonniers. La littérature fait mention que le feuillage des conifères varie à tous les 4 à 10 ans et, cette variation n'est que de 30 % (Chen, 1996 ; Hosie, 1980). De plus, l'étude des conifères sur plus d'une année est possible et avantageuse comparativement aux feuillus qui perdent leurs feuilles annuellement. L'ensemble des données récoltées et utilisées tout au long de cette méthodologie provient de la même période, soit à la fin de l'été et au début de l'automne. Cette période vient limiter les erreurs où les variations au niveau de la végétation peuvent être associées aux changements saisonniers. La sélection des photographies aériennes a été effectuée suite à l'observation d'une carte écoforestière de la région étudiée. Une visite sur le terrain et l'observation des différents éléments composant les photographies aériennes a permis de confirmer la présence de peuplements de conifères. Les parcelles de terrain choisies devaient couvrir une dimension d'environ 1000 m X 1000 m. La taille de la surface d'étude devait être assez grande pour y sélectionner ultérieurement des endroits de prises de photographies hémisphériques ou photosites.

Les photographies aériennes sélectionnées ont été numérisées (en noir et blanc) et converties en orthophotos. Le principe de l'orthophoto est de corriger l'effet d'optique puis l'effet de la topographie sur la photographie aérienne. L'effet d'optique, associé à l'effet de la lentille, fait en sorte que les objets subissent une déformation radiale, c'est-à-dire qu'ils sont inclinés du centre vers les bords de la photographie. Parallèlement, on doit corriger les effets de la topographie qui provoquent aussi une inclinaison des objets selon la pente et l'orientation du relief. La correction doit être accompagnée d'un MNÉ (Modèle Numérique d'Élévation). Le MNÉ a été créé à partir de courbes topographiques numérisées (1 : 20 000) du secteur

d'étude. L'utilisation d'un GPS (Système de Positionnement Global) a permis d'enregistrer des points de contrôle au sol. Ces points fournissent des coordonnées géographiques permettant de géoréférencer les photographies aériennes et de créer des orthophotos. Les coordonnées géographiques enregistrées à l'aide du GPS possèdent une précision géographique en deçà du mètre, suite à l'application d'une correction différentielle sur les valeurs brutes du GPS. En appliquant l'ensemble des informations (lentille, topographie et GPS), la photographie aérienne devient une orthophoto, c'est-à-dire une photographie où tous les éléments sont en position orthogonale et conformément selon une projection cartographique (Figure 3.3).

La correction des photographies aériennes permet de se situer spatialement en sélectionnant un point sur la photographie. L'orthophoto permet de travailler dans le même plan cartographique que l'image satellite et de s'y repérer puisque la projection est identique. Les photographies aériennes corrigées procurent de l'information à haute résolution spatiale permettant une interprétation des caractéristiques du couvert forestier (cimes des arbres, structure du peuplement, densité du couvert, etc.).

3.2.2- Utilisation de la variance spatiale dans la détermination de surfaces homogènes.

L'utilisation d'orthophotos numérisées a permis de déterminer des photosites à l'aide de la variance spatiale. La variance spatiale est un outil permettant d'analyser la structure des peuplements grâce à la variabilité associée aux différentes intensités de niveaux de gris retrouvées sur la photographie aérienne. La structure d'un peuplement fait référence à l'organisation du peuplement et à l'arrangement des arbres en terme de canopée, permettant de classifier le peuplement en tant que surface homogène ou non. À partir des orthophotos, on a calculé la variance spatiale sur des fenêtres d'analyse de 11 pixels par 11 pixels et ce sur l'ensemble de la photographie. La taille de la fenêtre d'analyse a été choisie pour être conforme à la taille probable des peuplements et pour correspondre à la dimension spatiale typique des peuplements de conifères. Les photographies aériennes ont été numérisées à 400 dpi (points par pouce), ce qui produit des pixels de près de 1 m de résolution. Le pixel correspond au plus petit élément retrouvé sur la surface étudiée. L'algorithme qui a été

employé pour obtenir des valeurs de variance spatiale sélectionne les 122 premiers pixels de l'image, soit les 11 premiers pixels à l'horizontale et les 11 premiers pixels à la verticale afin d'obtenir une valeur de variance (Annexe 1). Il calcule la variance à partir des valeurs de niveaux de gris associées à chacun des pixels (Figure 3.4). La valeur obtenue est notée puis le calcul se fait ensuite en décalant de un pixel et le même cheminement se poursuit sur l'image entière. L'image obtenue affiche des plages de diverses variances.

Par la suite, à l'intérieur des trois secteurs d'étude sélectionnés, on a retracé des plages où la variance variait faiblement ou est homogène sur une surface d'approximativement 100 m X 100 m (Figure 3.4). Des surfaces homogènes indiquent la présence d'un même objet, soit une forêt de conifères. La dimension des parcelles d'étude était importante car elle devait couvrir au moins la grandeur de trois pixels de 30 m par 30 m du satellite Landsat TM. Cette dimension était nécessaire afin de s'assurer que l'ensemble photosite, orthophoto et image satellite TM correspond au même objet localisé sur le terrain. Cette dimension tient compte de l'erreur possible de localisation associée à la prise de photographies hémisphériques et aux corrections géométriques appliquées aux orthophotos et images satellites. La détermination de zones de même variance a permis de définir, en utilisant la coordonnée centrale de cette surface, un emplacement de photographies hémisphériques. Au total, 24 photosites présentant des valeurs de variance similaire ont été sélectionnés sur l'ensemble des secteurs d'étude.

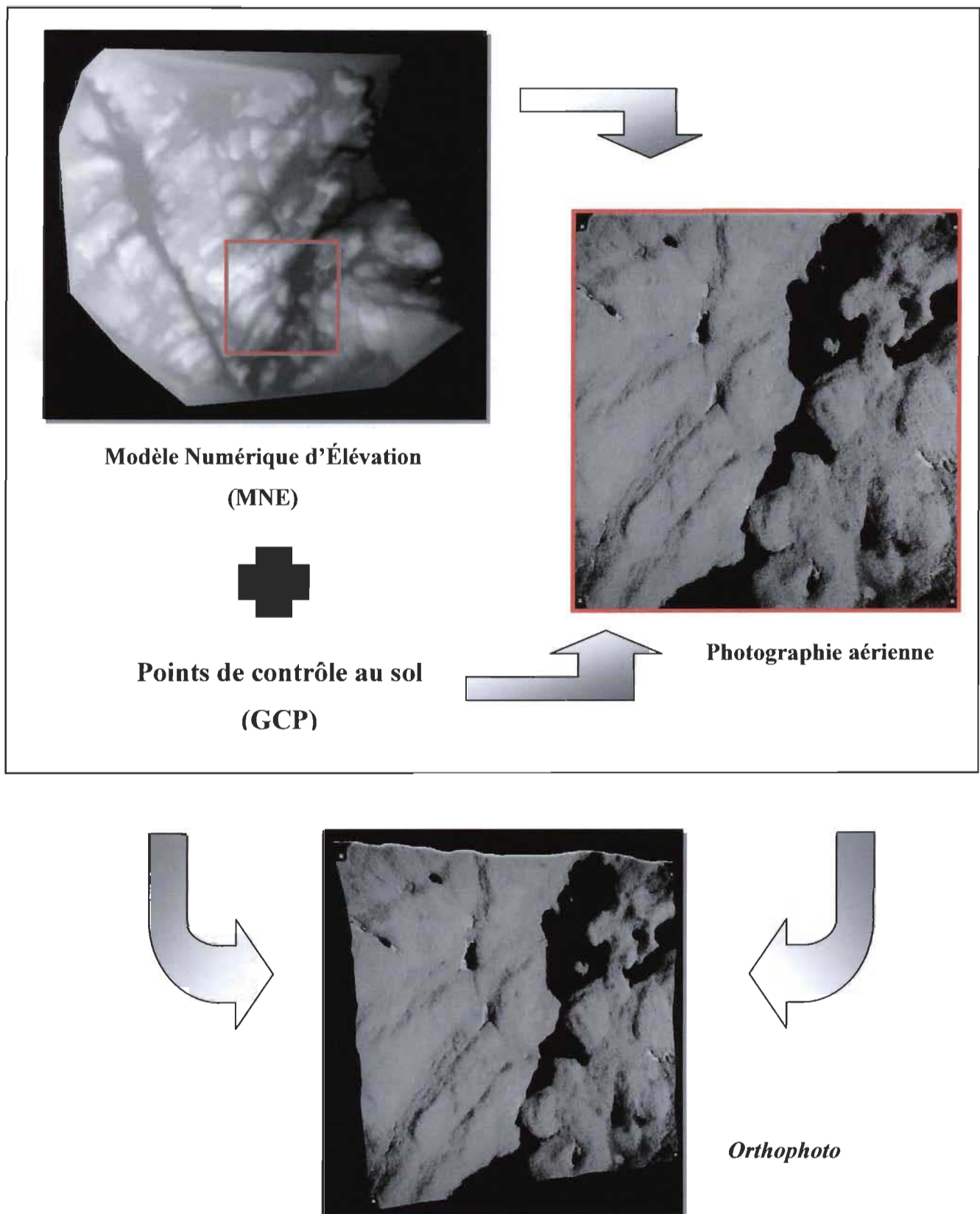


FIGURE 3.3- Schéma représentant la transformation d'une photographie aérienne en orthophoto.

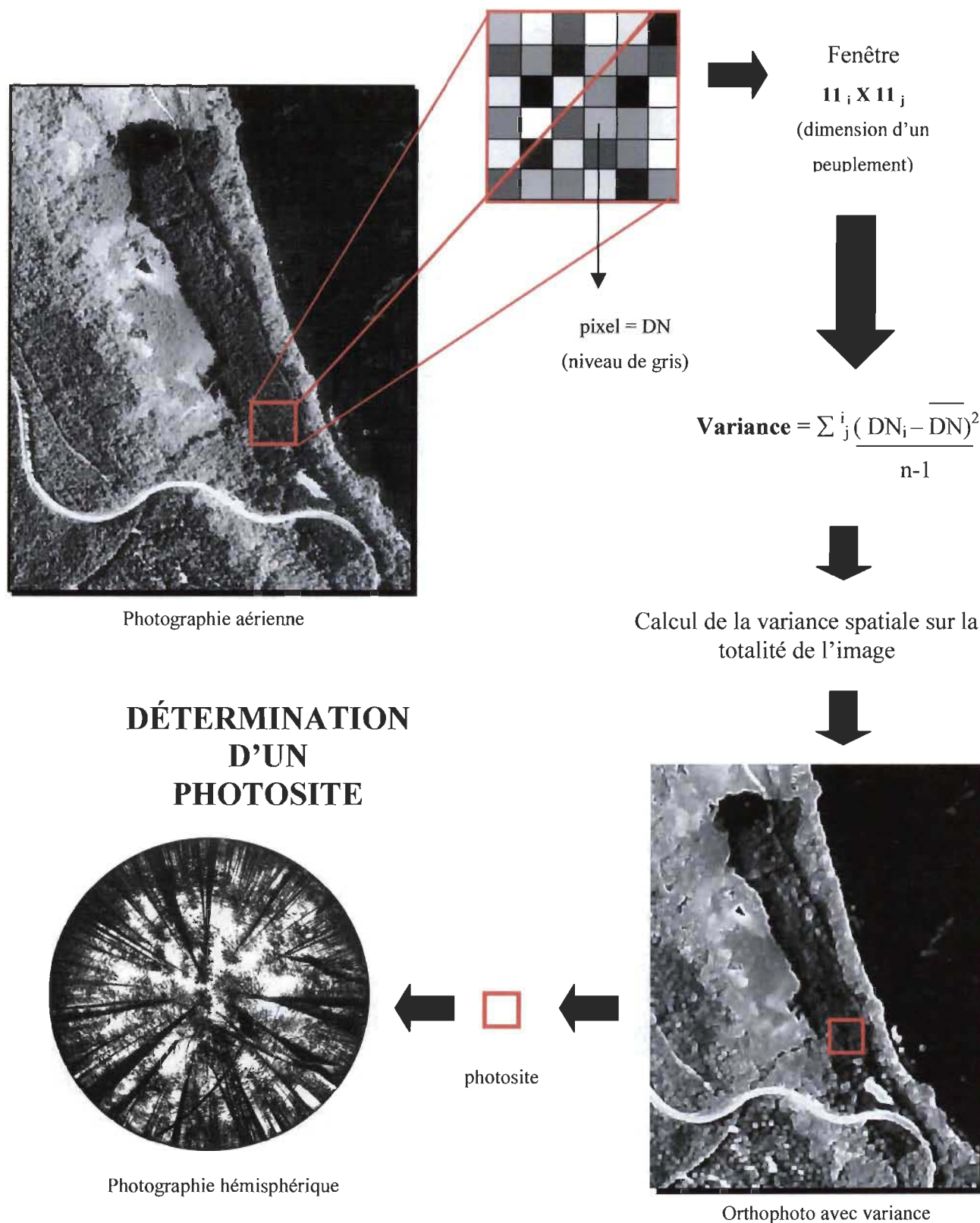


FIGURE 3.4- Schéma représentant la détermination d'un photosite à l'aide de la variance, où DN correspond aux valeurs de niveaux de gris composant la photographie aérienne.

3.2.3- Prise de données sur le terrain ; utilisation et traitement des photographies hémisphériques.

Les sites de prise de photographies hémisphériques ont été déterminés avec précision à l'aide d'un appareil GPS, de ruban de repérage, d'un toposfil et d'une boussole. Les photographies ont été prises avec une lentille hémisphérique Minolta 7.5 mm F4 MD montée sur une caméra manuelle de marque Minolta. Le tout était installé sur un trépied où la caméra était orientée vers le nord avec correction pour la déclinaison magnétique. La projection de la lentille est de type équidistant avec un angle de champ 180° (\varnothing 23 mm). La projection équidistante divise une grille hémisphérique en 18 secteurs zénithaux et 24 secteurs azimutaux (Figure 3.5a). Dans l'analyse de la photographie hémisphérique, le premier secteur zénithal et les trois derniers secteurs azimutaux ont été éliminés en raison du manque de précision pour classifier certains pixels dans la grille (Meyer, 1998). Les photos ont été prises avec un film en noir et blanc T-max 100 ISO de Kodak. L'ouverture du diaphragme était f11, aucun filtre n'a été utilisé. Le temps d'ouverture de l'obturateur utilisé était de 1/125 s et dans quelques cas 1/250 s, ce qui a permis de fixer les légers mouvements du feuillage (Walter, 2001). Les photos ont été prises en août, septembre et octobre 1998-1999.

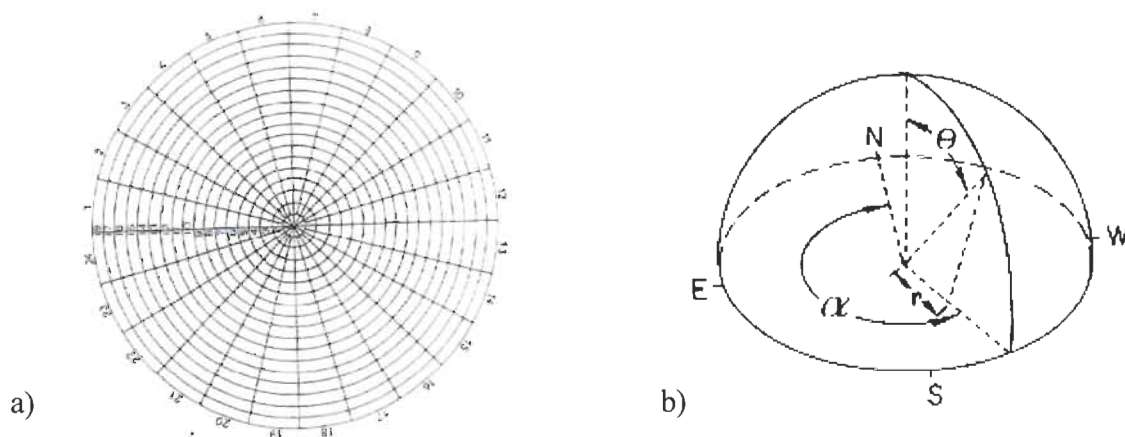


FIGURE 3.5- a) représentation de la projection équidistante, en b) représentation de l'hémisphère dans un plan en trois dimensions, où α représente l'angle azimutal et θ représente l'angle zénithal (Walter, 2002)

Le principe de la photographie hémisphérique consistait à prendre une photographie à l'intérieur d'un peuplement, en pointant la lentille vers le ciel. Les différents photosites ont été localisés spatialement sur les orthophotos. Un ciel couvert était un temps idéal pour la réalisation des photographies. La photographie hémisphérique permet de visualiser une image circulaire qui représente un hémisphère dans un plan en trois dimensions (Figure 3.5b). Plusieurs photographies ont été prises pour le même photosite, ce qui offrait la possibilité de sélectionner les meilleures photographies. Advenant le cas où plusieurs photographies hémisphériques étaient disponibles pour le même photosite, une moyenne des valeurs de LAI a été retenue pour le photosite. La sélection des photographies a été basée sur la qualité du positif, soit la meilleure différenciation ciel et végétation, la définition du pourtour de la photographie et si possible l'absence de «hotspot» communément appelé taches de soleil. Les négatifs ont été numérisés avec 5 différentes résolutions, permettant de faire un choix en fonction de la précision recherchée et de la capacité du logiciel employé.

Des corrections ont dû être apportées aux photographies numérisées. Quelques photos ont été retouchées afin d'éliminer la présence de taches de soleil surexposant la végétation voilant une partie de l'information recherchée. Les taches de soleil sont provoquées par le rayonnement solaire qui pénètre à travers le peuplement et qui vient illuminer la végétation. La végétation illuminée se confond alors avec la partie ciel. La correction pour éliminer les taches de soleil permet de rehausser la végétation. Un logiciel de traitements de photographies a permis d'effectuer la correction. On applique un seuil lorsque les corrections ont été pratiquées sur l'image. La détermination du seuil a été faite minutieusement pour bien différencier la partie ciel ou trouées de la partie végétation. L'image a été sauvegardée et importée soit dans un logiciel ou encore dans un programme pour estimer une valeur de LAI.

3.3- ANALYSE DES DONNÉES DE TERRAIN ; ESTIMATION DU LAI.

3.3.1-Calcul du LAI à partir du logiciel WINPHOT.

Il existe plusieurs logiciels et programmes traitant les photographies hémisphériques et permettant d'obtenir des valeurs de LAI (Frazer *et al.*, 1997 ; Walter, 2002). Dans cette étude

le LAI a été estimé de deux façons différentes : à l'aide du logiciel WINPHOT et du programme CIMES (décrit plus loin). Le logiciel utilisé dans cette étude a été WINPHOT version 5.0 de Borland Pascal (ter Steege, 1997). Outre le calcul de l'indice foliaire, ce logiciel permet de calculer le pourcentage d'ouverture de la canopée, le PPFD (Photosynthetically Photon Flux Density), la lumière diffuse et directe sur des surfaces horizontales et inclinées, la taille des trouées, l'angle foliaire moyen, le rapport de réflectance du rouge sur l'infrarouge, etc. (ter Steege, 1997).

La valeur de LAI, estimée en utilisant WINPHOT, a été obtenue à partir de deux méthodes différentes, soit celle de Welles et Norman (1991) utilisant le «LI-2000 Plant Canopy Analyser» ou la méthode de Norman et Campbell (1989) calculant le LAI selon une distribution angulaire foliaire ellipsoïde (ter Steege, 1997). Ces deux méthodes ont permis d'obtenir une valeur de LAI effectif considérant une distribution aléatoire du feuillage. La méthode de Welles et Norman utilise l'équation suivante soit;

$$LAI = 2 * \sum_{z=7}^{z=68} [-\ln(T_z) * W_z / S_z]$$

Où z correspond à l'angle de vue (7, 23, 38, 53, 68 degrés), T_z est l'ouverture relative de la canopée, W_z est le poids à considérer pour la correction de surface et S_z est la correction pour la longueur du rayonnement de parcours réciproque ($1/\cos \theta$) (ter Steege, 1997).

3.3.2- Calcul du LAI à partir de CIMES.

CIMES constitue un regroupement de plusieurs programmes permettant d'analyser la voûte forestière (Walter, 2002). LAISLP est l'un de ces programmes, s'exécutant à partir de MS-DOS. LAISLP permet d'estimer une valeur de LAI à partir d'un fichier de fraction de trouées. Ce fichier est obtenu avec un programme que l'on doit préalablement utiliser, soit le GFA (provenant également de CIMES). Le programme GFA utilise des photographies numérisées et permet d'extraire des informations sous la forme de deux fichiers de données. Un des fichiers est la fraction de trouées, qui est utilisé par LAISLP et le second est la dimension des trouées, qui sera utilisé ultérieurement pour le calcul du facteur de contagion.

LAISLP permet d'estimer l'ouverture relative de la voûte, la fraction de ciel visible sous le couvert et sur l'ensemble du site, le couvert angulaire et l'indice foliaire effectif (Walter, 2002). Il offre aussi la possibilité de tenir compte de l'effet de pente lors du calcul de ces paramètres. Étant donné que la pente de l'ensemble des différents sites d'étude ne dépasse pas les 15°, il n'est pas approprié dans notre étude de tenir compte de la pente (Walter, 2002).

LAISLP utilise les données de fraction de trouées qui sont inversées selon un modèle de transfert radiatif (loi de Beer-Lambert), par ajustement à une fonction d'extinction exponentielle (distribution des fréquences de trouées selon le modèle de Poisson) (Walter, 2002). Ce modèle se présente comme suit ;

$$P_0(\theta, \varphi) = \exp(-G(\theta, \alpha) * L_p(\theta) * \Omega_e(\theta) / \cos\theta)$$

Où $P_0(\theta, \varphi)$ est la fraction de trouées dans la direction (θ, φ) , $G(\theta, \alpha)$ représente la projection moyenne d'une unité de feuillage d'inclinaison α , dispersé de façon aléatoire suivant l'azimut et projeté au hasard sur un plan perpendiculaire à la direction θ . L_p correspond à l'indice végétal et Ω_e est un facteur d'agrégation du feuillage dépendant tous deux de θ puis finalement $S = 1/\cos\theta$ est la longueur de pénétration d'un rayon lumineux au travers de la canopée dans la direction (θ, φ) . Une valeur constante de 0.5 est attribuée à $G(\theta, \alpha)$, représentant une distribution sphérique des éléments composant la canopée (Walter, 2002). De plus, la dispersion du feuillage est considérée comme aléatoire, une valeur de 1 est donnée à Ω_e . Le produit de $L_p(\theta) * \Omega_e(\theta)$ représente le L_e , soit l'indice foliaire effectif. On doit donc calculer quelle est la valeur du facteur d'agrégation (Ω) afin d'obtenir un LAI tenant compte du phénomène de contagion au niveau de la canopée.

3.3.3- Calcul de la contagion foliaire.

Le LAI obtenu est un LAI effectif considérant une distribution aléatoire du feuillage. On a dû ajuster la valeur du LAIe puisque le regroupement des structures végétales a sous-estimé la valeur réelle de l'indice foliaire. Ce regroupement considère les aiguilles et les autres éléments de la canopée comme étant un seul élément. Ce regroupement se retrouve à

plusieurs niveaux à l'intérieur de la canopée. Cette étude considère la contagion au niveau de la canopée. Un indice de contagion (Ω_e) ou coefficient de ségrégation (C_p) a été employé pour contrer le phénomène de regroupement et améliorer la valeur de LAI. Normalement, une valeur de 1 est attribuée à une canopée présentant un feuillage dispersé aléatoirement, ce qui est inexact chez les conifères. Lorsqu'il y a agrégation des éléments du couvert, la valeur du facteur de contagion devient inférieure à 1. Il existe plusieurs façons de mesurer le degré de contagion afin d'obtenir un facteur de contagion. Le programme CLUMP est aussi un des programme de CIMES fonctionnant sur l'interface MS-DOS, qui nécessite une fichier de données obtenus à partir du programme GFA. Le fichier de données nécessaire est celui de la dimension des trouées. Les résultats rapportent des valeurs de facteur de contagion à partir de deux algorithmes soit, l'algorithme de Chen et Cihlar, fournissant le Ω_e (θ) et l'algorithme de Piélou, donnant C_p (θ) (Walter, 2002).

L'algorithme de Chen et Cihlar (1995) est basé sur la distribution des fractions de trouées et la distribution des dimensions de trouées. L'idée de Chen et Cihlar est d'obtenir une fonction de distribution fictive aléatoire des fractions de trouées ordonnées par valeurs décroissantes des dimensions de trouées en éliminant de façon itérative les trouées les plus grandes jusqu'à ce que la différence entre les distributions successives deviennent négligeables. L'équation suivante est utilisée ;

$$\Omega_e = \frac{(1 + \Delta g) * \ln [F_m(0)]}{\ln [F_{mr}(0)]}$$

Où $\Delta g = F_m(0) - F_{mr}(0)$, $F_m(0)$ est la fonction cumulative de distribution des fractions de trouées observées sur une longueur de transect circulaire l_i pour un angle zénithal θ_i donné, et $F_{mr}(0)$ est la fonction cumulative de distribution des fractions de trouées obtenue à la limite, après abandon successif des plus grandes trouées. $F_{mr}(0)$ est la fonction de distribution la plus proche possible d'une distribution de Poisson (pour plus de détails sur l'algorithme, voir Chen et Cihlar (1995b)).

L'algorithme de Piélou utilise aussi l'image seuillée où les pixels noirs représentent la végétation et les pixels blancs les trouées. À la base, Piélou (1962) a suggéré une méthode pour calculer la ségrégation d'une espèce par rapport à une autre en utilisant l'information obtenue par des transects au travers des populations de plantes (Walter, 2002). Par analogie, les séquences de pixels noirs (B) et les séquences de pixels blancs (W) sur un cercle, à un angle zénithal constant sur une photographie hémisphérique, peuvent représenter les transects de terrain. La probabilité de rencontrer des pixels appartenant aux catégories B et W, est \hat{b} et \hat{w} . Une distribution aléatoire des séquences est représentée par $\hat{b} + \hat{w} = 1$. En supposant que les deux catégories soient distribuées aléatoirement, il vient avec une probabilité de 95 % soit ;

$$\hat{b} + \hat{w} = \frac{1}{\overline{m}_w} + \frac{1}{\overline{m}_B} = 1 \pm 1.96 * \sqrt{s^2_B + s^2_w}$$

où \hat{b} et \hat{w} sont les estimations du maximum de vraisemblance des pixels B et W, \overline{m}_b et \overline{m}_w sont les longueurs moyennes de B et W en nombre de pixels, s^2_B et s^2_w sont les variances de B et W par rapport à \hat{b} et \hat{w} . Les équations pour les variances sont les suivantes ;

$$s^2_B = \frac{1}{\overline{n}_w} * \frac{\overline{m}_B - 1}{\overline{m}_B^3} \quad s^2_w = \frac{1}{\overline{n}_b} * \frac{\overline{m}_B - 1}{\overline{m}_B^3}$$

où \overline{n}_b et \overline{n}_w sont les nombres de séquences des pixels B et W. Si $\hat{b} + \hat{w} < 1$, il y a agrégation c'est-à-dire que des séquences se présentent plus longues que ne le laisseraient supposer des mélanges de pixels au hasard (feuillage agrégé si grandes trouées mélangées à de petites trouées). Si $\hat{b} + \hat{w} > 1$, la dispersion est uniforme, c'est-à-dire que les séquences sont tellement mélangées que la longueur de leurs suites tend à être plus courte que prévue. Les valeurs sont déterminées que si les deux catégories sont présentes.

Il est important lors du calcul du LAIe de considérer l'influence de l'angle zénithal. Le programme LAISLP fournit une valeur de LAIe, qui ajustée avec le facteur d'agrégation de Chen et Cihlar, permet d'obtenir une valeur de LAI. Par contre, l'utilisation directe des

valeurs d'agrégation de Piélou pour ajuster le LAIe fournirait souvent des résultats irréalistes. D'après Warren Wilson (1963), il est recommandé d'utiliser une moyenne d'angle zénithal entre 50° et 55° pour la fraction de trouées (P), puisque le coefficient d'extinction de la lumière est virtuellement indépendant de l'orientation foliaire pour cette valeur d'angle zénithal (Walter, 2002). On peut, par exemple, appliquer la formule de Bonhomme selon l'hypothèse d'une distribution aléatoire du feuillage pour obtenir une valeur de LAIe et ensuite appliquer le coefficient de ségrégation de Piélou :

$$\text{LAIe} = -1.12 * \ln(P_{50^\circ-55^\circ}) \rightarrow \text{LAIe} / \Omega_e = \text{LAI}$$

Une valeur de coefficient de ségrégation inférieure à 1 indique une dispersion contagieuse du feuillage. Par contre, si la valeur est égale à 1, la dispersion est alors aléatoire. Les valeurs de LAIe, obtenues de WINPHOT ou de CIMES, sont divisées par les différentes valeurs de contagion foliaire, pour donner un LAI se rapprochant des valeurs représentant la réalité-terrain.

Dans un premier temps, CLUMP a permis d'obtenir des valeurs de facteur de contagion soit, des valeurs d'indices de contagion pour l'algorithme de Chen et Cihlar et des valeurs de coefficients de ségrégation pour l'algorithme de Piélou. Ces valeurs ont été obtenues à partir du fichier de données sur la dimension des trouées, créé par GFA et utilisé par CLUMP. L'algorithme de Chen et Cihlar a été obtenu directement du fichier de résultats de CLUMP (voir la valeur « meanoE » à l'annexe 6). Deuxièmement, le programme CLUMP a permis d'obtenir des valeurs de LAIe, en tenant compte de l'angle zénithal à partir de l'équation de Bonhomme et ce, en utilisant la moyenne des fractions de trouées entre 50° et 55° (voir « gapfrac » à l'annexe 6).

3.4- DESCRIPTION ET TRAITEMENT DES DONNÉES SATELLITES.

3.4.1- Description de l'image satellite.

L'image satellite employée dans cette étude, provient du satellite Landsat 5 utilisant le capteur TM. La coordonnée centrale de l'image est 47°27'51" Nord et 72°31'08" Est. L'image satellite, exempte de nuages, a été captée le 19 août 1995. Une sous-image représentant le Parc national de la Mauricie a été extraite de l'image principale (Figure 3.6). Les bandes spectrales qui ont été utilisées sont le rouge (TM3), le proche-infrarouge (TM4) et le moyen-infrarouge (TM5) avec une résolution spatiale de 30 m. L'image satellite a nécessité quelques ajustements qui ont permis de corriger les valeurs enregistrées, soit les données numériques (DN). Ces DN ont été corrigées spatialement et atmosphériquement. L'image a été géoréférencée à l'aide de photographies aériennes du mois d'août 1996 et de points de contrôle pris sur l'ensemble du terrain avec un GPS. Des fichiers numérisés des lacs et de la route du Parc national de la Mauricie ont aussi été utilisés pour corriger l'image. Une fois la correction géométrique effectuée, un modèle spectral de transferts radiatifs a été utilisé pour réaliser la correction atmosphérique.

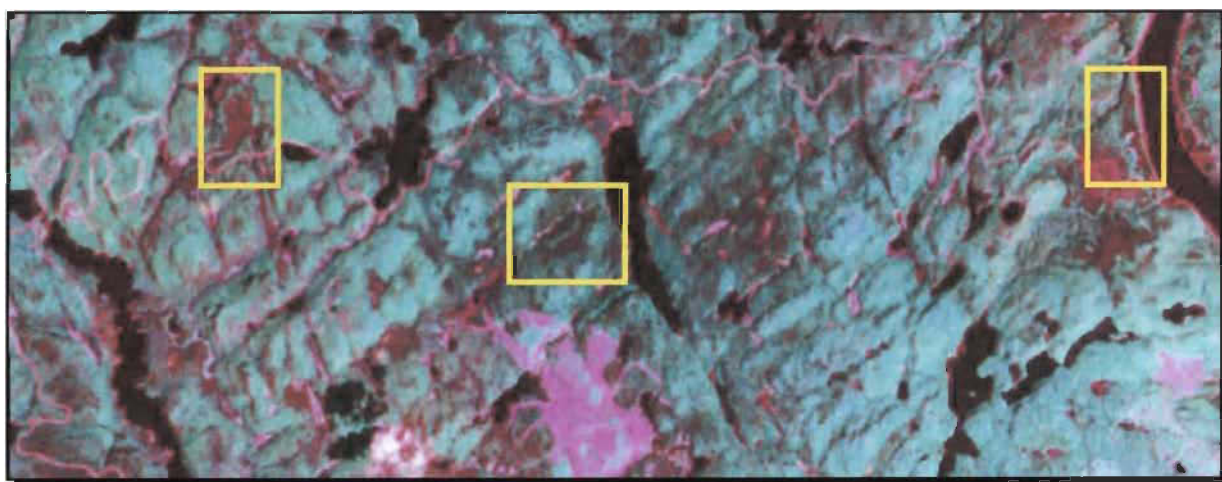


FIGURE 3.6- Image satellite Landsat TM 1995 rehaussée avec 3 canaux de base (TM3, TM4, TM5), section du Parc national de la Mauricie. Note : les trois secteurs d'étude sont représentés par un encadré.

3.4.2- Correction atmosphérique et extraction du NDVI.

Un modèle spectral de transferts radiatifs a permis de modéliser la radiation solaire incidente et d'obtenir le rayonnement réfléchi qui provient réellement de la cible. Aucune valeur concernant le rayonnement solaire incident arrivant à la cible n'est disponible, ce qui demande une modélisation. Le rayonnement solaire incident est atténué lorsqu'il atteint la surface terrestre et ce en fonction de l'état de l'atmosphère. La réduction du rayonnement est reliée aux différents phénomènes physiques subit par le rayonnement lors de son trajet de la source solaire à son arrivée au capteur (Figure 3.7). Le modèle spectral de transferts radiatifs qui a été utilisé est LOWTRAN 7.0 (Anderson *et al.*, 1995 ; Kneizys *et al.*, 1983)

Le logiciel LOWTRAN fournit des valeurs de rayonnement direct et diffus selon une atmosphère standard qui est fonction de la latitude du secteur d'étude et de l'altitude du site d'étude. LOWTRAN calcule ensuite la transmittance qui représente le rapport entre l'énergie transmise et l'énergie incidente (Bonn et Rochon, 1996). Le rayonnement de parcours ou l'effet de parcours est un autre paramètre calculé, correspondant à ce qui constitue l'atmosphère et qui peut contribuer à augmenter ce qui est reçu au capteur. La transmittance et le rayonnement de parcours sont des paramètres nécessaires pour évaluer ce qui est reçu et enregistré par le capteur.

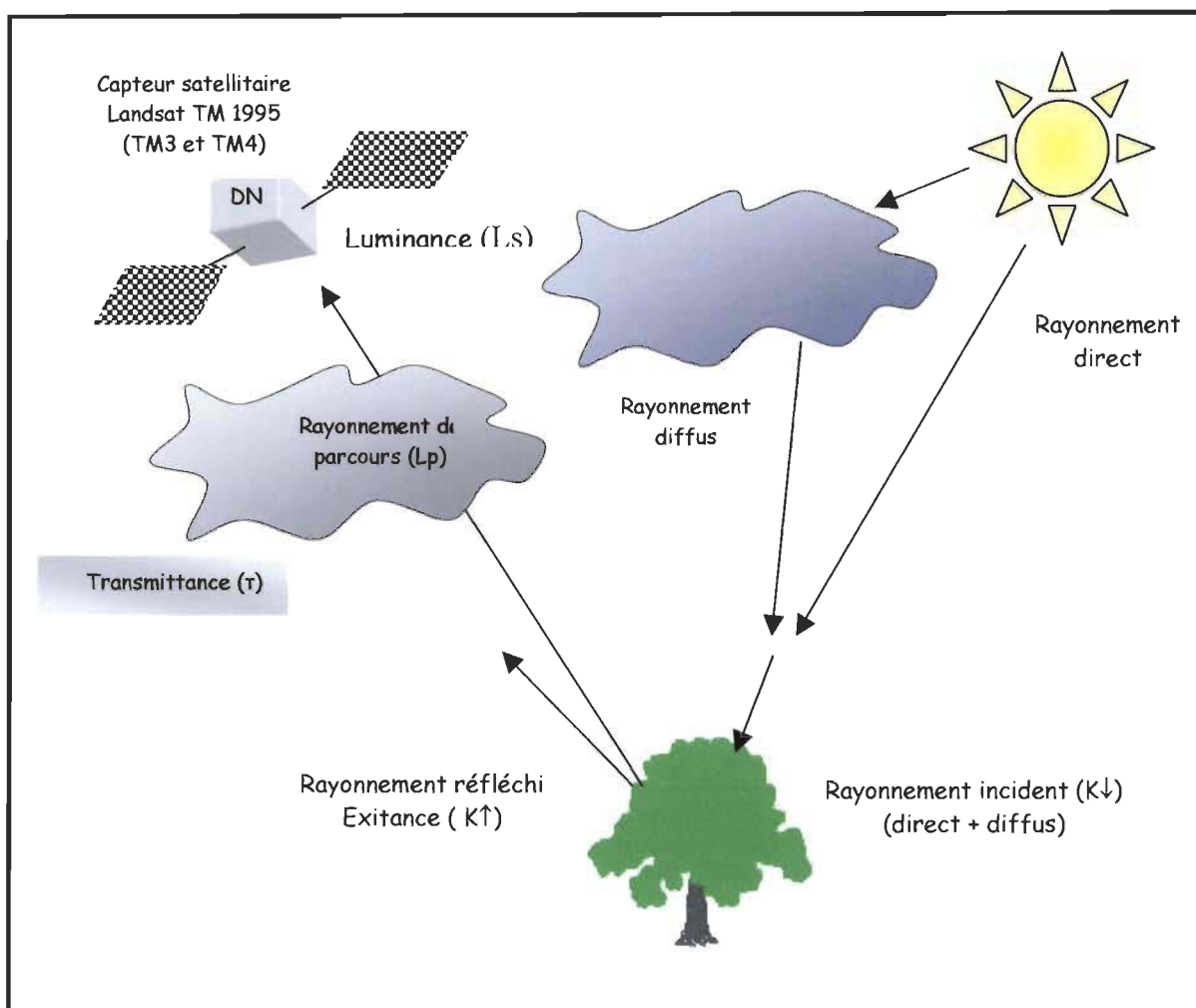


FIGURE 3.7- Schéma représentant le trajet parcouru par le rayonnement solaire avant son arrivée au capteur.

Une fois que tous les paramètres sont connus, on a dû convertir les valeurs de niveaux de gris (DN) acquises à partir de l'image satellite afin d'obtenir la luminance. La luminance est le rayonnement enregistré au capteur. On a dû ajuster les valeurs de luminance pour la diminution de la sensibilité du capteur relié à l'âge des instruments de mesure. La correction a été réalisée en utilisant les gains ajustés selon Thome *et al.* (1997) afin d'obtenir des valeurs de luminance se rapprochant de l'énergie réellement émise par la cible. Les gains ajustés varient selon les différentes bandes du satellite Landsat TM (Tableau 3.1).

TABEAU 3.1- Valeurs des différents gains ajustés et largeur de la bande spectrale des bandes TM3 et TM4, utilisés dans le calcul de la luminance.

	TM3	TM4
Gains ajustés (Thome <i>et al.</i> , 1997) (W/m ² /sr/μm/DN)	1,127	0,949
Largeur spectrale (μm)	0,067	0,128

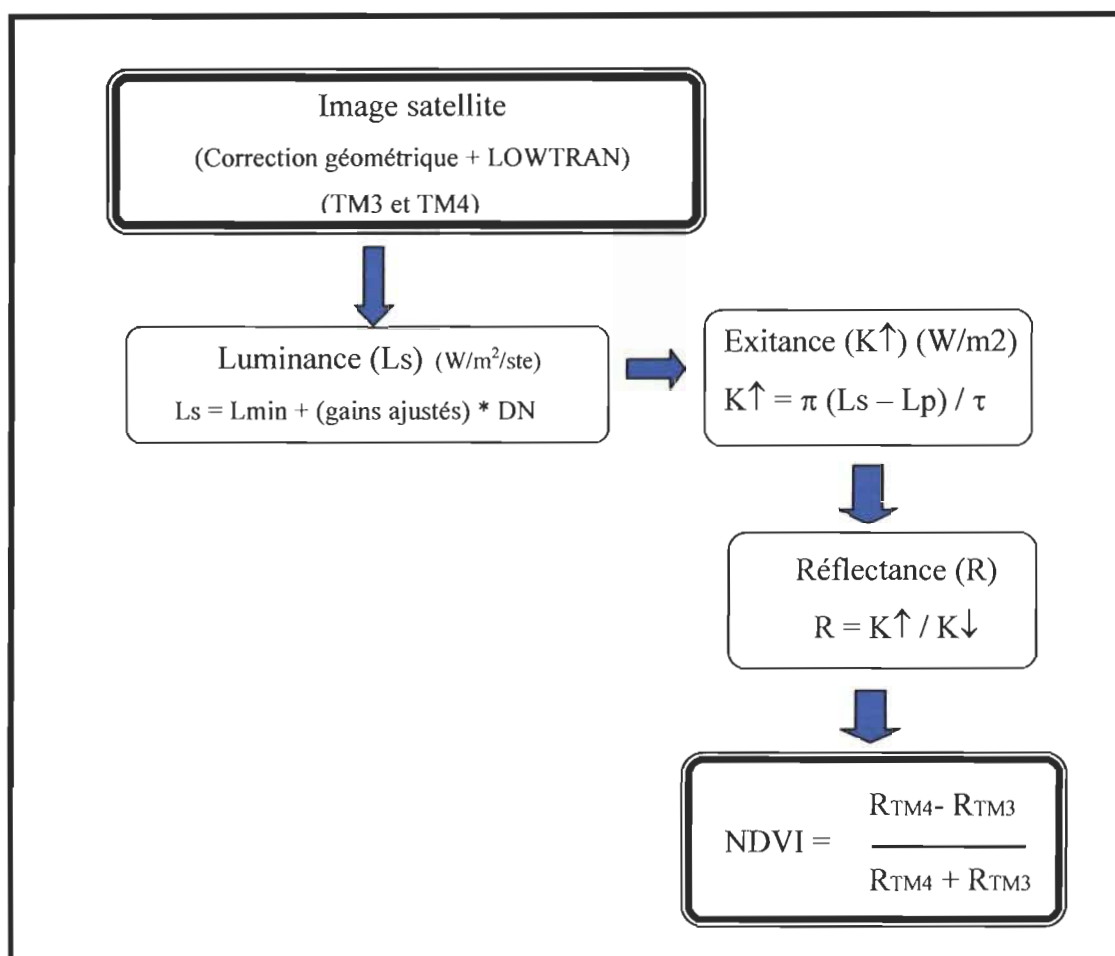


FIGURE 3.8- Schéma représentant les différentes étapes pour obtenir les valeurs de NDVI à partir des valeurs numériques de l'image satellite Landsat TM.

La prochaine étape consistait à obtenir le rayonnement réellement réfléchi par l'objet étudié soit l'exitance. Le calcul de l'exitance a été possible à partir de la luminance, le rayonnement de parcours (L_p) et la transmittance (τ) (Figure 3.8). Connaissant ce qui arrive à la cible (K_{\downarrow})

(rayonnement incident) et ce qui est réfléchi par cette dernière ($K\uparrow$ ou exitance), il a été possible de calculer la réflectance.

Comme mentionné précédemment, le rayonnement incident (rayonnement direct et rayonnement diffus) a été obtenu à partir du modèle spectral de transferts radiatifs. La réflectance étant le rapport entre le rayonnement réfléchi sur le rayonnement incident. La réflectance a été calculée principalement pour les bandes spectrales du rouge (TM3) et du proche infrarouge (TM4). Un rapport des valeurs de réflectance de ces différentes bandes a permis le calcul de divers indices de végétation dont l'indice de végétation à différence normalisée soit, le NDVI (Figure 3.9).

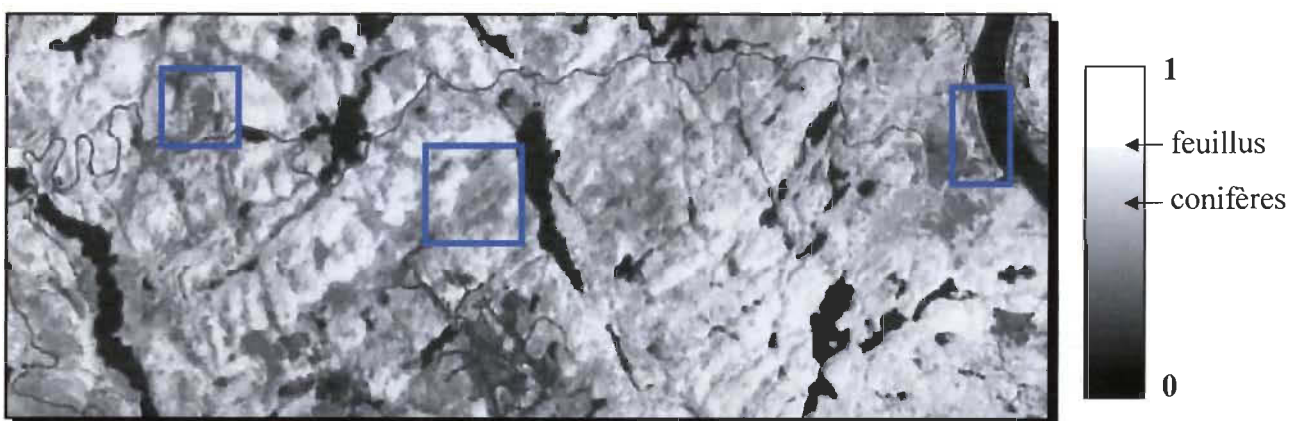


FIGURE 3.9- Image satellite Landsat TM 1995 représentant le NDVI, section du Parc national de la Mauricie avec les sites d'étude.

Il a été possible à partir de l'image satellite d'afficher les différents canaux contenant les valeurs de NDVI pour l'ensemble du secteur d'étude (Figure 3.9). Des valeurs de NDVI ont été extraites de l'image satellite corrigée, à partir des coordonnées géographiques correspondant aux différents photosites. Pour la végétation, les valeurs extraites de l'image varient entre 0 et 1. L'eau et le sol nu présentent une surface très foncée ou noire avec des valeurs près de zéro et même sous la barre du zéro. Ces valeurs sont reliées à l'absence de végétation. Les feuillus démontrent des valeurs de NDVI plus élevées que les conifères.

3.5- INVERSION DU MODÈLE NDVI-LAI ; INTÉGRATION DES VALEURS DE NDVI DE L'IMAGE SATELLITE LANDSAT TM DANS DES MODÈLES THÉORIQUES.

Une autre étape consistait à mettre en relation les valeurs de NDVI extraites précédemment, avec les valeurs de LAI estimées aux différents photosites. La relation observée a été comparée avec des modèles théoriques retrouvés dans la littérature. Il existe plusieurs modèles, différents les uns des autres par leur méthodologie et le capteur utilisé pour obtenir les valeurs de NDVI. Ces modèles ont été développés afin de pouvoir extraire des valeurs de LAI en connaissant le NDVI correspondant à la cible étudiée. On a retrouvé, entre autres, deux modèles qui rencontrent les critères de sélection. Il y a le modèle de Chen (1996a) et un second similaire soit, celui de Chen et Cihlar (1996). Ces modèles ont été créés selon une méthodologie propre à chacune des études. Nous devons donc considérer tous les éléments ayant servi à créer ces modèles NDVI-LAI, afin de respecter leur méthodologie et permettre une comparaison avec nos données.

La relation qui découle des différents modèles théoriques est trop souvent ambiguë. Est-ce que les valeurs de LAI extraites des modèles théoriques correspondent réellement à ce qui est présent sur le terrain? On cherche alors une possibilité d'améliorer la relation NDVI-LAI en utilisant la variance spatiale afin de contrôler le phénomène d'agrégation spatiale sur les valeurs de LAI. L'agrégation spatiale provient du changement d'échelle, lors de l'estimation des valeurs de LAI, associée à une divergence dans la résolution spatiale des éléments ayant servi à extraire le LAI. Pour ce faire, nos valeurs de NDVI, extraites à partir des images satellites Landsat TM (1995), ont été introduites dans les modèles théoriques afin d'obtenir des valeurs de LAI modélisées. On a comparé les valeurs de LAI modélisées avec nos valeurs de LAI *in situ*, obtenues à partir des photographies hémisphériques. On cherche ainsi à savoir quel est l'impact de l'utilisation des valeurs de LAI en conditions contrôlées, soit sur des surfaces homogènes. Une comparaison a été faite avec des valeurs de LAI en conditions non contrôlées soit des surfaces non homogènes, c'est-à-dire sans tenir compte de l'effet d'agrégation associé aux différentes résolutions spatiales.

3.6- ESTIMATION DES VALEURS DE LAI MESURÉES *IN SITU* SUR DES SURFACES NON-HOMOGÈNES.

Une dernière étape à cette section méthodologie a été d'utiliser des surfaces de mesure où l'on ne connaît pas la composition végétale et où les objets qui se retrouvent à l'intérieur de cette surface ne sont pas identifiés initialement. Ces surfaces sont dites hétérogènes. Les surfaces hétérogènes peuvent intégrer, à l'échelle satellitaire, divers objets (sol nu, route, cours d'eau, conifères ou feuillus) qui possèdent diverses signatures spectrales dans les longueurs d'onde du rouge et du proche infrarouge. Ces surfaces hétérogènes ont été sélectionnées aléatoirement sur l'image satellite, en fonction de l'accessibilité et de la position géographique, de façon à ne pas se retrouver directement au centre d'un plan d'eau. Lors de la campagne d'échantillonnage, une observation du milieu environnant et de la végétation présente a permis une brève description des sites hétérogènes. Les sites hétérogènes se retrouvent en périphérie ou à proximité du Lac Édouard. Au total, 23 sites hétérogènes ont été sélectionnés aléatoirement. Les sites hétérogènes sont également des photosites où il y aura une estimation du LAI à partir de photographies hémisphériques.

L'utilisation de la variance spatiale n'est pas requise puisqu'il est question de surfaces hétérogènes. À partir des coordonnées géographiques de ces sites, des valeurs de NDVI ont été extraites et mises en relation avec les valeurs de LAI *in situ*, estimées des photographies hémisphériques. Les valeurs de NDVI ont aussi été intégrées dans les modèles théoriques afin d'obtenir des valeurs de LAI modélisées provenant des sites hétérogènes. Une comparaison des valeurs de LAI *in situ* de sites hétérogènes avec les valeurs de LAI *in situ* de sites homogènes a été effectuée pour approuver l'utilisation de la variance spatiale dans cette étude.

De plus, l'utilisation de la variance spatiale calculée sur des surfaces de 101 pixels par 100 pixels a permis de confirmer si les photosites sélectionnés comme étant homogènes étaient homogènes sur toute la surface et non simplement sur la fenêtre de 11 pixels par 11 pixels, utilisée pour le calcul du LAI. Une comparaison a été effectuée entre les valeurs de variance des sites homogènes et celles des sites hétérogènes.

3.7 ANALYSE STATISTIQUE

Des tests statistiques ont été réalisés afin de valider les résultats obtenus lors de la méthodologie. Le test statistique qui a été majoritairement employé tout au long de cette étude est une analyse de variance (ANOVA) qui ne compare pas les variances mais qui permet d'expliquer si les sources de variation retrouvées au niveau des données sont attribuables aux groupes de données (Sherrer, 1984).

Une première analyse a été faite afin de valider si les différents photosites sélectionnés sont homogènes. Cette analyse a permis de comparer les valeurs de variance spatiale obtenues de l'orthophoto et de confirmer que les peuplements sont bien identiques. Ensuite, il a été important d'identifier si les valeurs de LAI estimées selon les méthodes WINPHOT, LAISLP et CLUMP, diffèrent selon la méthode d'estimation. S'il existe des différences, on doit faire une seconde analyse afin d'identifier si les différences sont imputables à l'indice de contagion permettant la correction pour le regroupement au niveau de la canopée ou à la méthode d'estimation utilisée.

Une série d'analyse de variance a été effectuée, pour les sites homogènes, avec les valeurs de NDVI corrigées selon deux modèles atmosphériques (LOWTRAN et MODTRAN) et ajustés avec différents gains (NLAPS, Thome et Teillet). Ces tests statistiques permettent de voir s'il y a des différences entre les modèles atmosphériques et les gains ajustés.

L'utilisation de deux modèles théoriques NDVI-LAI a permis d'obtenir des valeurs de LAI modélisées pour les sites homogènes, une analyse de variance a pu être effectuée afin d'observer s'il existe une différence entre les valeurs de LAI modélisées des deux modèles (Chen et Chen et Cihlar) et les valeurs mesurées.

Dans un deuxième temps, des analyses statistiques ont pu être effectuée avec les valeurs de LAIe et LAI en utilisant les valeurs des photosites hétérogènes. Ces analyses doivent permettre d'observer, tout comme les photosites homogènes, s'il existe des différences entre les 3 méthodes servant à estimer le LAIe et l'un ou l'autre des indices de contagion. Par la

suite, une analyse de variance a été effectuée entre les valeurs de LAI modélisées (Chen et Chen et Cihlar) et les valeurs mesurées des sites hétérogènes afin de voir s'il existe une différence significative entre ces séries de valeurs. La comparaison entre les valeurs mesurées et modélisées a été effectuée avec les valeurs de LAI provenant de LAISLP des sites hétérogènes pour être conforme avec ce qui a été fait dans la littérature.

Dans un dernier temps, une analyse de variance a été réalisée en utilisant les valeurs de variance spatiale des surfaces de 101 pixels par 101 pixels afin de valider que les photosites homogènes sont homogènes sur la totalité de la surface et une autre analyse a permis de dire qu'il existe une différence entre les valeurs de variance spatiale des sites homogènes et hétérogènes.

CHAPITRE IV :

RÉSULTATS

SECTION IV : RÉSULTATS

4.1- DÉTERMINATION DES DIFFÉRENTS PHOTOSITES.

Au total, 24 photosites ont été déterminés à partir de la variance spatiale, soit 8 photosites pour chacun des secteurs d'étude. Les photosites du secteur Mékinac et du lac Édouard démontrent une faible étendue des valeurs de variance spatiale. Les photosites du Lac Allais démontrent des valeurs de variance spatiale supérieures aux photosites des secteurs Mékinac et lac Édouard, en raison d'une définition différente du grain de la photographie aérienne infrarouge fausse couleur. Une test statistique (ANOVA) à partir des valeurs de variance spatiale des secteurs Mékinac et Lac Édouard a été utilisé pour permettre de regrouper les photosites de ces deux secteurs. Les résultats de l'analyse permettent de dire que les photosites ne sont pas significativement différents ($p > 0.644$) et peuvent alors être groupés et considérés comme des photosites homogènes. Le secteur du Lac Allais a été omis de l'analyse statistique en raison du biais apporté par le grain de la photographie aux valeurs de variance spatiale. Les valeurs de variance spatiale demeurent dans un même intervalle de données, considérant l'ensemble des valeurs de variance obtenues à partir de l'orthophoto. Les sites sélectionnés de ce secteur ont alors été retenus comme étant des photosites homogènes (Tableau 4.1).

TABLEAU 4.1- Valeurs de variance spatiale calculées à chacun des photosites pour les différents secteurs de l'étude.

Secteur « Mékinac »	Variance	Secteur « Lac Édouard »	Variance	Secteur « Lac Allais »	Variance
1	469,51	1	491,73	1	2041,44
2	537,22	2	796,65	2	3380,15
3	596,76	3	767,67	3	1956,87
4	586,79	4	728,23	4	2508,14
5	538,12	5	440,07	5	2575,92
6	1010,39	6	877,66	6	3888,24
7	769,93	7	454,18	7	1837,51
8	882,52	8	1290,32	8	2482,38
Moy	673,91	Moy	730,81	Moy	2583,83
Min	469,51	Min	454,18	Min	1837,51
Max	1010,39	Max	1290,32	Max	3380,15

4.2- ESTIMATION DU LAI

4.2.1- Logiciel WINPHOT

Le logiciel WINPHOT a utilisé l'algorithme de Welles et Norman (1991) pour obtenir des valeurs de LAI effectif. Les valeurs de LAI effectif varient entre 1,49 et 2,53 m^2/m^2 pour les peuplements de conifères (Tableau 4.2). La figure 4.1 montre une photographie hémisphérique prise à un des photosite. Un exemple de résultats obtenus avec le logiciel WINPHOT est présenté en annexe (Annexe 2).



FIGURE 4.1- Photographie hémisphérique d'épinettes blanches (*Picea glauca* Moench.) prise en septembre 1998.

On doit corriger les valeurs de LAI effectif afin de tenir compte de la distribution non aléatoire du feuillage des conifères et éviter de sous-estimer le LAI. La correction a été réalisée en appliquant un facteur de contagion aux valeurs de LAI effectif, soit l'algorithme de Piélou. Les valeurs de coefficient de ségrégation de Piélou, associées à l'algorithme de Piélou, ont été obtenues à partir de CLUMP et seront détaillées plus loin à la section 4.2.3. Les valeurs de coefficient de ségrégation de Piélou et les valeurs de LAI sont présentées dans la tableau 4.2. Les valeurs de LAI varient entre 2,80 et 7,56 m^2/m^2 .

TABLEAU 4.2- Valeurs de LAI effectif, de coefficient de ségrégation de Piélou et valeurs de LAI, obtenues avec le logiciel WINPHOT.

Site	LAie	Coefficient ségrégation de Piélou	LAI
1	1,49	0,5322	2,80
2	2,08	0,4323	4,81
3	2,01	0,4608	4,36
4	1,74	0,4258	4,09
5	2,21	0,4118	5,37
6	2,53	0,5726	4,42
7	2,41	0,4067	5,93
8	2,05	0,3961	5,18
9	1,82	0,3056	5,96
10	2,27	0,3001	7,56
11	1,74	0,3454	5,04
12	1,87	0,3180	5,88
13	2,20	0,3836	5,74
14	2,00	0,3584	5,58
15	2,01	0,3896	5,16
16	1,88	0,4465	4,21
17	2,10	0,3563	5,89
18	2,09	0,3594	5,82
19	2,44	0,4319	5,65
20	2,31	0,4681	4,93
21	1,99	0,3116	6,39
22	2,09	0,4061	5,15
23	2,17	0,4321	5,02
24	2,04	0,3050	6,69
Moy	2,06	0,3981	5,32
Min	1,49	0,3001	2,80
Max	2,53	0,5726	7,56

4.2.2- Programme LAISLP

Les valeurs de LAI qui ont été estimées à partir de LAISLP sont aussi des valeurs de LAI effectif. En annexe 3 et 4, il est possible de voir un exemple de fichier de données sur la fraction de trouées, obtenu à partir du programme GFA et utilisé par LAISLP, pour permettre de calculer des valeurs de LAie. Les valeurs de LAI effectif varient entre 1,71 et 2,75 m²/m² (Tableau 4.3). Ces valeurs de LAie sont corrigées avec l'algorithme de Chen et Cihlar afin

d'obtenir des valeurs de LAI. Les indices de contagion obtenus, à partir de l'algorithme de Chen et Cihlar, présentent une valeur moyenne de 0,7888 (± 0.0320) (Tableau 4.3).

TABLEAU 4.3- Valeurs de LAI effectif obtenues avec le programme LAISLP, indice de contagion de Chen et Cihlar et valeurs de LAI.

Site	LAie	Indice Chen et Cihlar	LAI
1	1,77	0,7709	2,30
2	2,38	0,8121	2,93
3	2,47	0,7792	3,17
4	1,71	0,7647	2,23
5	2,10	0,7783	2,70
6	2,19	0,8560	2,56
7	2,39	0,8075	2,96
8	2,19	0,8199	2,67
9	2,16	0,7496	2,88
10	2,10	0,7498	2,80
11	1,89	0,7743	2,44
12	2,01	0,7765	2,59
13	2,36	0,7921	2,98
14	2,75	0,8322	3,30
15	2,29	0,7984	2,86
16	2,12	0,7761	2,74
17	2,26	0,7808	2,90
18	2,71	0,7978	3,40
19	2,63	0,8592	3,06
20	2,29	0,7990	2,86
21	1,97	0,7579	2,59
22	2,26	0,7982	3,09
23	1,90	0,7762	2,46
24	1,88	0,7252	2,59
Moy	2,20	0,7888	2,79
Min	1,71	0,7252	2,23
Max	2,75	0,8592	3,40

En annexe 5, on peut voir un exemple de fichier de dimension de trouées permettant d'obtenir des valeurs d'algorithme de Chen et Cihlar. Un exemple de fichier de résultats sur la contagion foliaire est présenté en annexe 6. La correction avec l'algorithme de Chen et Cihlar a permis d'obtenir des valeurs de LAI variant entre 2,23 et 3,40 m²/m² (Tableau 4.3).

4.2.3- Programme CLUMP

La moyenne des fractions de trouées a été calculée pour l'ensemble des sites, les valeurs varient de 0,11 à 0,29 avec une valeur moyenne de 0,19 (± 0.04) (Tableau 4.4). Les valeurs de LAIe, calculées à partir de l'équation de Bonhomme, s'étalent entre 1,42 et 2,49 m²/m² et une correction avec le coefficient de ségrégation de Piélou a permis d'obtenir des valeurs de LAI entre 3,27 et 6,32 m²/m². L'algorithme de Piélou (voir « Ipw » à l'annexe 6) a demandé également le calcul d'une moyenne des valeurs situées entre 50° et 55° et les valeurs obtenues présentent une moyenne de 0,3981 (± 0.0700) (Tableau 4.2).

TABLEAU 4.4- Valeurs de LAI effectif et de fraction de trouées, obtenues avec le programme CLUMP, de même que les valeurs de LAI.

Site	LAIe (CLUMP-gapfrac)	Fraction de trouées	LAI (CLUMP-gapfrac)
1	1,74	0,2120	3,27
2	1,95	0,1771	4,50
3	1,72	0,253	3,73
4	1,54	0,2576	3,61
5	2,09	0,1553	5,08
6	2,49	0,1119	4,35
7	1,99	0,1690	4,90
8	2,11	0,1518	5,33
9	1,42	0,2820	4,64
10	1,90	0,1837	6,32
11	1,73	0,2154	5,01
12	1,75	0,2091	5,52
13	2,07	0,1581	5,39
14	1,70	0,2197	4,74
15	1,93	0,1782	4,96
16	2,01	0,1660	4,51
17	2,06	0,1594	5,77
18	1,81	0,1984	5,04
19	2,25	0,1337	5,22
20	2,31	0,1288	4,95
21	1,64	0,2303	5,28
22	2,01	0,1669	4,94
23	2,09	0,1545	4,84
24	1,66	0,2273	5,44
Moy	1,92	0,1875	4,89
Min	1,42	0,1119	3,27
Max	2,49	0,2820	6,32

Ainsi, il a été possible de représenter graphiquement les différentes valeurs de LAIe, obtenues à partir des trois méthodes (WINPHOT, CLUMP et LAISLP) pour l'ensemble des photosites (Figure 4.2). Une comparaison des 3 méthodes utilisées pour estimer le LAIe a permis de dire que les valeurs de LAIe estimées à partir de LAISLP sont significativement plus élevées que les valeurs obtenues de CLUMP ($p < 0.001$). Une seconde comparaison a permis en retour de dire que les valeurs de LAIe provenant de LAISLP et WINPHOT sont semblables. De même, les valeurs de LAIe provenant de CLUMP et WINPHOT ne sont pas significativement différentes ($p > 0.05$).

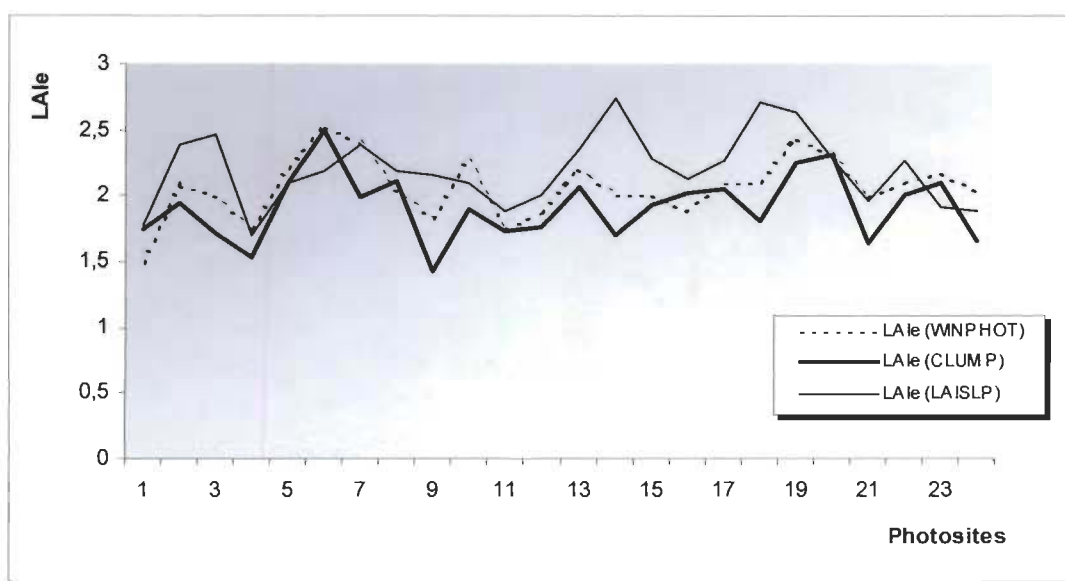


FIGURE 4.2- Représentation graphique des différentes valeurs de LAIe mesurées pour l'ensemble des photosites et obtenues selon trois méthodes (WINPHOT, CLUMP et LAISLP).

Une autre analyse statistique a permis de voir si une fois les valeurs de LAIe corrigées pour le phénomène de contagion foliaire, les différences persistent toujours entre les valeurs de LAI obtenues de LAISLP et celles obtenues de CLUMP. Un test d'ANOVA a été effectué sur les valeurs de LAI. Les valeurs logarithmiques de LAI ont été utilisées afin de respecter la normalité des données et l'homogénéité des variances. Le test a démontré que les valeurs de LAI de LAISLP sont significativement inférieures aux valeurs de LAI obtenues de WINPHOT et CLUMP ($p < 0.001$). De plus, aucune différence significative n'a été observée entre les valeurs de LAI estimées avec WINPHOT et CLUMP.

4.3- VALEURS DE NDVI DES DIFFÉRENTS SITES.

L'image satellite sélectionnée a été géoréférencée puis une correction atmosphérique (LOWTRAN) et géométrique a été appliquée. Les valeurs de NDVI ont été extraites à partir des coordonnées géographiques des photosites. Les valeurs de NDVI obtenues s'étalent de 0,4762 à 0,6310 avec une moyenne de 0,5639 (± 0.035), ce qui représente une légère variation des valeurs de NDVI entre les divers photosites (Figure 4.3).

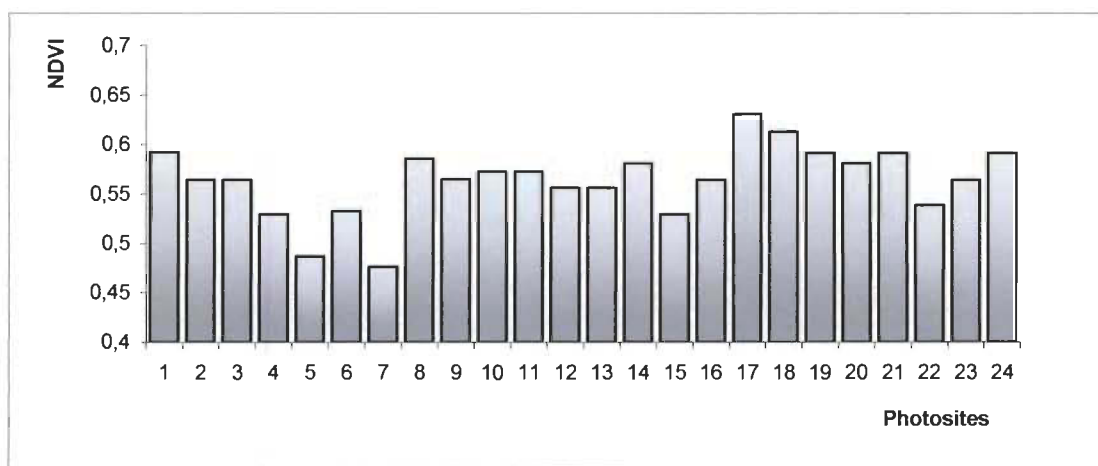


FIGURE 4.3- Histogramme représentant les valeurs de NDVI, obtenues à partir de l'image Landsat TM 1995, pour l'ensemble des photosites étudiés.

Les valeurs de NDVI ont été corrigées atmosphériquement et ajustés avec les gains de Thome *et al.* (1997). Il est possible d'utiliser d'autres modèles atmosphériques afin d'observer les valeurs de NDVI obtenues. MODTRAN a été utilisé comme autre modèle atmosphérique. Une comparaison a été faite, pour les sites homogènes, entre les valeurs de NDVI corrigées avec LOWTRAN et MODTRAN (utilisant les mêmes gains ajustés). Les résultats démontrent que les valeurs de NDVI obtenues avec LOWTRAN ne sont pas significativement différents ($p = 0,905$) des valeurs corrigées avec MODTRAN. La figure 4.4 montre les valeurs de NDVI corrigées avec LOWTRAN et MODTRAN et ajustés avec deux gains différents soit, NLAPS (National Landsat Archive Production System) et Thome. L'utilisation de différents modèles atmosphériques et de plusieurs gains ajustés permet de voir les variations pouvant affectées les valeurs de NDVI.

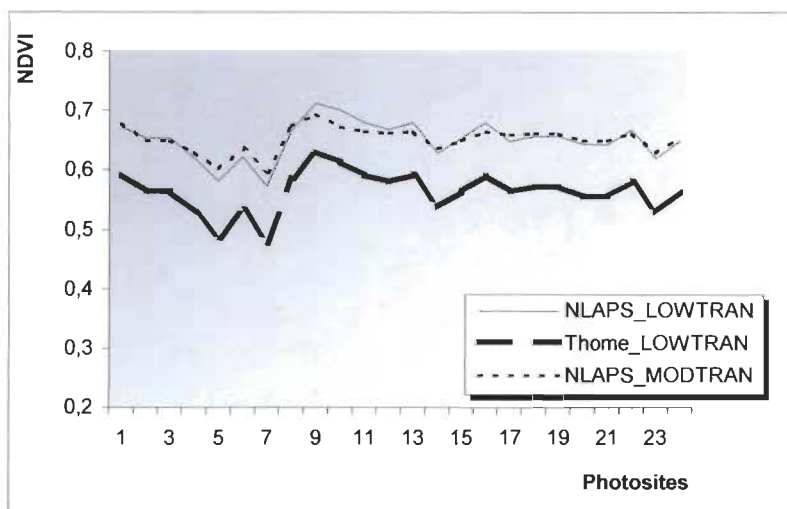


FIGURE 4.4- Graphique montrant les valeurs de NDVI en fonction de deux modèles atmosphériques (LOWTRAN et MODTRAN).

Suite aux résultats statistiques obtenus précédemment, il a été possible d'utiliser différents gains ajustés et de voir l'impact de ces gains ajustés sur les valeurs de NDVI (Figure 4.5). Les gains ajustés qui ont été employés sont NLAPS, les gains ajustés de Thome *et al.* (1997) et finalement les gains ajustés de Teillet *et al.* (2001). À partir des gains ajustés de Teillet *et al.* (2001), deux quantités différentes de vapeur d'eau dans l'atmosphère, soit 1 mm ou 20 mm d'eau peuvent être sélectionnés selon le type de milieu échantillonné (voir annexe 10 pour les valeurs de NDVI). Les résultats démontrent que les valeurs de NDVI ajustés avec les différents gains sont tous différents significativement les uns par rapport aux autres ($p < 0.05$).

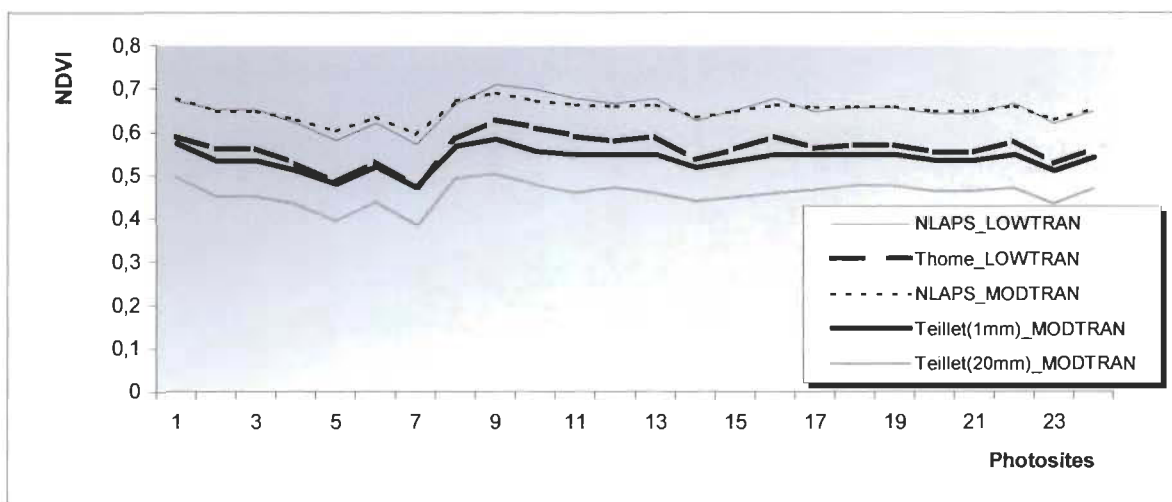


FIGURE 4.5- Graphique représentant les différents gains ajustés sur les valeurs de NDVI. Utilisation de deux modèles atmosphériques (LOWTRAN et MODTRAN).

4.4- UTILISATION DU MODÈLE NDVI-LAI.

Parmi les modèles théoriques provenant de la littérature, il ressort deux modèles potentiels soit, celui de Chen (1996a) et celui Chen et Cihlar (1996) permettant une meilleure analyse de nos données. Ces modèles sont sélectionnés puisqu'ils étudient l'épinette noire (*Picea mariana* Mill.) et puis l'indice de végétation utilisé est le NDVI, extrait à partir de Landsat TM. De plus, les valeurs de LAI, comme dans notre étude, sont obtenues à partir d'une méthode optique indirecte utilisant l'interception de la radiation solaire par la végétation. Ces modèles proposent une fonction soit linéaire ou non-linéaire pour relier les valeurs de NDVI et de LAI. Les équations représentant une fonction linéaire sont les suivantes ; celle de Chen (1996a) où le $NDVI = 0,63 + 0,027L$ et la seconde, relativement similaire, est celle de Chen et Cihlar (1996) où le $NDVI = 0,635 + 0,032L$. Les équations représentant une fonction non-linéaire sont ; celle de Chen (1996a) où le $NDVI = 0,635 L^{0,107}$ et la relation de Chen et Cihlar (1996) où le $NDVI = 0,6539 L^{0,1057}$. Dans les deux cas, L représente le LAI, corrigé pour éliminer l'hypothèse d'une distribution aléatoire du feuillage au niveau de la canopée.

Les valeurs de NDVI utilisées dans ces deux modèles ont été corrigées atmosphériquement avec un modèle de transfert radiatif, soit le modèle 5S. De même, les valeurs de NDVI ont été ajustées à partir des gains NLAPS, fournis avec l'image satellite Landsat Thematic Mapper. Pour permettre une comparaison avec notre étude, on a également utilisé les gains ajustés NLAPS pour nos valeurs de NDVI. La figure 4.4 présente les valeurs de NDVI obtenues avec les gains ajustés NLAPS et celles des gains ajustés selon Thome *et al.* (1997). Les deux séries de données utilisent LOWTRAN 7.0, comme modèle atmosphérique. On peut noter que les valeurs de NDVI obtenues avec les gains ajustés à partir de NLAPS sont supérieures aux valeurs de NDVI provenant de Thome *et al.* (1997). Les valeurs de gains ajustés de NLAPS étant de 0,806 pour TM3 et 0,814 pour TM4.

Les valeurs de NDVI (NLAPS) de l'image satellite ont été intégrées dans les deux modèles théoriques non-linéaires choisis auparavant afin d'obtenir des valeurs de LAI modélisées (Tableau 4.5). On utilise la fonction non-linéaire puisque les valeurs de NDVI augmentent plus lentement que les valeurs de LAI (Chen, 1996a). Le tableau 4.5 permet d'observer que les valeurs de LAI modélisées sont inférieures aux valeurs de LAI mesurées. Après avoir

vérifié la normalité des données, une analyse de variance a permis de dire que les valeurs de LAI mesurées sont significativement différentes des valeurs de LAI modélisées ($p < 0.05$). De plus, les valeurs de LAI modélisées de Chen et Chen et Cihlar sont significativement différentes mais tout près de ne pas l'être ($p < 0.046$). Un échantillon plus grand aurait peut-être permis de dire que les valeurs sont semblables ou encore de confirmer la différence observée. Les valeurs de LAI mesurées, utilisées pour la comparaison, sont les valeurs de LAISLP, corrigées avec l'algorithme de Chen et Cihlar permettant une comparaison plus juste avec les valeurs modélisées.

TABLEAU 4.5- Tableau représentant les données de LAI modélisées, obtenues à partir des valeurs de NDVI de l'image satellite (1995) et valeurs de LAI mesurées (LAISLP_Chen et Cihlar).

Site	LAI modélisé Chen	LAI modélisé Chen et Cihlar	LAI mesuré (LAISLP_Chen et Cihlar)
1	1,69	1,29	2,30
2	1,30	0,99	2,93
3	1,30	0,99	3,17
4	0,81	0,61	2,23
5	0,44	0,33	2,70
6	0,82	0,62	2,56
7	0,38	0,29	2,96
8	1,57	1,19	2,67
9	2,90	2,22	2,88
10	2,50	1,92	2,80
11	1,88	1,43	2,44
12	1,59	1,21	2,59
13	1,86	1,43	2,98
14	0,91	0,69	3,30
15	1,30	0,99	2,86
16	1,88	1,43	2,74
17	1,22	0,92	2,90
18	1,38	1,05	3,40
19	1,38	1,05	3,06
20	1,13	0,86	2,86
21	1,13	0,86	2,59
22	1,59	1,21	3,09
23	0,81	0,61	2,46
24	1,25	0,95	2,59
Moy	1,38	1,05	2,79
Min	0,38	0,33	2,23
Max	2,90	2,22	3,40

4.5- VALEURS DE NDVI ET VALEURS DE LAI DE SITES HÉTÉROGÈNES.

L'estimation des valeurs de LAI à partir des sites déterminés au hasard a permis de confirmer l'utilité de la variance spatiale dans le contrôle de l'agrégation spatiale. Il y a eu l'utilisation de points où les photographies hémisphériques ont été prises à des coordonnées géographiques sélectionnées aléatoirement. Sur un ensemble de plusieurs points extraits au hasard de l'image satellite, un total de 23 photosites a été retenus mais seulement 11 sites ont pu être utilisés dans l'analyse, en raison de l'accessibilité sur le terrain (Figure 4.6). Ces 11 photosites sont des endroits où la variance spatiale n'a pas été prise en considération (où l'on ne tient pas compte du phénomène d'agrégation spatiale). Les photographies hémisphériques ont été prises géographiquement avec précision. Une seule restriction devait être observée lors de la sélection de ces photosites, la restriction consistait à ne pas se retrouver au milieu d'un plan d'eau ou sur une surface représentée en grande partie par du sol nu, ce qui a été respecté.

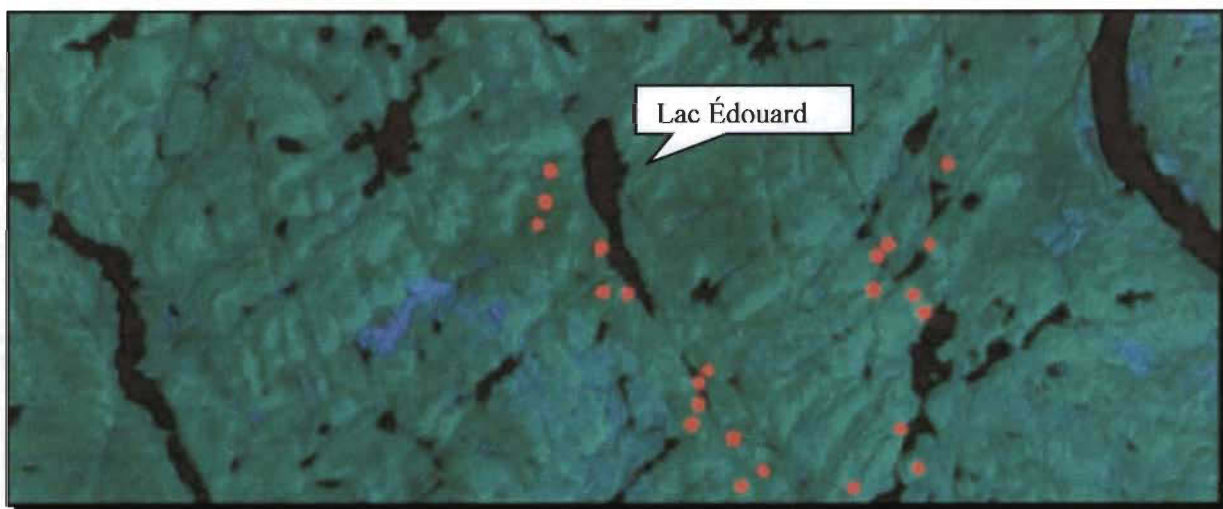


FIGURE 4.6- Image satellite Landsat TM (1995) représentant la localisation des 23 différents sites sélectionnés aléatoirement (points rouges).

Les sites qui ont été sélectionnés aléatoirement se retrouvent dans le secteur du lac Édouard puisque le terrain est accessible par un sentier de randonnée. Les coordonnées géographiques de ces sites ont été obtenues à partir de l'image satellite Landsat TM. Le tableau 4.6 présente une brève description des sites hétérogènes. À partir de LAISLP, les valeurs de LAIe obtenues

varient entre 3,37 et 6,55 m²/m² puis les valeurs de LAI, varient entre 5,37 et 6,95 m²/m² (Tableau 4.6).

TABLEAU 4.6- Tableau descriptif des données et des caractéristiques des photosites hétérogènes.

Site	LAIe (LAISLP)	LAI (LAISLP Chen et Cihlar)	NDVI (1995) NLAPS	Brève description
1	3,55	3,98	0,7573	Végétation dominée par les conifères (<i>Picea mariana</i>), milieu humide avec présence d'un barrage de castor.
2	5,76	6,18	0,7371	Végétation composée majoritairement de feuillus (à plus de 90 %) dont principalement <i>Acer</i> sp.
3	6,18	6,53	0,7895	Végétation composée majoritairement de feuillus (à plus de 75 %), milieu ouvert.
4	6,07	6,44	0,8066	Végétation composée majoritairement de conifères (<i>Picea mariana</i>), présence d'un sous-bois typique de conifères.
5	6,55	6,95	0,8209	Végétation mixte (50 / 50).
6	4,87	5,29	0,7705	Végétation mixte dont <i>Fraxinus</i> sp., <i>Acer</i> sp. et <i>Betula</i> sp.
7	6,23	6,63	0,8025	Végétation composée à 100 % de feuillus (<i>Fagus</i> sp. et <i>Acer</i> sp.), site localisé près d'une baie après un petit pont.
8	4,03	4,17	0,8000	Végétation composée majoritairement de feuillus (à près de 95 %) dont <i>Fagus</i> sp. et <i>Abies balsamea</i> , milieu dense.
9	4,61	5,06	0,7564	Végétation composée majoritairement de feuillus (à près de 95 %), milieu situé en bordure d'un ruisseau.
10	3,37	3,98	0,8025	Végétation dominée par les feuillus dont <i>Betula allegheniensis</i> et <i>Acer</i> sp.
11	3,43	3,89	0,7534	Végétation dominée par les feuillus (à plus de 75 %), milieu en bordure de la route, hauteur du peuplement ≈ 20 m. (peuplement un peu plus élevé que les autres sites).
Moy	4,97	5,37	0,7815	
Min	3,37	3,89	0,7371	
Max	6,55	6,95	0,8209	

En ce qui concerne les valeurs de NDVI, la même méthodologie a été respectée pour les sites hétérogènes. Les valeurs de NDVI des sites hétérogènes s'étalent de 0,7371 et 0,8209 avec une valeur moyenne 0,7815 (± 0.0275) (Tableau 4.6). Les valeurs de NDVI sont corrigées avec les gains ajustés NLAPS pour respecter la méthodologie des modèles théoriques de

Chen (1996a) et Chen et Cihlar (1996). On peut observer à la figure 4.7, que les valeurs de NDVI des sites hétérogènes sont supérieures aux valeurs de NDVI des sites homogènes. Aucune différence significative n'a été observée entre les valeurs de NDVI corrigées avec LOWTRAN et MODTRAN ($p = 0,627$) pour les sites hétérogènes. Selon les analyses statistiques, les gains ajustés sont tous différents significativement, à l'exception des gains ajustés de Thome et Teillet (1 mm) qui sont semblables ($p > 0.05$).

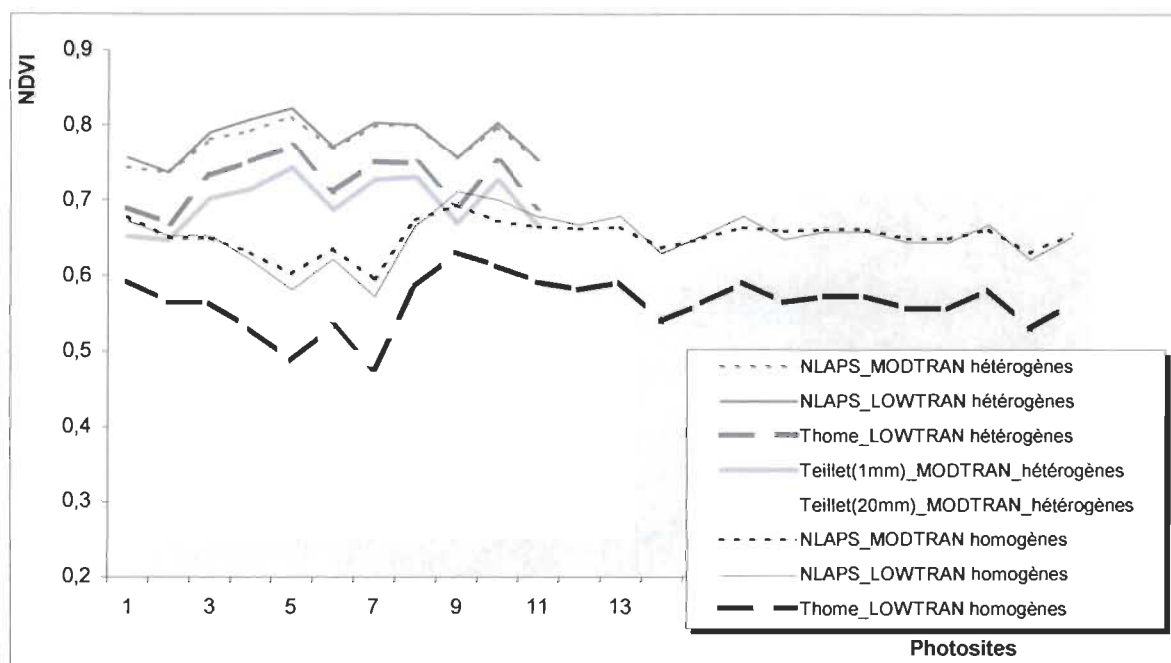


FIGURE 4.7- Graphique représentant les valeurs de NDVI des sites hétérogènes et homogènes. Utilisation de deux modèles atmosphériques (MODTRAN et LOWTRAN) et différents gains ajustés.

Du côté des valeurs de LAI, l'annexe 7 présente les valeurs de fraction de trouées, le coefficient de ségrégation de Piélou, de même que les valeurs de LAI_e et LAI, obtenues avec WINPHOT et CLUMP pour les sites hétérogènes. Une représentation graphique des valeurs de LAI, estimées selon les 3 méthodes, est disponible à la figure 4.8. Une comparaison entre les 3 méthodes utilisées pour estimer le LAI_e des sites hétérogènes permet de dire que les valeurs de LAI_e estimées à partir de LAISLP sont plus faibles que les valeurs obtenues de CLUMP et WINPHOT. Un test statistique permet en retour de dire que les valeurs de LAI_e provenant de LAISLP et WINPHOT sont semblables, de même que les valeurs de LAI_e de CLUMP et WINPHOT ($p > 0.05$). Comme pour les sites homogènes, une ANOVA a été calculée pour les valeurs de LAI afin de voir l'impact du phénomène de contagion sur les valeurs de LAI. Les

valeurs de LAI de CLUMP et LAISLP puis les valeurs de CLUMP et WINPHOT sont semblables. Par contre, on observe une différence significative ($p > 0.05$) entre les valeurs de LAI de WINPHOT et LAISLP.

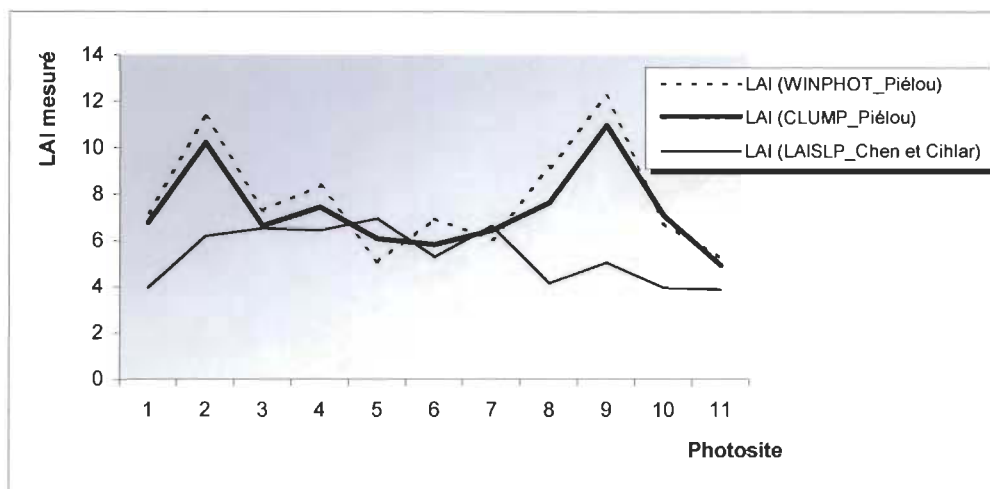


FIGURE 4.8- Graphique représentant les valeurs de LAI obtenues selon les divers programmes (WINPHOT, LAISLP et CLUMP) en fonction des photosites hétérogènes.

La figure 4.9 présente les valeurs de NDVI et de LAI mesurées sur des surfaces hétérogènes, auxquelles sont ajoutées les valeurs de NDVI et LAI des sites homogènes. On remarque que les valeurs de LAI mesurées des sites hétérogènes sont légèrement supérieures aux valeurs de LAI mesurées des sites homogènes. La même situation se retrouve du côté des valeurs de NDVI des sites hétérogènes qui sont aussi supérieures aux valeurs de NDVI des sites homogènes où l'on considère l'agrégation spatiale à partir d'une même variance.

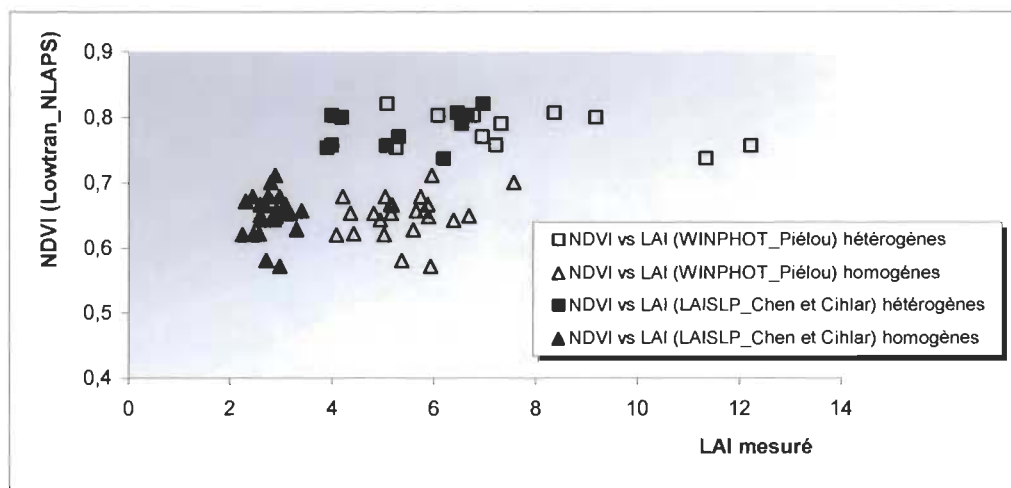


FIGURE 4.9- Graphique représentant les valeurs de NDVI (1995) en fonction des valeurs de LAI mesurées (WINPHOT et LAISLP) pour les sites homogènes et hétérogènes.

Les valeurs de NDVI des sites hétérogènes ont aussi été intégrées dans les modèles théoriques NDVI-LAI sélectionnés afin d'obtenir des valeurs de LAI modélisées (Tableau 4.7).

TABLEAU 4.7- Tableau représentant les données de LAI obtenues à partir des valeurs de NDVI (1995) intégrées aux modèles non-linéaire de Chen (1996) et Chen et Cihlar (1996) et valeurs de LAI mesurés (LAISLP_Chén et Cihlar) pour les sites hétérogènes.

Sites hétérogènes	LAI modélisé Chen	LAI modélisé Chen et Cihlar	LAI mesuré (LAISLP_Chén et Cihlar)
1	5,19	4,01	3,98
2	4,03	3,11	6,18
3	7,65	5,95	6,53
4	9,35	7,28	6,44
5	11,02	8,60	6,95
6	6,10	4,72	5,29
7	8,92	6,94	6,63
8	8,66	6,74	4,17
9	5,13	3,97	5,06
10	8,92	6,94	3,98
11	4,94	3,82	3,89
Moy	7,26	5,64	5,37
Min	4,03	3,11	3,89
Max	11,02	8,60	6,95

Les valeurs de LAI modélisées avec les valeurs mesurées LAISLP sont représentées graphiquement à la figure 4.10. On remarque que les valeurs de LAI modélisées hétérogènes présentent un étalement des valeurs similaires à celui des valeurs de LAI mesurées des sites hétérogènes. Selon le test a posteriori de Tukey, il n'existe aucune différence significative entre les valeurs de LAI modélisées pour le modèle de Chen et celui de Chen et Cihlar puis aucune différence significative entre les valeurs de LAI modélisées et les valeurs mesurées selon LAISLP. Le test statistique a été réalisé seulement avec les valeurs de LAISLP pour conserver une similitude avec ce qui a été fait dans la littérature.

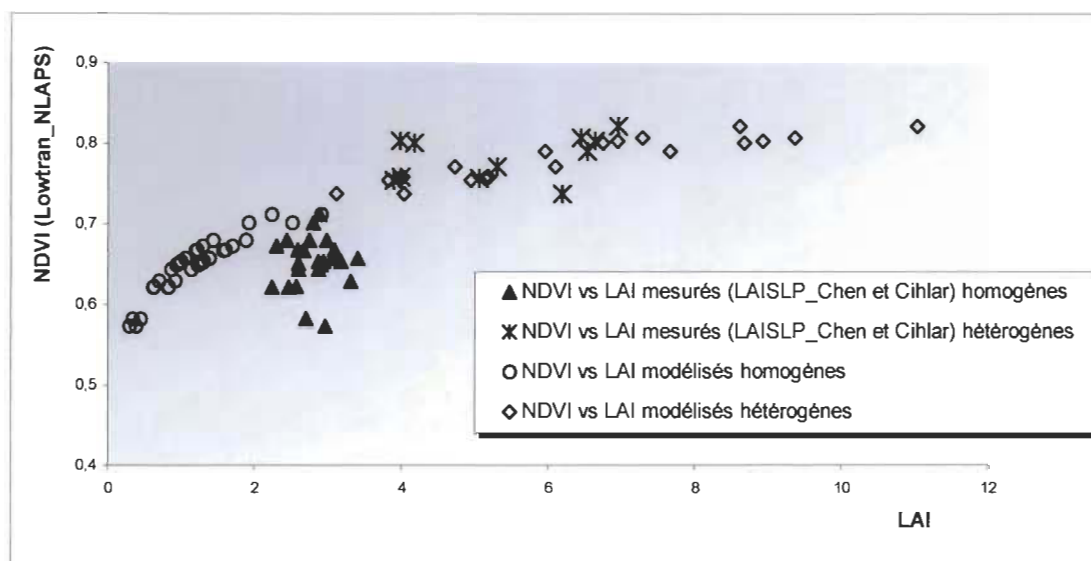


FIGURE 4.10- Graphique montrant les valeurs de NDVI en fonction des valeurs de LAI mesurées (LAISLP_Chen et Cihlar) et modélisées (modèle de Chen et modèle de Chen et Cihlar), pour les sites hétérogènes et homogènes.

Il est possible de calculer la différence entre les valeurs de LAI mesurées (LAISLP_Chen et Cihlar) par rapport aux valeurs de LAI modélisées avec les modèles non-linéaires de Chen (1996a) et Chen et Cihlar (1996). La moyenne des différences entre les valeurs de LAI mesurées et modélisées, de même que l'écart type, pour les sites homogènes et hétérogènes sont représentés dans le tableau suivant (Tableau 4.8). Le tableau 4.8 confirme ce qui est observé à la figure 4.10 et permet de voir que la plus faible moyenne des différences entre les valeurs de LAI modélisées et mesurées est observée avec les valeurs de LAI modélisées pour les sites hétérogènes. Ce sont les valeurs de LAI modélisées à partir du modèle de Chen et Cihlar qui présentent la moins grande différence. De plus, il est possible d'observer avec l'utilisation du modèle non-linéaire, que les valeurs d'écart type sont plus élevées d'au moins le double pour les sites hétérogènes par rapport aux sites homogènes. Un même calcul a été réalisé avec les valeurs de LAI mesurées avec WINPHOT et CLUMP en comparaison avec les valeurs de LAI modélisées (Annexe 8).

TABEAU 4.8- Tableau de la moyenne des différences et écart type entre les valeurs de LAI mesurées (LAISLP_Chen et Cihlar) et les valeurs de LAI modélisées des sites homogènes et hétérogènes.

Modèles non-linéaires	moyenne	écart type
LAI (Chen) homogènes	1,42	± 0.6
LAI (Chen et Cihlar) homogènes	1,75	± 0.5
LAI (Chen) hétérogènes	1,89	± 2.1
LAI (Chen et Cihlar) hétérogènes	0,27	± 1,7

4.6- VALIDATION DE L'UTILISATION DE LA VARIANCE SPATIALE COMME OUTIL DE MESURE DE L'HOMOGÉNÉITÉ DES SURFACES D'ÉTUDE.

La figure 4.11 permet d'observer deux surfaces sensiblement de même dimension, localisées à proximité du secteur Mékinac, dont la composition végétale est similaire. Les deux surfaces sélectionnées sur la figure 4.11 représentent des peuplements de conifères (peuplements d'épinettes) avec une strate arbustive très faible et un tapis végétal composé majoritairement de mousse.

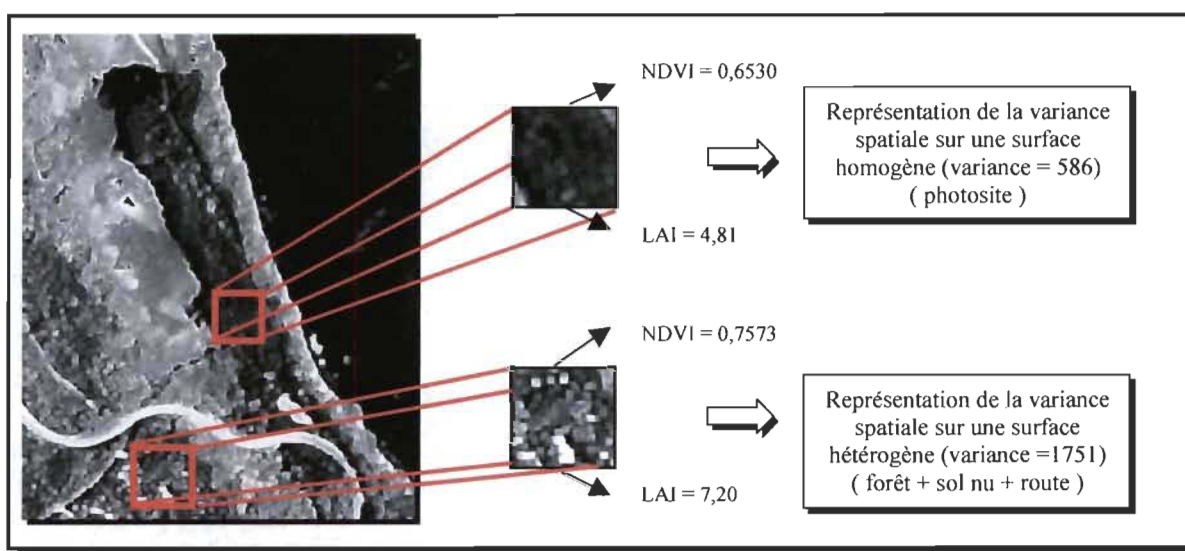


FIGURE 4.11- Orthophoto de la variance ; représentation de la variance spatiale sur une surface homogène et une surface hétérogène.

Dans un cas, nous nous retrouvons avec des valeurs de variance spatiale qui varient faiblement sur toute la surface, ce qui constitue une surface homogène. Cette surface homogène devient un photosite. Tandis que l'autre surface est considérée hétérogène avec la présence de divers objets, autre que de la végétation, qui influencent les valeurs de variance. Ce secteur hétérogène correspond, sur le terrain, à un site de camping établi à l'intérieur du peuplement de conifères.

Afin de vérifier si le phénomène d'agrégation spatiale a un impact sur l'estimation du LAI, la variance spatiale a aussi été calculée sur des fenêtres d'analyse de 101 pixels par 101 pixels aux endroits correspondant aux photosites. Le choix de cette taille de fenêtre d'analyse se rapporte à l'erreur possible de localisation pouvant affecter les valeurs de NDVI extraites. De plus, la validation de l'utilisation de la variance spatiale sur une fenêtre de 101 pixels par 101 pixels permet de vérifier si les sites homogènes sélectionnés au départ sont bel et bien homogènes sur l'ensemble de la surface de 100 m par 100 m et permet de faire une comparaison avec les photosites hétérogènes.

La variance spatiale a été calculée pour les photosites homogènes et hétérogènes. On peut remarquer que la variance spatiale des photosites hétérogènes est très variable comparativement aux sites homogènes (Figure 4.12). La série de photosites homogènes qui possède des valeurs de variances plus élevées correspond à la photographie aérienne qui affiche une coloration infrarouge fausse couleur différente des deux autres secteurs. La présence, dans la partie de gauche du graphique, de valeurs plus élevées de variance est attribuable aux extrémités du premier secteur étudié. Deux photosites provenant du secteur Mékinac présentent des valeurs élevées par rapport aux autres photosites du même secteur.

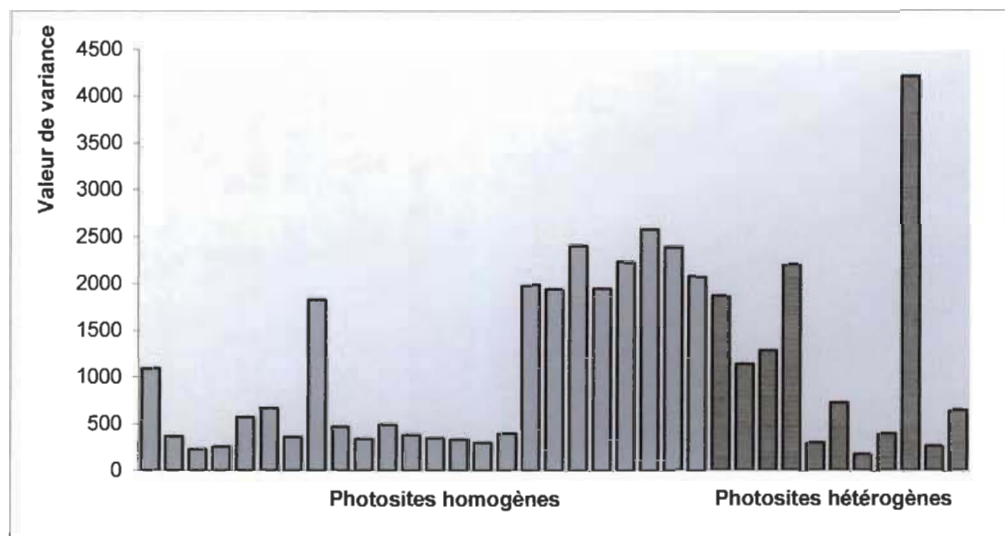


FIGURE 4.12- *Histogramme montrant les valeurs de variance spatiale pour les sites homogènes et les sites hétérogènes.*

D'après une évaluation de la distribution de la normalité calculée à partir des valeurs de variance spatiale, les sites homogènes présentent une distribution normale donc ils sont homogènes. Du côté des sites hétérogènes, il y a un non-respect de la normalité signifiant qu'ils sont non-homogènes les uns par rapport aux autres.

CHAPITRE V :

DISCUSSION

SECTION V : DISCUSSION.

La forêt boréale constitue un milieu hétérogène par la présence, notamment, de nombreux plans d'eau. L'étude de parcelles de forêts boréales par imagerie satellitaire demande une attention particulière car toutes les surfaces non végétales influencent les valeurs d'indice de végétation à différence normalisée (NDVI). L'étude de la végétation à partir de mesures sur le terrain est plus laborieuse mais permet de sélectionner plus spécifiquement les objets étudiés. Cette étude tente de répondre à certaines interrogations concernant les changements d'échelle soit, la présence du phénomène d'agrégation spatiale lors de l'utilisation de la télédétection dans l'extraction de certains paramètres environnementaux comme l'indice foliaire (LAI). L'utilisation de la variance spatiale à partir d'orthophotos apporte une solution au problème d'agrégation spatiale qui est associé au niveau d'hétérogénéité de la surface, affectant les valeurs de LAI extrait d'images satellites.

Ainsi, lorsque l'on veut estimer une valeur de LAI à partir d'algorithmes basés sur les données satellites, il est important de s'interroger sur la façon dont l'algorithme a été conçu c'est-à-dire si l'agrégation spatiale des couverts est un élément essentiel de sa conception. On doit accorder une place importante au phénomène d'agrégation spatiale dans le cas du développement de modèles NDVI-LAI. Par exemple, ceci est constaté lors de l'estimation du LAI où, si une surface est composée d'autres éléments, le LAI sera toujours plus faible puisque des informations, autres que végétales, y sont incluses. L'agrégation spatiale fait référence à la distribution et à l'arrangement spatial de la surface étudiée. L'organisation spatiale et les différentes entités composant l'aire d'étude, contribuant à la valeur du NDVI, demandent la connaissance de la distribution spatiale de la végétation qui est un problème complexe surtout si la forêt est hétérogène (Aman *et al.*, 1992). Dans notre étude, nous avons intégré nos valeurs de NDVI dans des modèles NDVI-LAI connus, pour analyser les valeurs de LAI modélisées résultants par rapport aux valeurs de LAI mesurées, provenant de surfaces homogènes. L'utilisation de l'homogénéité des surfaces d'étude nous assure un contrôle des objets retrouvés sur la surface à l'étude. On constate, entre autres, une variation d'informations suite aux changements d'échelles lors de l'estimation du LAI à partir des modèles puisque les valeurs de LAI modélisées obtenues sont inférieures, dans notre cas, aux valeurs de LAI

mesurées pour les sites homogènes. La variation d'informations peut être reliée au phénomène d'agrégation spatiale. Ainsi, il est important de voir à la validité du LAI extrait, en s'assurant que la surface de mesure est composée d'un même objet. La variance spatiale permet ainsi de vérifier et de s'assurer du niveau d'hétérogénéité de la surface étudiée.

Selon un des premier objectif, la variance spatiale est employée sur des orthophotos, afin de confirmer l'homogénéité des différentes surfaces d'étude composant les photosites. La surface d'étude doit être connue c'est-à-dire que la composition de la surface d'étude doit prendre une place importante dans l'analyse des données. Le tableau 4.1 permet d'observer que les valeurs de variance ne diffèrent pas significativement entre les différents secteurs. Des valeurs de variance semblables à l'intérieur des surfaces d'étude signifient que cette surface est composée d'un même objet. La variance spatiale est calculée à partir des valeurs de niveau de gris composant la surface d'étude et permet du même coup l'analyse spatiale des objets présents sur cette surface.

5.1- TRAITEMENT DES PHOTOGRAPHIES HÉMISPHERIQUES.

L'utilisation de méthodes optiques indirectes, telles que la photographie hémisphérique, permet une estimation des valeurs de LAI précise et moins laborieuse que l'utilisation des méthodes allométriques ou directes (Chen, 1996b). La photographie hémisphérique est la méthode préconisée pour estimer le LAI car elle fournit des résultats précis, dans un court délai avec un minimum d'efforts. Cette méthode optique indirecte mesure la fraction de trouées soit la portion de ciel visible par l'objectif, ce qui correspond à la fraction de trouées. La fraction de trouées est l'inverse du LAI et le LAI est obtenu, entre autres, à partir de la méthode de Welles et Norman (1991). La méthode de Welles et Norman est celle employée pour estimer le LAI à partir du LAI-2000, utilisée dans plusieurs études (Chen, 1996a ; Chen, 1996b ; Chen et Cihlar, 1995 ; Chen et Cihlar, 1996). WINPHOT et CIMES sont les deux programmes et logiciels utilisés, permettant d'estimer des valeurs de LAI, à partir de photographies hémisphériques numérisées. L'utilisation de deux programmes, au lieu d'un seul, est justifié par le fait que dans la littérature les valeurs de LAI sont calculées à partir de différentes méthodes et algorithmes semblables à ceux retrouvés dans les programmes

employés. Par exemple, WINPHOT est une nouvelle version du programme HÉMIPHOT, souvent rencontré dans les différentes études et utilisant la méthode de Welles et Norman (1991), tout comme d'autres chercheurs, pour estimer le LAI. De son côté, le programme CIMES a été récemment développé donc encore très peu rencontré dans la littérature. Sa particularité vient du fait qu'il permet d'estimer des valeurs de LAI, tout en offrant la possibilité d'ajuster les valeurs de LAI avec un facteur de contagion. Ces programmes permettent de faire une comparaison entre la méthodologie employée pour obtenir nos valeurs de LAI, et ce qui est réalisé dans la littérature.

D'après nos résultats, une différence apparaît au niveau des valeurs de LAI obtenues, lorsque l'on applique la correction pour la contagion du feuillage selon les deux algorithmes employés. Dans notre étude, l'algorithme de Piélou semble plus approprié pour ajuster les valeurs de LAI que l'algorithme de Chen et Cihlar. Selon les tests statistiques, l'algorithme de Chen et Cihlar sous-estime les valeurs de LAI, par rapport aux deux autres séries de valeurs obtenues de LAI, ajustées avec l'algorithme de Piélou. Cette sous-estimation peut être provoquée par les valeurs qui sont obtenues par itérations, ce qui exige une série de calculs successifs demandant une approximation des valeurs à chaque fois. Des valeurs de LAI plus faibles (LAISLP), corrigées avec l'algorithme de Chen et Cihlar, peuvent aussi être reliées au fait que la méthode utilisée pour le calcul du facteur de contagion, ne considère pas l'angle zénithal. Pour des valeurs d'angles zénithaux supérieures à 67°, la fraction de trouée visible est faussée en raison de l'angle foliaire qui influence les valeurs de LAI pour ces valeurs d'angles zénithaux (ter Steege, 1997). Dans le cas de l'utilisation de la méthode de Welles et Norman (WINPHOT), de même que les valeurs de LAI obtenues avec l'utilisation de la formule de Bonhomme (CLUMP), tous deux ne diffèrent pas significativement et présentent des valeurs de LAI semblables avec la correction de l'algorithme de Piélou.

Les valeurs de LAI obtenues, suite aux corrections pour la contagion du feuillage, se retrouvent dans l'intervalle des valeurs retrouvées dans la littérature pour les forêts de conifères (Bonan, 1993 ; Spanner *et al.*, 1990). Comme mentionné précédemment dans le chapitre II, il existe des appareils qui sont utilisés pour mesurer directement l'effet de regroupement au niveau de la canopée. TRAC (Tracing Radiation and Architecture of Canopies) est un de ces appareils,

employé dans les études de Chen (1996a) et Chen et Cihlar (1996), permettant la correction pour la distribution non aléatoire du feuillage. Cet appareil est basé sur l'algorithme de Chen et Cihlar et utilisé, entre autres, dans le modèle de Chen (1996a). Ceci explique pourquoi l'algorithme de Chen et Cihlar a été appliqué à nos données afin d'effectuer une meilleure comparaison avec la méthodologie des modèles théoriques.

5.2- UTILISATION ET CORRECTION DES VALEURS DE NDVI ; IMPACT SUR LE MODÈLE NDVI-LAI.

Le NDVI a été sélectionné parmi une gamme d'indices de végétation car il présente une bonne relation avec le LAI (Chen, 1996b). Lors de la sélection de l'aire d'étude et des différents photosites, nous avons fait en sorte que la surface soit homogène, composée majoritairement de peuplements de conifères denses et purs pour minimiser l'impact du sous-bois sur les valeurs de NDVI. De plus, la composition végétale du sous-bois de ce peuplement présente des valeurs de réflectance qui diffèrent peu de celles de l'étage supérieur réduisant l'effet du sous-bois sur les valeurs de NDVI (Cihlar *et al.*, 1997). Deux modèles NDVI-LAI, parmi l'ensemble des modèles retrouvés dans la littérature, ont été sélectionnés soit, celui de Chen (1996a) et celui de Chen et Cihlar (1996). Ces modèles ont été utilisés pour permettre d'obtenir, par inversion, des valeurs de LAI modélisées.

Les résultats du tableau 4.5 présente des valeurs de LAI modélisées plus faibles que les valeurs de LAI mesurées et ce pour une même valeur de NDVI de sites homogènes. De même, les tests statistiques le confirment puisque les valeurs modélisées et mesurées sont significativement différentes. Cela signifie que lorsque l'on utilise les modèles afin d'obtenir une valeur de LAI, la valeur de LAI obtenue est sous-estimée. Dans un premier temps, cette sous-estimation peut être associée à l'utilisation de l'algorithme de Chen et Cihlar qui a servi dans la création du modèle NDVI-LAI des études de Chen (1996a) et Chen et Cihlar (1996). Comme constaté dans la section précédente, la manipulation de l'algorithme de Chen et Cihlar dans l'estimation du LAI sous-estime le LAI. Dans un deuxième temps, il existe une possibilité pour que la sous-estimation des valeurs de LAI soit associée à une valeur de NDVI erronée. Ce problème occasionné peut avoir plusieurs sources : correction atmosphérique, gains ajustés ou

organisation spatiale des objets rencontrés sur la surface d'étude contribuant à fausser la valeur du NDVI.

Dans le cas de la correction atmosphérique, aucun impact notable n'a été constaté. L'utilisation de LOWTRAN, comme modèle de transfert radiatif, est conforme puisque les calculs sont effectués en fonction d'une atmosphère standard ("1976 U.S. Standard Atmosphere model"). LOWTRAN semble fournir des données adéquates pour la correction atmosphérique. Dans le cas du modèle 5S, utilisé dans les études de Chen (1996a) et Chen et Cihlar (1996), le même type d'atmosphère standard est utilisé pour la correction atmosphérique et le modèle ne semble pas apporter une meilleure correction par rapport aux modèles employés dans notre méthodologie (Tanré *et al.*, 1990). Afin de confirmer cette affirmation, concernant la correction atmosphérique de l'image satellite, un autre modèle de transfert radiatif a été utilisé soit MODTRAN. Ce modèle de transfert radiatif a été appliqué sur l'image satellite Landsat TM (1995), mais aucune différence significative a été notée par rapport aux valeurs obtenues avec LOWTRAN.

Une seconde cause possible de variations des valeurs de NDVI est l'utilisation de différents gains ajustés. L'étude de Chen (1996) utilise les gains ajustés NLAPS donc une comparaison est possible avec les valeurs de cette étude, en apportant une modification avec les gains ajustés NLAPS à nos valeurs de NDVI. La correction avec NLAPS présente des valeurs de NDVI toujours plus élevées en ce qui concerne les valeurs de NDVI, peu importe le modèle atmosphérique (Figure 4.5). On a effectué des tests en comparant avec d'autres gains ajustés pour voir la distribution des valeurs de NDVI. L'utilisation des gains ajustés de Thome *et al.* (1997) et Teillet *et al.* (2001) présentent des valeurs de NDVI plus faibles qu'avec les gains ajustés NLAPS (voir en Annexe 9 pour les valeurs de gains ajustés). Les valeurs, associées aux gains ajustés NLAPS, ne considèrent pas la période écoulée depuis le lancement du satellite et négligent donc la perte de sensibilité du capteur qui s'ajoute au fil des années. L'apport de nouveaux gains ajustés permet un ajustement temporel des valeurs de NDVI, pouvant influencer de façon importante l'estimation des valeurs de LAI à partir des modèles NDVI-LAI ou encore servir dans le développement de ces modèles.

Les valeurs de NDVI sont obtenues à partir de réponses spectrales, qui représentent plus précisément ce qui se retrouve à l'intérieur de la fenêtre d'analyse. Le fait d'utiliser des valeurs de NDVI supérieures afin de créer des modèles NDVI-LAI peut avoir un impact sur les valeurs de LAI extraites à partir des modèles. Teillet *et al.*(2001) ont présenté récemment une étude portant sur l'importance d'une bonne calibration des données satellites, et ce en considérant les gains ajustés. Des études ultérieures, utilisant divers gains ajustés, sont à envisager.

Troisièmement, l'organisation structurale et spatiale du peuplement peut influencer les valeurs de NDVI à la hausse ou à la baisse. L'organisation structurale fait appel au phénomène d'agrégation spatiale défini à partir du degré d'hétérogénéité des surfaces d'étude. Les caractéristiques du peuplement peuvent influencer les valeurs de NDVI. Une densité plus faible sur une partie du peuplement peut contribuer à augmenter les valeurs de NDVI. Un NDVI supérieur signifie que le signal provenant de la surface d'étude englobe d'autres objets ou divers couverts végétaux. La surface de mesure est alors considérée comme hétérogène. Le mot hétérogène signifie que la surface est composée d'objets possédant différentes caractéristiques et par conséquent, une variabilité de signatures spectrales affectent la valeur du NDVI obtenu. C'est le cas qui se présente à la figure 4.7, où les surfaces hétérogènes démontrent des valeurs de NDVI plus élevées peu importe le modèle atmosphérique ou les gains ajustés utilisés (Annexe 10 et 11 pour les valeurs de NDVI). C'est à ce moment que l'utilisation de la variance spatiale intervient en permettant de contrôler la composition de la surface de mesure.

5.3- VARIANCE SPATIALE : MESURE DE L'HÉTÉROGÉNÉITÉ ET CONTRÔLE DE L'AGRÉGATION SPATIALE.

La composition des surfaces d'étude et les caractéristiques du couvert végétal apportent des valeurs de variance qui varient fortement en fonction des divers objets présents. Une divergence en terme d'arrangement spatial et d'éléments retrouvés à l'intérieur des surfaces d'étude affecte l'information spectrale provenant de ces surfaces et affectant du même coup, les valeurs de NDVI. Il a été possible d'étudier des surfaces classifiées hétérogènes et d'estimer les mêmes paramètres (NDVI et LAI) pour démontrer l'importance de tenir compte de l'agrégation spatiale lors de la création de modèles NDVI-LAI. La variance spatiale a été

utilisée comme outil d'analyse afin d'obtenir de l'information sur l'homogénéité ou l'hétérogénéité du milieu. Une surface hétérogène va présenter des valeurs de variance spatiale qui diffèrent d'un site à l'autre, reliées aux différents objets composant la surface de mesure et à leur arrangement spatial sur la surface. L'arrangement spatial va permettre de déterminer ou de définir un niveau d'agrégation associé aux entités recouvrant la surface étudiée. Ce phénomène d'agrégation spatiale des objets sur une surface d'étude est fonction de l'échelle de mesure utilisée ou de la résolution spatiale. Peu importe la résolution spatiale utilisée pour la prise de données, le phénomène d'agrégation spatiale est constamment présent. Cet effet d'agrégation apporte une divergence dans les informations extraites, affectant l'estimation de certains paramètres, dont le LAI. Ainsi, un LAI estimé à partir de mesure *in situ* et un LAI obtenu à partir des modèles NDVI-LAI présenteront des valeurs différentes occasionnées par le phénomène d'agrégation spatiale retrouvé sur la surface de mesure. La variance spatiale doit demeurer la même sur l'ensemble du secteur ou de la surface d'étude pour considérer l'effet d'agrégation spatiale et qualifier la surface d'analyse comme étant homogène. Ainsi, une distribution normale des valeurs obtenues du calcul de la variance spatiale sur des fenêtres de 101 pixels par 101 pixels pour des sites homogènes a permis de confirmer l'homogénéité des surfaces. La présence de valeurs élevées de variance peut être expliquées par une surface homogène inférieure à 101 pixels par 101 pixels comme c'est le cas pour les sites hétérogènes.

L'utilisation des surfaces hétérogènes a permis de prouver l'importance de tenir compte du phénomène d'agrégation spatiale. L'hétérogénéité occasionne une surestimation des valeurs de NDVI. Selon nos résultats, les valeurs de NDVI, extraites des surfaces hétérogènes, sont plus élevées que les valeurs de NDVI des sites homogènes. Un NDVI plus élevé signifie que le signal contribuant à obtenir les valeurs de NDVI intègre différents objets provoquant une hausse du signal. La valeur de LAI estimée, associée à cette valeur de NDVI, est alors fausse. Une comparaison des différences entre les moyennes des valeurs mesurées et modélisées des sites hétérogènes et homogènes permet de voir la disparité entre ce qui est modélisé et ce qui est mesuré. Ce sont les valeurs de LAI modélisées de Chen et Cihlar des sites hétérogènes qui affichent une différence moins importante avec les valeurs mesurées. Ce faible écart est probablement associé au fait que les valeurs de LAI mesurées hétérogènes, de même que les valeurs modélisées, sont ajustées avec l'algorithme de Chen et Cihlar. Les analyses statistiques

ont également apporté un point important puisqu'il n'existe aucune différence significative entre les valeurs de LAI mesurées et modélisées pour les sites hétérogènes. Ce qui suppose que lors de la création des modèles, le phénomène d'agrégation spatiale n'est pas considéré entraînant une mauvaise estimation de certains paramètres tel, le LAI.

Ainsi, pour un même NDVI, la valeur de LAI produit du modèle sera plus faible, si l'on ne tient pas compte de l'agrégation spatiale. Dans la littérature, différentes études parlent de l'importance du phénomène d'agrégation spatiale et des problèmes de changement d'échelle lorsque l'on veut analyser des objets à l'intérieur d'une surface (Hay *et al.*, 2001 ; Marceau *et al.*, 1994 ; Marceau et Hay, 1999). L'étude de ces objets permet d'estimer certains paramètres qui sont, par conséquent, affectés par le phénomène d'agrégation spatiale. Ce phénomène est présent dans la plupart des cas lorsque l'on tente de relier des mesures prises au sol avec des mesures obtenues à partir de différents capteurs (résolution spatiale différente). Les modèles NDVI-LAI mettent en relation deux paramètres estimés à différentes échelles où l'objet analysé (dans notre cas, un peuplement forestier) prend une définition différente selon son comportement et sa disposition dans l'espace. C'est une des raisons expliquant la faible relation retrouvée entre le NDVI et le LAI dans la plupart des modèles de la littérature. De ce fait, en contrôlant le phénomène d'agrégation spatiale lorsque nous changeons d'échelle, la relation NDVI-LAI devient plus étroite. La variance spatiale est un outil qui permet d'analyser l'homogénéité des surfaces d'études en améliorant la relation basée sur l'acquisition de données, à partir des indices de végétation.

CHAPITRE VI :

CONCLUSION

SECTION VI : CONCLUSION

Les outils de télédétection, tel que la photographie hémisphérique et l'image satellite, permettent l'étude du couvert forestier à partir de surfaces de différentes dimensions. Le LAI, en tant que paramètre architectural, est estimé à partir de la photographie hémisphérique tandis que l'indice de végétation, NDVI, est obtenu des images satellites. Des modèles NDVI-LAI retrouvés dans la littérature permettent d'obtenir des valeurs de LAI, à partir du NDVI de l'image satellite, sans tenir compte du problème de changement d'échelle. Le changement d'échelle apporte une incertitude dans la définition des objets étudiés, provoqué par le phénomène d'agrégation spatiale. De ce fait, l'agrégation spatiale soulève un problème d'hétérogénéité des surfaces de mesure modifiant l'objet étudié. L'utilisation de la variance spatiale, appliquée sur des orthophotos, permet de mesurer le degré d'hétérogénéité des surfaces et de déterminer des surfaces homogènes. Une surface homogène apporte une meilleure estimation du LAI. C'est le cas de surfaces où l'on retrouve des conifères en peuplements denses et purs avec absence de sous-bois. L'homogénéité de la surface doit être respectée jusqu'à couvrir la totalité la dimension de la surface d'étude à partir de laquelle les valeurs de NDVI sont extraites.

La sélection des modèles NDVI-LAI de la littérature, pouvant servir à obtenir des valeurs de LAI, demande une recherche minutieuse. L'utilisation de nos valeurs de NDVI des sites homogènes, intégrées dans les modèles de Chen (1996a) et de Chen et Cihlar (1996) permet d'obtenir par inversion, des valeurs de LAI modélisées. Les valeurs obtenues de LAI modélisées sont différent significativement des valeurs de LAI mesurées *in situ*. Pour une même valeur de NDVI, il y a une sous-estimation des valeurs de LAI. Cette sous-estimation peut provenir du non-respect de l'homogénéité des surfaces d'étude. Les valeurs de NDVI, ayant servi à la création des modèles, intègrent d'autres objets ou couverts végétaux, contribuant à la valeur du NDVI ou encore l'utilisation des différents gains ajustés peut avoir contribuer à fausser les valeurs de NDVI.

Il est important de prendre en considération tous les éléments ayant servis à la création de ces modèles. Les points à observer lors de la sélection d'un modèle sont les suivants :

- ❖ Type de peuplements (densité, âge, composition),
- ❖ Détermination des sites de mesure (dimension de la surface échantillonnée),
- ❖ Estimation du LAI (méthode utilisée, instruments de mesure, facteur de contagion),
- ❖ Extraction du NDVI (capteur et image satellite utilisés, correction atmosphérique et gains ajustés).

Une estimation des valeurs de LAI en conditions non-contrôlées, sans tenir compte de l'agrégation spatiale, permet de constater l'importance de s'assurer de l'homogénéité de la surface d'étude et d'en connaître la composition. Nos résultats, à partir de surfaces hétérogènes, présentent des valeurs de NDVI plus élevées que le NDVI où l'on considère l'homogénéité de la surface. De la même façon que les surfaces homogènes, l'utilisation des modèles NDVI-LAI a permis d'obtenir des valeurs de LAI modélisées qui coïncident avec les valeurs de LAI des sites de mesure hétérogènes *in situ*. Ainsi, les modèles empiriques basés sur la relation NDVI-LAI ont tendance à sous-estimer le LAI des couverts forestiers. Ceci en raison de l'hétérogénéité spatiale des entités géographiques intégrées dans les valeurs de NDVI, provenant d'images satellites et servant au développement des modèles.

Des études subséquentes, utilisant cette fois la forêt de feuillue, devraient permettre de voir à l'utilisation de la variance spatiale pour mesurer le degré d'hétérogénéité du couvert forestier. Des valeurs de LAI seront estimées à partir de ces sites et les valeurs de NDVI correspondant spatialement seront extraites. Une attention particulière devra être portée sur l'impact du sous-bois sur les valeurs de NDVI. Il devra également y avoir un ajustement adéquat avec les gains ajustés selon Teillet *et al.* (2001) pour obtenir une valeur de NDVI correspondant davantage au rayonnement reçu au capteur. Par la suite, les valeurs de LAI provenant des couverts feuillus seront jumelées aux valeurs de LAI des résineux afin de développer un modèle NDVI-LAI. Ainsi, un nouveau modèle NDVI-LAI sera créé, tenant compte de l'agrégation spatiale, et permettant une meilleure estimation des valeurs de LAI, en évitant tous les inconvénients reliés aux changements d'échelle.

RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES.

- Aman, A., Randriamanantena, H.P., Podaire, A. and Frouin, R.,** (1992). «Upscale integration of normalized difference vegetation index : The problem of spatial heterogeneity.» *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 2, p. 326-338.
- Anderson, G.P., Kneizys, F.X., Chetwynd, J.H., Wang, J., Hoke, M.L., Rothman, L.S., Kimball, L.M., McClatchey, R.A., Shettle, E.P., Clough, S.A., Abreu, L.W. and Selby, J.E.A.,** (1995). Fascode/Modtran/Lowtran : Past/Present/Future. *18th Annual conference on atmospheric transmission models*, 6-8 June.
- Asrar, G., Fuchs, M., Kanemesu, E.T. and Hatfield, J.L.,** (1984). «Estimating Absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat.», *Agronomy Journal*, vol. 76, p. 300-306.
- Baret, F. and Guyot, G.,** (1991). «Potentials and Limits of vegetation indices for LAI and APAR assesment.», *Remote Sensing of Environment*, vol. 35, p. 161-173.
- Barnoti, M.,** (1984). «*Géographie du Québec et du Canada.*», 3^{ième} éditions, Éditions Guérin, Montréal, 471 p.
- Bielski, C. et Cavayas, F.,** (1998). »Estimation of tropical forest area from coarse resolution remotely sensed scenes.», *Proceedings of Scaling and Modelling in Forestry: Applications in Remote Sensing and GIS*. March 19-21, Montréal, Québec, Canada, p. 87-91.
- Bonan, G.B.,** (1993). «Importance of leaf area index and forest type when estimating photosynthesis in boreal forest.», *Remote Sensing of Environment*, vol. 43, p. 303-314.
- Bonhomme, R. and Chartier, P.,** (1972). «The interpretation and automatic measurement of hemispherical photographs to obtain sunlit foliage area and gap frequency.», *The Israel Journal of Agricultural Research*, vol. 22, no. 2, p. 53-61.
- Bonhomme, R., Varlet Grancher, C., Chartier, P.,** (1974). «The use of hemispherical photographs for determining the leaf are index of young crops.», *Photosynthetica*, vol. 8, no. 3, p. 299-301.
- Bonn, F.** (1996).. «*Précis de Télédétection. Volume 2 : Applications thématiques.*», Presses de l'Université du Québec, Québec, 633 p.
- Bonn, F. et Rochon, G.,** (1996). «*Précis de Télédétection. Volume 1 : Principes et Méthodes.*», Presses de l'Université du Québec, Québec, 477 p.

- Bolstad, P.V. and Gower, S.T.,** (1990). «Estimation of leaf area index in fourteen southern Wisconsin forest stands using a portable radiometer.», *Tree Physiology*, vol. 7, p. 115-124.
- Bréda, N.,** (1993). «Détermination de l'indice foliaire des couverts forestiers. Comparaison de différentes techniques de mesure.», Séminaire de l'Unité de Recherche en Écophysiologie Forestière, INRA, Champenoux, France, 26 p.
- Brown, L., Chen, J.M., Leblanc, S.G., Cihlar, J.,** (2000). «A short-wave infrared modification to the simple ratio for LAI retrieval in Boreal Forests : An image and model analysis.», *Remote Sensing of Environment*, vol. 71, p. 16-25.
- Chason, J.W., Baldocchi, D.D. and Huston, M.A.,** (1991). «A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area.», *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 57, p. 107-128.
- Chen, J.M.,** (1996a). «Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal application.», *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 3, p. 229-242.
- Chen, J.M.,** (1996b). «Canopy architecture and remote sensing of the fraction of photosynthetically active radiation absorbed by Boreal conifer forests.», *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, no. 6, p. 1353-1368.
- Chen, J.M.,** (1996c). «Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands.», *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 80, p. 135-163.
- Chen, J.M., Black, T.A. and Adams, R.S.,** (1991). «Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand.», *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 56, p. 129-143.
- Chen, J.M. and Cihlar, J.,** (1995a). «Quantifying the effect of canopy architecture on optical measurements of leaf area index using two gap size analysis methods.», *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 3, p. 777-787.
- Chen, J.M. and Cihlar, J.,** (1995b). «Plant canopy gap-size analysis theory for improving optical measurement of leaf-area index.», *Applied Optics*, vol. 34, no. 27, p. 6211-6222.
- Chen, J.M. and Cihlar, J.,** (1996). «Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images.», *Remote Sensing of Environment*, vol. 55, p. 153-162.
- Cihlar, J., Chen, J. and Li, Z.,** (1997). «On the validation of satellite-derived products for land applications.», *Review Paper Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 23, no. 4, p. 381-389.

- Cihlar, J., Rich, P.M., Gower, T.S., Norman, J.M. and Plummer, S.,** (1995). Leaf Area Index of Boreal Forest : Theory, techniques and measurements. *Journal of Geophysical Research*.
- Curran, P. J.,** (1983). «Multispectral remote sensing for the estimation of green leaf area index.», *Philosophical Transactions Royal Society London Series A*, vol. 309, p. 257-270.
- Curran, P.J., Dungan, J.L., Gholz, H.L.,** (1992). «Seasonal LAI in slash pine estimated with Landsat TM.», *Remote Sensing of Environment*, vol. 39, p. 3-13.
- Danson, F.M.** (2000). «*Temperate forest resource assessment by remote sensing*», Encyclopedia of analytical chemistry, R.A. Meyers (Ed.), John Wiley & Sons Ltd, Chichester, p. 8814-8827.
- Dionne, D.,** (1997). «*L'importance de la résolution spatiale optimale d'images de télédétection pour la discrimination des peuplements forestiers en milieu montagneux.*», Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, 91 p.
- Dionne, D., Boureau, J.-G., Deshayes, M., Gratton, D. and Marceau, D.,** (1995). «Étude de la résolution spatiale optimale dans un milieu forestier de moyenne montagne.», *Bulletin de la Société française de la Photogrammétrie et Télédétection.*, no. 141, p. 51-55.
- Fassnacht, K.S., Gower, S.T., Norman, J.M. and McMurtrie, R.E.,** (1994). «A comparaison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests.», *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 71, p. 183-207.
- Fassnacht, K.S., Gower, S.T., MacKenzie, M.D., Nordheim, E.V. and Lillesand, M.T.,** (1997). «Estimating the leaf area index of North Central Wisconsin Forests using the Landsat Thematic Mapper.», *Remote Sensing of Environment*, vol. 61, p. 229-245.
- Frazer, G.W., Trofymow, J.A. and Lertzman, K.P.,** (1997). «*A method for estimating canopy openness, effective leaf area index, and photosynthetically active photon flux density using hemispherical photography and computerized image analysis technique.*», Canadian Forestry Service, Pacific Forestry Centre, 73 p.
- Gamon, J.A., Field, C.B., Goulden, M.L., Griffin, K.L., Hartley, A.E., Joel, G., Penuelas, J. and Valentini, R.,** (1995). «Relationship between NDVI, canopy structure and photosynthesis in three californian vegetation types.», *Ecological Applications*, vol. 5, no. 1, p. 28-41.
- Gholz, H.L., Fitz, F.K. and Waring, R.H.,** (1976). «Leaf area differences associated with old-growth forest communities in the western Oregon Cascades.», *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 6, p. 49-57.

- Gower, S.T. and Norman, J.M.**, (1991). «Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad-leaf plantations.», *Ecology*, vol. 72, no. 5, p. 1896-1900.
- Guyot, G.**, (1988). «Signatures spectrales des surfaces naturelles.», Col. SAT.Ed. Paradigme. 178 p.
- Hay, G.J., Marceau, D.J., Dubé, P., Bouchard, A.**, (2001). «A multiscale framework for landscape analysis : Object-specific analysis and upscaling.», *Landscape Ecology*, vol. 16, p. 471-490.
- Hill, R.**, (1924). «A lens for whole sky photographs.», *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 50, p. 227-235.
- Hosie, R.C.**, (1980). «*Arbres indigènes du Canada.*», Éditions Fides, Montréal., 389 p.
- Huete, A.R.**, (1988). « A Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI). », *Remote Sensing of Environment*, vol. 25, p. 295-309.
- Kite, G.W. and Spence, C.D.**, (1995). «Land cover, NDVI, LAI and evapotranspiration in hydrological modelling. In : Kite, G.W., Pietroniro, A. and Pultz, T.J. (eds), *Remote Sensing in Hydrology, Proceedings of the Second International Workshop NHRI Symposium, no. 14*, NHRI, Saskatoon, p. 223-240.
- Kneizys, F.X., Shettle, E.P., Gallery, W.O., Chetwynd, J.H., Abreu, L.W., Selby, J.E.A., Clough, S.A. and Fenn, R.W.**, (1983). *Atmospheric Transmittance/Radiance Computer Code LOWTRAN 6*. U.S. Air Force Geophysics Laboratory, Technical Report, AFGL-TR-83-0187, 199 p.
- Laurini, R. et Milleret-Raffort, F.**, (1993). «*Les bases de données en géomatique.*» Hermès, Paris. 340 p.
- Leblanc, S.G., Chen, J.M. and Cihlar, J.**, (1997). «NDVI directionality in Boreal Forests : A model Interpretation of measurements.», *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 23, no. 4, p. 369-379.
- Lillesand, T.M., and Kiefer, R.W.**, (1994).«Remote sensing and image interpretation.», 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, États-Unis, 750 p.
- Malingreau, J.P. and Belward, A.S.**, (1992). «Scale considerations in vegetation monitoring using AVHRR data.», *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, no. 12, p. 2289-2307.
- Marceau, D.J.**, (1998). «Scale and scaling : Implications in forestry and ecology.» *Proceedings of Scaling and Modelling in Forestry: Applications in Remote Sensing and GIS*. March 19-21, Montréal, Québec, Canada, p. 1-8.

- Marceau, D.J., Gratton, D.J., Fournier, R.A., Fortin, J.P.,** (1993). «Le concept de résolution spatiale optimale en télédétection : une application au milieu forestier.», *Comptes rendus du 16^{ième} symposium canadien sur la télédétection / 8^{ième} Congrès de l'Association québécoise de télédétection*, Sherbrooke, Québec, 7-10 juin, p. 817-822.
- Marceau, D.J., Gratton, D.J., Fournier, R.A., Fortin, J.P.,** (1994). «Remote Sensing and the measurement of geographical entities in a forested environment. Part 1: The scale and spatial aggregation problem.», *Remote Sensing of Environment*, vol. 49, no. 2, p. 93-104.
- Marceau, D.J. and Hay, G.J.,** (1999). «Scaling and Modelling in Forestry : Applications in Remote Sensing and GIS.», *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 25, p. 342-346.
- Meyer, E.B.,** (1998). «Étude de la structure des canopées forestières à l'aide de photographies hémisphériques zénithales numérisées.», Mémoire de DEA, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 43 p.
- Nemani, R.R. and Running, S.W.,** (1989). «Testing a theoretical climate-soil-leaf area hydrologic equilibrium of forest using satellite data and ecosystem simulation.», *Agricultural and Forest Meteorological*, vol. 44, p. 245-260.
- Nemani, R., Pierce, L.L., Band, L. and Running, S.W.,** (1993). «Forest ecosystem processes at the watershed scale : sensitivity to remotely sensed Leaf area index estimates.», *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14, no. 13, p. 2519-2534.
- Neumann, H.H., Hartog, G.D., Shaw, R.H.,** (1989). «Leaf area measurements based on hemispheric photographs and leaf-litter collection in a deciduous forest during autumn leaf-fall.», *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 45, p. 325-345.
- Norman, J. M. and Campbell, G.S.,** (1989). «Canopy structure. In : Plant Physiological Ecology : Field methods and instrumentation.», R.W. Pearcy, J Ehleringer, H. A. Mooney and P.W. Rundel (eds), Chapman and Hall, London, p. 301-326.
- Ormsby, J.P., Choudhury, B.J., Owe, M.,** (1987). «Vegetation spatial variability and its effects on vegetation indices.», *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, p. 1301-1306.
- Parcs Canada,** (1997). «Plan de réhabilitation des plantations d'épinettes blanches, Parc national de la Mauricie.», Service de la conservation des ressources naturelles, Région du Québec, 67 p.
- Pearson, R.L. and Miller, L.D.** (1977). « Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass Prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado », In *Proceeding of the 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, ERIM, Ann Arbor, MI, p. 1357-1381.

- Peterson, D.L., Westman, W.E., Stephenson, N.J., Ambrosia, V.G., Brass, J.A. and Spanner, M.A.,** (1986). «Analysis of forest using Thematic Mapper Simulator data.», *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-24, no. 1, p. 113-121.
- Peterson, D.L., Spanner, M.A., Running, S.W. and Teuber, K.B.,** (1987). «Relationship of Thematic Mapper Simulator Data to leaf area index of Temperate coniferous forests.», *Remote Sensing of Environment*, vol. 22, p. 323-341.
- Piélou, E.C.,** (1962). «Runs of one species with respect to another in transects through plant populations. », *Biometrics*, vol. 18, p. 579-593.
- Pierce, L.L. and Running, S.W.,** (1988). «Rapid estimation of coniferous leaf area index using a portable integrating radiometer.», *Ecology*, vol. 69, no. 6, p. 1762-1767.
- Rich, P.M.,** (1990). «Characterizing plant canopies with hemispherical photographs.», *Remote Sensing Reviews*, vol. 5, no. 1, p. 13-29.
- Richardson, A.J. and Wiegand, C.L.,** (1977). «Distinguishing vegetation from soil background information. », *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 43, p. 1541-1552.
- Robin, M.,** (1995). «*La télédétection : des satellites aux systèmes d'information géographiques.*», Éditions Nathan, Paris. 318 p.
- Rouse, J.W., Hass, R.H., Shell, J.A. and Deering, D.W.,** (1974). «Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS-1. », *Proceeding, 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium*, vol 1, p. 309-317.
- Running, S.W.,** (1990). «*Estimating terrestrial primary productivity by combining remote sensing and ecosystem simulation.* In : Remote Sensing of Biosphere Functioning», Hobbs, R.J. and Mooney, H.A. (eds), Paris, Springer-Verlag, p. 65-86.
- Running, S.W., Peterson, D.L., Spanner, M.A. and Teuber, K.B.,** (1986). «Remote sensing of coniferous forest leaf area.», *Ecology*, vol. 67, no. 1, p. 273-276.
- Sherrer, B.** (1984). «*Biostatistique.*», Gaëtan Morin éditeur ltée, Boucherville, Québec. 850 p.
- Smith, F.W., Sampson, D.A. and Lang, J.N.,** (1991). «Comparaison of leaf Area Index estimates from tree allometrics and measured light interception.», *Forest Science*, vol. 37, no. 6, p. 1682-1688.
- Smith, N.J., Chen, J.M. and Black, T. A.,** (1993). «Effects of clumping on estimates of stand leaf area index using the LI-COR LAI-2000.», *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 23, p. 1940-1943.

- Spanner, M.A., Pierce, L.L., Peterson, D.L. and Running, S.W.,** (1990). «Remote sensing of temperate coniferous forest leaf area index : The influence of canopy closure, understory vegetation and background reflectance.», *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, no. 1 p. 95-111.
- Strachan, I.B. and McCaughey, J.H.,** (1996). «Spatial and Vertical leaf area index of a deciduous forest resolved using the LAI-2000 Plant Canopy Analyser.», *Forest Science*, vol.42, no. 2, p. 176-181.
- Tanré, D., Deroo, C., Duhaut, P., Herman, M., Morcrette, J.J., Perbos, J. and Deschamps, P.Y.,** (1990). «Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum : the 5S code.», *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, no. 4, p. 659-668.
- Teillet, P.M., Staenz, K. and Williams, D.J.,** (1997). «Effects of spectral, spatial and radiometric characteristics on remote sensing vegetation indices of forested regions.», *Remote Sensing of Environment*, vol. 61, p. 139-149.
- Teillet, P.M., Helder, D.L., Markham, B.L., Barker, J.L. Thome, K.J., Morfitt, R., Schott, J.R. and Palluconi, F.D.,** (2001). «A lifetime radiometric calibration record for the Landsat Thematic Mapper.», *Proceedings of the 23rd Canadian Symposium on Remote Sensing, Quebec City, Quebec, 20-24 August 2001, part I*, p. 17-26.
- ter Steege, H.,** (1997). «WINPHOT, a programme to analyse vegetation indices, light and light quality from hemispherical photographs.», *Tropenbos-Guyana Reports* 97-3, 52 p.
- Thome, K.J., Crowther, B.G. and Biggar, S.F.,** (1997). «Reflectance- and Irradiance-based calibration of Landsat-5 Thematic Mapper.», *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 23, no. 4, p. 309-317.
- Walter, J.-M.N.,** (2001). «*Photographies hémisphériques des voûtes forestières. Étude du rayonnement solaire sous le couvert à l'aide du logiciel GLA Version 2.0 : Les Nouragues (Guyane Française). Note technique.*» Faculté des Sciences de la Vie. Université Louis Pasteur, Strasbourg I, Centre d'Études et de Recherches Éco-Géographiques (CNRS).
- Walter, J.-M.N.,** (2002). «*CIMES : A package of programs for the assessment of canopy geometry and transmission of solar radiation by hemispherical photographs, Part I: Canopy Geometry.*», Université Louis Pasteur, Strasbourg I, Centre d'Études et de Recherches Éco-Géographiques, Groupe de Recherches en Télédétection et Spatialisation, CNRS.
- Waring, R.H., Emmingham, W.H., Gholz, H.L. and Grier, C.C.,** (1978). «Variation in maximum leaf area of coniferous forests in Oregon and its ecological significance.», *Forest Science*, vol. 24, no. 1, p. 131-140.

- Warren Wilson, J.**, (1963). « Estimation of foliage denseness and foliage angle by inclined point quadrats. », *Australian Journal of Botany*, vol. 11, p. 95-105.
- Watson, D.J.**, (1947). « Comparative physiological studies in the growth of field crops. I : Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. », *Annals of Botany*, vol. 11, p. 41-76.
- Welles, J.M. and Norman, J.M.**, (1991). «Instrument for indirect measurement of canopy architecture.», *Agronomy Journal*, vol. 83, p. 818-825.
- White, J.D., Running, S.W., Nemani, R., Keane, R.E. and Ryan, K.C.**, (1997). «Measurement and remote sensing of LAI in Rocky Mountain montane ecosystems.», *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 27, p. 1714-1727.
- Woodcock, C.E. and Strahler, A.H.**, (1984). «Image variance and spatial structure in remotely sensed scenes.» *Proceedings of the Second Annual NASA Symposium on Mathematical Pattern Recognition and image Analysis*, Johnson Space Center, Houston, Texas, june 6-8, p. 427-465.
- Woodcock, C.E. and Strahler, A.H.**, (1987). «The factor of scale in remote sensing.», *Remote Sensing of Environment*, vol. 21, p. 311-332.
- Woodcock, C.E., Strahler, A.H. and Jupp, D.L.B.**, (1988). «The use of variograms in Remote Sensing : I. Scene Models and Simulated Images.», *Remote Sensing of Environment*, vol. 25, p. 323-348.
- Woods, K.D., Feiveson, A.H. and Botkin, D.B.**, (1991). «Statistical error analysis for biomass density and leaf area index estimation.», *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 21, p. 974-989.
- Wulder, M.**, (1998). «Optical remote sensing techniques for the assessment of forest inventory and biophysical parameters.», *Progress in Physical Geography*, vol. 22, no. 4, p. 449-476.
- Wulder, M.A., Franklin, S.E. and Lavigne, M.B.**, (1996). «High spatial resolution optical image texture for improved estimation of forest stand leaf area index.», *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 22, no. 4, p. 441-449.
- Yin, Z. and Williams, T.H.L.**, (1997). «Obtaining spatial and temporal vegetation data from Landsat MSS and AVHRR / NOAA satellite image for hydrological model.», *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 63, no. 1, p. 69-77.

ANNEXES

ANNEXE 1

Programme pour le calcul de la variance spatiale.

```

PROGRAM variance
C
  DIMENSION RIM(2500,2500)
  DIMENSION ZIM(2500,2500)
  REAL*4 DX,DY,XMIN,YMIN,NVAL,totmoy,totvar
  INTEGER*2 NROWS,NCOLS,xx,x2
  CHARACTER NOM1*75,NOM2*75,A1*14,A2*14,A3*14,A4*14
  CHARACTER A5*14,A6*14
C
  PRINT *, 'YOU ARE READING A DEM IN ARC/Info Gridascii FILE FORMAT'
  PRINT *, 'WHAT IS THE NAME OF THAT FILE? (MAX. 73 CHARACTERS)'
  READ(5,2001) NOM1
  PRINT *, 'YOU ARE WRITTING A REAL NUMBER DEM!'
  PRINT *, 'WHAT IS THE NAME OF THE FILE? (MAX. 73 CHARACTERS)'
  READ(5,2001) NOM2
  PRINT *, 'la taille de la fenetre pour analyse (impair)?'
  read(5,*) xx
  x2=int(xx/2)
  Print *, 'x2: ', x2
C
  OPEN(10,FILE=NOM1,STATUS='UNKNOWN')
C
  READ(10,1001) A1,NCOLS
  READ(10,1001) A2,NROWS
  READ(10,1002) A3,XMIN
  READ(10,1002) A4,YMIN
  READ(10,1002) A5,DX
  READ(10,1003) A6,NVAL
  DO 10 I=1,NROWS
  READ(10,*) (RIM(I,J),J=1,NCOLS)
  do 101 j=1,ncols
  zim(i,j)=rim(i,j)
101 continue
10  CONTINUE
  CLOSE(10)
  DY=Dx
C
  Routine pour calculer des pentes sur un DEM en nombre reels
C
  et de creer un fichier de pente en nombre reel en format gridascii
C
  ARC/Info, calcul en radian, 0 a PI/2
C
  do 2 i=(1+x2),(nrows-x2)
  do 12 j=(1+x2),(ncols-x2)
  totmoy=0
  totvar=0
  do 3 ii=(i-x2),(i+x2)
  do 13 jj=(j-x2),(j+x2)

```

```

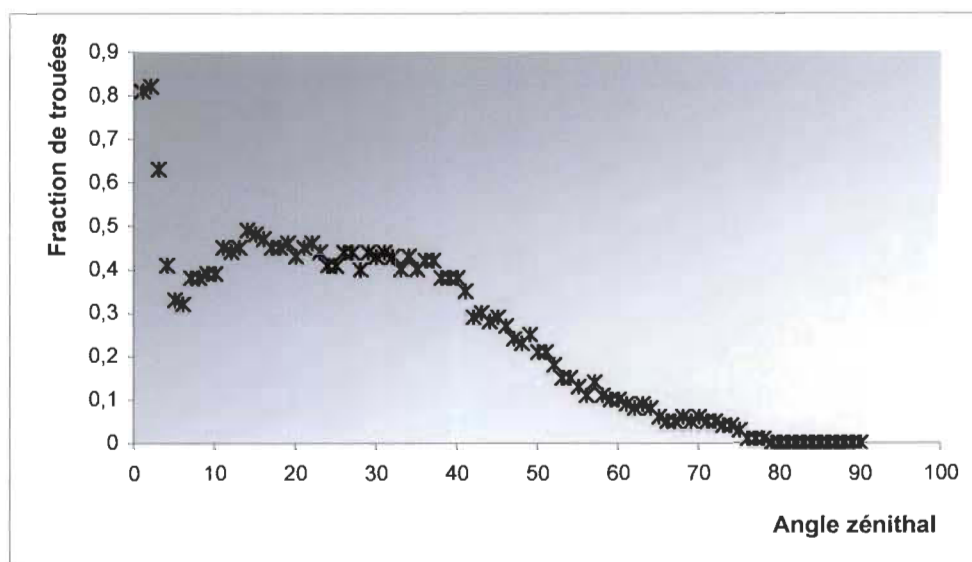
        totmoy=rim(ii,jj)+totmoy
13      continue
3        continue
        zim(i,j)=totmoy/(xx*xx)
        do 4 ii=(i-x2),(i+x2)
        do 14 jj=(j-x2),(j+x2)
        totvar=totvar+((rim(ii,jj)-zim(i,j))*(rim(ii,jj)-zim(i,j)))
14      continue
4        continue
        zim(i,j)=totvar/((xx*xx)-1)
12      continue
2        continue
C
C      ÉCRIRE LA MATRICE DE LA PENTE EN NOMBRE RÉÉLS
C
        open(13,file=nom2,STATUS='UNKNOWN')
        write(13,1001) A1,ncols
        write(13,1001) A2,nrows
        write(13,1002) A3,XMIN
        write(13,1002) A4,YMIN
        write(13,1002) A5,DY
        write(13,1003) A6,NVAL
        DO 121 I=1,nrows
        WRITE(13,*) (zim(I,J),J=1,ncols)
121      CONTINUE
        CLOSE(13)
C
1001    FORMAT(A14,I10)
1002    FORMAT (A14,F15.6)
1003    FORMAT (A14,F15)
2001    FORMAT (A75)
        STOP
        END
C

```

ANNEXE 2

**Exemple d'un fichier obtenu lors du traitement de l'image numérisée 10 avec
WINPHOT 5.0**

Openness	17,06 %
Openness for subcircle	n / c
PPFD calculated for 1 day (s)	
<i>Above canopy</i>	
direct	25,87 mol/m ² /day
diffuse	3,88 mol/m ² /day
total	29,75 mol/m ² /day
<i>Below canopy</i>	
direct	6,79 mol/m ² /day
diffuse	1,60 mol/m ² /day
total	8,39 mol/m ² /day
DSF	0.26
ISF	0.41
TSF	0.28
RFR	0.58
LAI	1,99 m ² /m ²
MLA	67,47 °



Graphique représentant la fraction de trouées en fonction de l'angle zénithal, obtenues à partir de WINPHOT 5.0, pour l'image numérisée 10.

ANNEXE 3

Exemple d'une partie d'un fichier de fraction de trouées de l'image numérisée 10, avec le nombre de divisions zénithales et azimutales (18 et 24)

18	24	gapfraction	nbre pixels/secteur angulaire
2.500000	352.500000	0.670330	91
2.500000	337.500000	0.192308	104
2.500000	322.500000	0.053097	113
2.500000	307.500000	0.053191	94
2.500000	292.500000	0.115385	104
2.500000	277.500000	0.216667	120
2.500000	262.500000	0.175824	91
2.500000	247.500000	0.519231	104
2.500000	232.500000	0.238938	113
2.500000	217.500000	0.234043	94
2.500000	202.500000	0.586538	104
2.500000	187.500000	0.798319	119
2.500000	172.500000	1.000000	91
2.500000	157.500000	1.000000	104
2.500000	142.500000	0.964602	113
2.500000	127.500000	0.776596	94
2.500000	112.500000	0.855769	104
2.500000	97.500000	0.495798	119
2.500000	82.500000	0.362637	91
2.500000	67.500000	0.605769	104
2.500000	52.500000	0.654867	113
2.500000	37.500000	1.000000	94
2.500000	22.500000	0.942308	104
2.500000	7.500000	0.739496	119
7.500000	352.500000	0.488294	299
7.500000	337.500000	0.216561	314
7.500000	322.500000	0.024768	323
7.500000	307.500000	0.000000	303
7.500000	292.500000	0.006369	314
7.500000	277.500000	0.045872	327
.....			
87.500000	217.500000	0.000000	3640
87.500000	202.500000	0.000000	3647
87.500000	187.500000	0.000000	3658
87.500000	172.500000	0.000000	3630
87.500000	157.500000	0.000000	3647
87.500000	142.500000	0.000000	3660
87.500000	127.500000	0.000000	3640
87.500000	112.500000	0.000000	3647
87.500000	97.500000	0.000000	3658
87.500000	82.500000	0.000000	3630
87.500000	67.500000	0.000000	3647
87.500000	52.500000	0.000000	3660
87.500000	37.500000	0.000000	3640
87.500000	22.500000	0.000000	3647
87.500000	7.500000	0.000000	3658

ANNEXE 4

Exemple d'un fichier obtenu pour le calcul du LAIe à partir du programme LAISLP, pour l'image numérisée numéro 10.

```
< LAISLP > --- indice10 ---
Photosite: gapfr10.dat
Slope = 0 deg   Aspect = 0 deg
Uncorrected for Slope
```

```
-----
It.#      Le      Chi2    Q[Chi2]   lambda
1      1.1914   341.7396 0.99936 1.00e-004
2      1.6233   281.4693 1.00000 1.00e-005
3      1.6922   280.6569 1.00000 1.00e-006
4      1.6908   280.6567 1.00000 1.00e-007
5      1.6908   280.6566 1.00000 1.00e-008
6      1.6908   280.6566 1.00000 1.00e-007
```

```
-----
SE      0.0784
```

```
-----
Zenith Viewing Angle (FOV) = 180 deg
0 Horizon Ring(s) Discarded = 0 deg
```

```
N = 432 (Total Nbr of Hemispherical Regions)
n1 = 432 (Nbr of Hemispherical Regions Used)
n2 = 349 (Number of Hemispherical Regions with Gap > 0.0)
```

Gap, Openness and Cover

```
-----
Zen.   GF      CO      OS      SO      CC
-----
2.5    0.5522    0.5301    0.5522    0.5522    0.4478
7.5    0.3688    0.4511    0.4147    0.4147    0.5853
12.5   0.4398    0.4474    0.4286    0.4286    0.5714
17.5   0.4554    0.4493    0.4403    0.4403    0.5597
22.5   0.4214    0.4438    0.4335    0.4335    0.5665
27.5   0.4200    0.4399    0.4295    0.4295    0.5705
32.5   0.4139    0.4362    0.4254    0.4254    0.5746
37.5   0.4013    0.4318    0.4200    0.4200    0.5800
42.5   0.3132    0.4187    0.3985    0.3985    0.6015
47.5   0.2603    0.4029    0.3736    0.3736    0.6264
52.5   0.1773    0.3825    0.3418    0.3418    0.6582
57.5   0.1179    0.3605    0.3088    0.3088    0.6912
62.5   0.0851    0.3394    0.2788    0.2788    0.7212
67.5   0.0522    0.3190    0.2511    0.2511    0.7489
72.5   0.0433    0.3006    0.2278    0.2278    0.7722
77.5   0.0055    0.2822    0.2048    0.2048    0.7952
82.5   0.0003    0.2657    0.1855    0.1855    0.8145
87.5   0.0000    0.2510    0.1693    0.1693    0.8307
-----
```

ANNEXE 5

Exemple d'une partie d'un fichier obtenu pour la dimension des trouées pour l'image numérisée numéro 10, pour un angle zénithal entre 25° et 65° avec un pas d'échantillonnage de 1°

```

25.0
30 5 2 2 8 1 1 1 1 8 46 3 25 1 1 12 1 1 1 41 1 4 11 1 1 28 2 6 5 22 7 1 3 3 1
3 1 3 4 1 7 1 4 1 9 3 9
2 2 2 1 35 6 1 35 16 1 66 2 26 4 3 5 2 3 39 1 1 7 27 3 1 2 1 1 1 8 2 3 1 39 29
4 3 1 3 67 2 1 4
26.0
24 1 2 1 3 1 2 1 53 1 1 2 1 26 14 2 1 1 41 15 34 2 47 1 4 2 5 3 4 8 6 16 1 3 1
1
8 3 1 4 89 4 3 13 25 27 9 32 1 5 13 29 5 10 1 25 5 8 5 3 76 4 3 70 5 1 1 1 4
27.0
35 2 15 5 2 1 10 2 1 2 1 10 17 30 1 7 21 1 5 12 1 4 1 10 45 13 37 2 50 2 1 2 3
2 2 6 14 15
3 2 35 9 14 9 4 2 49 1 2 1 4 3 69 28 1 2 1 4 535 3 1 7 24 1 8 8 2 3 1 49 38
3 63 3
28.0
19 1 2 7 3 1 1 1 16 1 1 2 5 11 1 2 34 1 2 1 18 1 2 22 1 1 2 1 6 62 38 3 44 1 4
3 6 1 5 3 2 1 6 1 4 1 6 2 14
8 6 2 1 6 3 3 10 2 2 57 3 3 9 11 3 19 33 12 6 33 2 3 14 5 1 10 1 9 10 25 2 3 1
1 14 4 8 31 4 41 14 70 8 1 3 1 1
29.0
3 12 7 7 1 2 2 2 3 6 3 11 5 1 1 19 10 1 1 4 2 13 5 38 1 3 63 14 36 1 1 5 58 4
6 11 4 2 1 2 1 17 12
10 4 1 2 6 1 13 1 4 72 5 6 15 2 4 15 27 32 2 1 2 25 8 22 2 2 6 1 2 24 1 13 1 6
34 44 2 3 15 83 2 2
30.0
8 1 8 7 11 3 6 1 1 3 1 2 4 14 1 2 21 7 7 2 7 19 32 3 3 58 4 1 15 1 33 1 4 2 32
2 4 3 1 1 4 2 1 9 1 1 15 2 4 4 7 15 2
26 1 4 1 2 17 1 7 2 4 56 5 2 2 1 6 15 11 15 28 23 2 37 28 1 1 1 1 1 8 31 6 12
1 8 13 1 1 13 22 1 1 39 6 10 1 1 53 18 1 5
.....
.....
63.0
1 1 6 1 10 1 1 4 2 3 2 7 4 2 6 2 2 8 3 3 2 4 1 3 1 1 1 9 7 2 2 18 1 1 3 2 18 1
3 2 1 1 1 4 1 5 15 1
418 29 79 9 3 20 107 1 23 13 1 2 158 40 54 2 7 42 2 51 8 4 2 24 1 33 26 6 2 49
3 40 3 2 1 14 23 4 221 2 71 1 80 90 57
64.0
1 2 13 1 4 3 3 10 1 3 6 7 1 6 1 1 2 2 7 1 8 1 1 2 6 1 1 18 7 2 12 1 1 1 3 2 6
1 1 1 10
432 119 3 6 10 20 113 20 2 159 38 37 8 5 6 59 25 36 7 18 1 56 2 4 6 3 53 2 47
24 2 5 6 1 10 71 152 72 145 1 97
65.0
4 11 1 2 2 3 1 2 1 1 5 8 3 4 1 2 1 7 1 1 7 4 18 2 1 1 1 5 1 1 1 2 6 1 1 1
552 3 49 137 111 23 13 6 96 3 15 6 2 19 22 50 18 31 64 4 3 57 3 1 33 15 1 31 4
1 15 239 165 45 112 8

```


ANNEXE 6

Exemple d'un fichier de résultats pour le calcul du facteur de contagion, obtenus avec le programme CLUMP, pour l'image numérisée 10

```

CLUMP
gapsiz10.dat      epsiln 0.0050
zenith gapfrc     #W_seq  deltaG      omegaE  #iters      Ip      95% CI      Ipw
25.0  0.4018      43      0.2529      0.5998  18      0.2311  0.0466      0.2550
26.0  0.3980      33      0.2599      0.5863  14      0.1682  0.0395      0.1871
27.0  0.4535      38      0.3143      0.5271  20      0.1783  0.0384      0.2001
28.0  0.4089      48      0.2406      0.6226  18      0.2262  0.0431      0.2562
29.0  0.4265      42      0.2647      0.5917  20      0.1883  0.0386      0.2153
30.0  0.4111      51      0.2279      0.6431  19      0.2243  0.0415      0.2591
31.0  0.4465      49      0.2545      0.6129  20      0.2021  0.0381      0.2358
32.0  0.4054      52      0.2504      0.6055  20      0.2138  0.0394      0.2521
33.0  0.3963      54      0.2490      0.6035  20      0.2219  0.0401      0.2646
34.0  0.4007      54      0.2496      0.6048  20      0.2105  0.0381      0.2540
35.0  0.4147      57      0.2474      0.6141  20      0.2108  0.0370      0.2573
36.0  0.4342      60      0.2601      0.6014  20      0.2142  0.0365      0.2648
37.0  0.4179      57      0.2564      0.6012  20      0.2036  0.0358      0.2549
38.0  0.3555      54      0.2065      0.6555  20      0.1986  0.0367      0.2520
39.0  0.3524      49      0.2276      0.6154  20      0.1756  0.0343      0.2259
40.0  0.3751      59      0.2262      0.6314  20      0.2009  0.0352      0.2622
41.0  0.3457      58      0.2078      0.6475  18      0.1988  0.0356      0.2634
42.0  0.3034      60      0.1492      0.7332  16      0.2122  0.0379      0.2855
43.0  0.2796      57      0.1413      0.7352  15      0.2071  0.0386      0.2832
44.0  0.2643      48      0.1545      0.6954  15      0.1763  0.0366      0.2451
45.0  0.2777      40      0.1641      0.6857  14      0.1409  0.0322      0.1993
46.0  0.2885      58      0.1679      0.6863  15      0.1969  0.0363      0.2835
47.0  0.2570      57      0.1481      0.7035  14      0.1993  0.0378      0.2922
48.0  0.2278      40      0.1444      0.6814  15      0.1493  0.0352      0.2231
49.0  0.2296      50      0.1423      0.6893  15      0.1844  0.0382      0.2810
50.0  0.1900      57      0.0866      0.7953  10      0.2322  0.0454      0.3613
51.0  0.1937      43      0.1103      0.7338  12      0.1698  0.0392      0.2699
52.0  0.1833      45      0.0924      0.7729  10      0.1818  0.0412      0.2954
53.0  0.1548      41      0.0651      0.8241  9       0.1852  0.0448      0.3077
54.0  0.1435      39      0.0668      0.8066  8       0.1851  0.0464      0.3149
55.0  0.1350      50      0.0420      0.8784  7       0.2449  0.0529      0.4270
56.0  0.1065      37      0.0295      0.8993  4       0.2179  0.0568      0.3898
57.0  0.1213      46      0.0245      0.9255  4       0.2390  0.0546      0.4389
58.0  0.1051      40      0.0257      0.9122  4       0.2328  0.0579      0.4393
59.0  0.1020      35      0.0201      0.9306  3       0.2041  0.0553      0.3962
60.0  0.0997      46      0.0238      0.9156  3       0.2689  0.0614      0.5379
61.0  0.0841      42      0.0173      0.9306  3       0.2813  0.0675      0.5803
62.0  0.0861      50      0.0131      0.9490  2       0.3218  0.0689      0.6855
63.0  0.0800      45      0.0131      0.9459  2       0.3076  0.0704      0.6776
64.0  0.0788      41      0.0160      0.9324  3       0.2764  0.0676      0.6306
65.0  0.0550      36      0.0087      0.9519  2       0.3342  0.0855      0.7907
meanoE      0.7336
meanIp      0.2150
meanIpw     0.3365
n           41

```

ANNEXE 7

**Valeurs de LAIe et LAI (WINPHOT et CLUMP) et valeurs des facteurs de contagion
(Piélou puis Chen et Cihlar) pour les sites hétérogènes**

Site	Fraction de trouées	LAIe (WINPHOT)	LAIe (CLUMP- gapfrac)	Coeff. (Piélou)	Indice (Chen et Cihlar)	LAI (CLUMP -gapfrac)	LAI (WINPHOT)
1	0,0800	3,01	2,83	0,4179	0,8905	6,77	7,2
2	0,0373	4,08	3,68	0,3600	0,9318	10,23	11,33
3	0,0278	4,42	4,01	0,6049	0,9465	6,63	7,31
4	0,0279	4,49	4,01	0,5377	0,9435	7,46	8,35
5	0,0084	4,47	5,35	0,8815	0,9430	6,07	5,07
6	0,0549	3,87	3,25	0,5576	0,9194	5,83	6,94
7	0,0198	4,13	4,39	0,6816	0,9395	6,44	6,06
8	0,0125	5,88	4,91	0,6420	0,9653	7,64	9,16
9	0,0403	4,01	3,60	0,3282	0,9118	10,96	12,23
10	0,0635	2,95	3,09	0,4367	0,8459	7,07	6,76
11	0,1001	2,73	2,58	0,5209	0,8840	4,95	5,24
Moy		4,00	3,79			7,28	7,79
Min		2,73	2,58			4,95	5,07
Max		5,88	5,35			10,96	12,23

ANNEXE 8

Tableau de la moyenne des différences et écart type entre les valeurs de LAI mesurées (WINPHOT_Piélou) et les valeurs de LAI modélisées des sites homogènes et hétérogènes.

Modèles non-linéaires	moyenne	écart type
LAI (Chen) homogènes	3,90	± 1.03
LAI (Chen et Cihlar) homogènes	4,30	± 0.98
LAI (Chen) hétérogènes	0,52	± 3.90
LAI (Chen et Cihlar) hétérogènes	2,14	± 3.50

Tableau de la moyenne des différences et écart type entre les valeurs de LAI mesurées (CLUMP_Piélou) et les valeurs de LAI modélisées des sites homogènes et hétérogènes

Modèles non-linéaires	moyenne	écart type
LAI (Chen) homogènes	3,50	± 0.80
LAI (Chen et Cihlar) homogènes	3,80	± 0.70
LAI (Chen) hétérogènes	0,01	± 3.40
LAI (Chen et Cihlar) hétérogènes	1,64	± 3.00

ANNEXE 9

Valeurs des différents gains ajustés pour les bandes spectrales TM3 et TM4 du satellite Landsat

	TM3	TM4
Gains ajustés (Teillet <i>et al.</i> , 2001) ($\text{W/m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}/\text{DN}$)	1.105	0.9242
Gains ajustés (NLAPS Landsat) ($\text{W/m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}/\text{DN}$)	0.806	0.814

ANNEXE 10

Valeurs de NDVI, sans correction atmosphérique et obtenues de différents modèles atmosphériques (MODTRAN, LOWTRAN) et selon différents gains ajustés pour les sites homogènes

Site	NDVI MODTRAN NLAPS	NDVI MODTRAN Teillet (2001) 20mm	NDVI MODTRAN Teillet (2001) 1mm	NDVI LOWTRAN Thome (1997)	NDVI LOWTRAN NLAPS	NDVI exo-atm
1	0,6790	0,4995	0,5754	0,5925	0,6718	0,4516
2	0,6497	0,4519	0,5351	0,5641	0,6530	0,3926
3	0,6497	0,4519	0,5351	0,5641	0,6530	0,3926
4	0,6301	0,4353	0,5131	0,5297	0,6211	0,3706
5	0,6030	0,3950	0,4824	0,4867	0,5817	0,3391
6	0,6362	0,4417	0,5226	0,5333	0,6216	0,3874
7	0,5957	0,3864	0,4737	0,4762	0,5727	0,3285
8	0,6742	0,4937	0,5695	0,5859	0,6662	0,4443
9	0,6934	0,5046	0,5864	0,6310	0,7115	0,4511
10	0,6729	0,4806	0,5580	0,6130	0,7005	0,4094
11	0,6645	0,4612	0,5500	0,5916	0,6792	0,4056
12	0,6621	0,4743	0,5505	0,5813	0,6673	0,4115
13	0,6645	0,4612	0,5500	0,5916	0,6792	0,4056
14	0,6367	0,4431	0,5211	0,5389	0,6289	0,3804
15	0,6497	0,4519	0,5351	0,5641	0,6530	0,3926
16	0,6645	0,4612	0,5500	0,5916	0,6792	0,4056
17	0,6589	0,4690	0,5505	0,5649	0,6485	0,4213
18	0,6608	0,4793	0,5508	0,5725	0,6572	0,4167
19	0,6608	0,4793	0,5508	0,5725	0,6572	0,4167
20	0,6491	0,4653	0,5366	0,5563	0,6436	0,3991
21	0,6491	0,4653	0,5366	0,5563	0,6436	0,3991
22	0,6621	0,4743	0,5505	0,5813	0,6673	0,4115
23	0,6301	0,4353	0,5131	0,5297	0,6211	0,3706
24	0,6551	0,4725	0,5437	0,5645	0,6505	0,4080

ANNEXE 11

**Valeurs de NDVI selon différents modèles atmosphériques et selon différents gains
ajustés pour les sites hétérogènes**

Site	NDVI MODTRAN Nlaps	NDVI MODTRAN Teillet (2001) 20mm	NDVI MODTRAN Teillet (2001) 1mm	NDVI LOWTRAN Thome (1997)	NDVI LOWTRAN Nlaps	NDVI exo-atm
1	0,7437	0,5870	0,6534	0,6907	0,7573	0,5401
2	0,7371	0,5816	0,6483	0,6708	0,7371	0,5416
3	0,7809	0,6482	0,7028	0,7329	0,7895	0,6066
4	0,7913	0,6570	0,7150	0,7519	0,8066	0,6188
5	0,8112	0,6938	0,7425	0,7718	0,8209	0,6573
6	0,7679	0,6251	0,6876	0,7115	0,7705	0,5909
7	0,7980	0,6706	0,7265	0,7506	0,8025	0,6401
8	0,8000	0,6799	0,7301	0,7490	0,8000	0,6472
9	0,7548	0,6081	0,6708	0,6943	0,7564	0,5699
10	0,7980	0,6706	0,7265	0,7506	0,8025	0,6401
11	0,7520	0,6045	0,6673	0,6906	0,7534	0,5654