

N° d'ordre: 3130

Université des Sciences et Technologies de Lille
Laboratoire d'Optique Atmosphérique

THESE

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

Spécialité: LASERS, MOLECULES, RAYONNEMENT ATMOSPHERIQUE

Présentée et soutenue publiquement par

YU Tao

Le 24 Octobre 2002

Mesure et modélisation des variations directionnelles de la température de brillance: *cas d'un couvert de maïs en rang*

Composition du Jury:

M.	Marc-Philippe	Stoll	Université de Strasbourg-1	Président
M.	Jean-Pierre	Lagouarde	INRA - Villeneuve d'Ormon	Rapporteur
Mme	Catherine	Ottlé	CETP-CNRS - Vélizy	Rapporteur
M.	Michel	Legrand	Université de Lille-1	Directeur de thèse
M.	Xingfa	Gu	INRA - Avignon	Co-directeur de thèse

Table des Matières

Introduction générale	1
------------------------------	---

Première partie Bases physiques et étude bibliographique

Chapitre 1 Bases physiques et étude bibliographique	7
1.1 Introduction	7
1.2 Intérêt de l'information produite par l'infrarouge thermique directionnel	7
1.3 La température de brillance directionnelle (TBD)	9
1.3.1 Définition de la température de brillance directionnelle	9
1.3.2 Expression de la TBD pour une surface non isotherme	10
1.3.3 Contribution de l'atmosphère à la TBD	12
1.4 Principales limitations de l'information infrarouge thermique directionnelle en télédétection et questions posées dans notre recherche	15
1.5 Mesures multidirectionnelles de la TBD à partir de différentes plateformes.....	17
1.5.1 Mesures multidirectionnelles de la TBD par des capteurs satellitaires	17
1.5.2 Mesures multidirectionnelles de la TBD par des capteurs aéroportés	18
1.5.3 Mesures multidirectionnelles depuis le sol.....	19
1.6 Modélisation de la variation directionnelle de la TBD des couverts en rangs	20
1.6.1 Les différents modèles de variation directionnelle de TBD des couverts en rangs	20
1.6.2 Fraction de trous des surfaces partiellement couvertes de végétation.....	22
1.6.3 Effet de hot-spot dans les modèles BRDF	23
1.7 Conclusion.....	24

Deuxième Partie Acquisition et analyse de la TBD d'un couvert de maïs

Chapitre 2 Dispositif expérimental et prétraitement de données.....	29
2.1 Introduction	29
2.2 Site expérimental et instruments	30
2.2.1 Site expérimental.....	30
2.2.2 La caméra infrarouge thermique INFRAMETRICS - 760.....	32
2.2.3 Le système de mesure caméra-grue	34
2.3 Méthodes expérimentales pour acquérir la TBD et la TB des composantes (TBC) en utilisant le système caméra-grue	35
2.4 Pré-traitement de données.....	39
2.5 Principales caractéristiques des mesures effectuées	44
2.5.1 Conception générale de l'expérimentation.....	44

2.5.2	Liste des données obtenues	45
2.6	Conclusion.....	46
Chapitre 3 Mesure de la température de brillance des composantes (TBC) et des paramètres biophysiques du couvert		
3.1	Introduction.....	49
3.2	Méthodes de mesure et d'estimation.....	50
3.2.3	Mesure et estimation de la TBC d'un couvert de culture en rangs	50
3.2.4	Mesures des paramètres de géo-structure et de la fraction de trous directionnelle	51
3.2.5	Mesures de l'humidité du sol, de la vitesse de vent, et de l'indice foliaire.....	54
3.3	Résultats	55
3.3.3	Distribution spatiale des TBC du couvert et leurs relations.....	55
3.3.4	Paramètres géométriques du couvert.....	64
3.3.5	Humidité du sol et vitesse du vent.....	69
3.4	Conclusion.....	71
Chapitre 4 Analyse des perturbations des mesures multidirectionnelles de la TBD du couvert en rangs.....		
4.1	Introduction.....	73
4.2	Analyse générale des facteurs perturbateurs des mesures multidirectionnelles de la TBD.....	73
4.2.1	Effets instrumentaux de la caméra IRT Inframetrics	74
4.2.2	Effets de la cible observée.....	75
4.2.3	Effets de l'environnement	75
4.3	Evaluation de l'étalonnage de la caméra Inframetrics	75
4.4	Evaluation des effets spatiaux	77
4.4.1	Hétérogénéité spatiale absolue	77
4.4.2	Hétérogénéité spatiale de la variation directionnelle.....	79
4.4.3	Position, taille d'échantillon et champ correspondant.....	81
4.5	Evaluation des effets temporels	83
4.5.1	Fluctuations rapides.....	83
4.5.2	Variations lentes	84
4.6	Conclusion.....	85
Chapitre 5 Etude théorique des erreurs dues au champ d'échantillonnage.....		
5.1	Introduction.....	87
5.2	Modèle géométrique pour l'étude des effets du champ de visée.....	88
5.2.1	Modélisation géométrique simple d'une parcelle de maïs et détermination des fractions de chaque composante.....	88
5.2.2	Calcul de la fraction de chaque composante	89
5.3	Prédictions du modèle et discussion.....	92
5.3.1	Calcul des erreurs pour les visées au nadir.....	92
5.3.2	Influence de l'angle de visée et effets de compensation pour les visées obliques.....	94
5.3.3	Influence de l'angle de visée pour la composante de sol éclairé.....	96
5.4	Validation du modèle de champ.....	97
5.4.1	Validation.....	97

5.4.2	Application initiale dans les simulations de TBD	101
5.5	Conclusion.....	102
Chapitre 6	Génération du diagramme polaire de TBD et bilan d'erreurs	103
6.1	Introduction	103
6.2	Présentation de la méthodologie d'acquisition de la TBD	104
6.3	Détermination de la TBD	105
6.3.1	Réalisation de la mesure	105
6.3.2	Méthode d'échantillonnage pour l'extraction de la TBD	105
6.3.3	Représentation polaire de la TBD	108
6.4	Analyse d'un exemple de mesure et de traitement des données	108
6.4.1	Détermination et représentation de la TBD	108
6.4.2	Analyse des erreurs.....	112
6.5	Conclusion.....	114
Chapitre 7	Variations de la distribution de la TBD	115
7.1	Introduction	115
7.2	Caractéristiques de la TBD de la parcelle	115
7.2.1	Mesure à des instants différents le même jour	115
7.2.2	Mesures à des dates différentes	119
7.3	Conclusion.....	123

Troisième Partie Modélisation de la TBD du couvert de maïs – développement d'un modèle de transfert radiatif géométrique optique - GORT

Chapitre 8	Modélisation de la variation directionnelle de la TBD d'un couvert de maïs en rangs	127
8.1	Introduction.....	127
8.2	Développement d'un nouveau modèle hybride géo-optique de transfert radiatif (GORT) pour la simulation de la TBD de maïs en rangs	128
8.2.1	Description géométrique d'un couvert en rangs et du transfert radiatif simplifié dans le couvert.....	128
8.2.2	Calcul de la fraction des trois composantes	129
8.2.3	Fraction de trous pour des couverts en rangs	132
8.2.4	Calcul du facteur de hot spot H_t	136
8.3	Prédictions du modèle	137
8.3.1	Longueur de chemin et fonction de hot spot	137
8.3.2	Variation directionnelle de la distribution des trois composantes	140
8.3.3	Analyse de sensibilité des paramètres	143
8.4	Conclusion.....	153
Chapitre 9	Validation du modèle GORT	155
9.1	Introduction	155
9.2	Détermination des entrées du modèle	155
9.2.1	Largeur de la barre végétale	155

9.2.2	Autres paramètres	157
9.3	Distribution directionnelle des fractions des composantes en température du couvert de maïs	158
9.4	Analyse des TBD mesurées	162
9.5	Application initiale du modèle de GORT.....	164
9.6	Conclusion.....	167
Conclusion générale		169
Annex A	Modèle simplifié 3D prenant en compte des effets de champ	173
Annex B	A study of angular effects within Field of View (FOV) on corn field's brightness temperature extraction at local noon time	195
Références bibliographiques		201

Introduction générale

La température de surface est un paramètre clé pour caractériser les états et l'environnement des surfaces terrestres. Elle est un facteur déterminant sur la vitesse de croissance des plantes. Intervenant dans le bilan d'énergie, elle peut être utilisée pour évaluer les autres paramètres du bilan d'énergie comme les rayonnements global et net, la température de l'air, les flux des chaleurs sensibles et latentes, etc.... Elle peut être appliquée dans des études climatiques, microclimatiques et topo-climatiques, les bilans d'énergie et hydriques des surfaces, l'évaluation et le suivi de phénomènes de sécheresse, la détection de maladies végétales, la prévision de la production végétale et agricole, etc....

La température de brillance directionnelle (TBD) résulte d'une combinaison de plusieurs contributions telles que celles de l'atmosphère, de la cible. Elle est affectée par la structure géométrique et les propriétés thermiques de la surface, son environnement, etc.... et peut être variable en fonction de la direction d'observation et de la direction d'incidence du Soleil. L'objectif de travail de cette thèse est de (1) développer une méthode de mesure optimale au sol pour la caractérisation de la variation directionnelle de la température de brillance du couvert en rangs; (2) acquérir et analyser la variation de la TBD d'un couvert de maïs à différents stades de croissance; (3) développer et valider un modèle de transfert radiatif optique géométrique (GORT) pour décrire les variations de la TBD.

Cette thèse comporte 3 parties divisées en 9 chapitres. La première partie (chapitre 1) résume les travaux existants dans ce domaine en se basant sur des analyses bibliographiques; la deuxième partie (chapitres 2, 3, 4, 5, 6, 7) présente l'expérimentation, l'acquisition et l'analyse de la TBD; la troisième partie (chapitres 8 et 9) présente le développement d'un nouveau modèle de simulation de la TBD et sa validation.

Dans le chapitre 1, après avoir montré l'intérêt du caractère directionnel de la température de brillance, nous donnons la définition de la TBD en incluant son expression, son calcul à partir des différentes composantes des environnements naturels, et ses relations avec les autres paramètres tel que la température thermodynamique, la température radiative et la température aérodynamique. Une revue des méthodes de mesure de la TBD à différentes échelles est ensuite présentée, ainsi que leurs limites.

La méthode de mesure depuis le sol est considérée comme une mesure de vérité terrain pour interpréter les mesures de télédétection aéroportées et satellitaires. Cependant, elle peut être à l'origine d'erreurs importantes lorsque la cible est un couvert en rangs. Ce point est également présenté dans le premier chapitre. Nous abordons ensuite un des

problèmes clé, le champ d'observation (Field Of View – FOV) utilisé dans les mesures. Les effets temporels induits par la croissance du couvert et par le mouvement apparent du Soleil seront également mentionnés.

Le chapitre 1 présente ensuite les travaux existants dans le domaine de la modélisation de la TBD, incluant les points concernant la fréquence de trou directionnelle dans le couvert, les effets de hot spot, la BRDF, etc.... A l'issue de cette analyse bibliographique, nous fixons notre objectif de recherche et définissons le plan de travail.

Le chapitre 2 présente l'expérimentation réalisée pour évaluer et acquérir la TBD. Il commence par la description du site expérimental, de l'instrument principal utilisé (caméra thermique) et du système de mesures caméra-grue. Après avoir présenté les mesures réalisées, nous abordons la description des caractéristiques géométriques et radiométriques des données acquises, puis leurs traitements. Les mesures sont divisées en deux catégories : celles pour l'estimation de la TBD et celles pour l'analyse des distributions de températures au sein du couvert (analyse des composantes thermiques du couvert). La suite présente la stratégie d'acquisition de la TBD, et l'ensemble des mesures obtenues est listé à la fin du chapitre.

Le chapitre 3 comprend deux parties. La première est centrée sur l'analyse de la distribution des températures au sein de couvert, qui aboutit sur une classification en trois composantes distinctes au sein du couvert : le sol éclairé, le sol à l'ombre et la végétation. Cette classification peut évoluer en fonction du temps et du stade de croissance du couvert. La deuxième partie de ce chapitre présente des mesures réalisées sur la structure géométrique du couvert : indice foliaire (LAI), largeur et hauteur du rang, orientation azimutale des feuilles, etc....

Le chapitre 4 est centré sur l'analyse des facteurs perturbateurs de la détermination de la TBD par le système caméra-grue. Les points traités sont les effets instrumentaux, la variation temporelle de la TB, l'hétérogénéité spatiale, l'influence de la variation micrométéorologique, les effets de champ, etc.... Ils sont regroupés en deux catégories de facteurs : ceux qui sont dus à la méthode de mesure et ceux qui sont liés aux traitements des données.

Dans le chapitre 5, nous développons un modèle géométrique pour analyser les effets du champ dans les mesures de la TB d'un couvert en rangs. Nous considérons qu'un couvert est composé de trois composantes : sol éclairé, sol à l'ombre et végétation. Nous évaluons les erreurs de mesures en utilisant comme critère le poids relatif des trois composantes. Les erreurs sont fonction du champ, de la taille de la surface observée et de la position de l'instrument. La validation du modèle et son application pour la simulation de la TBD sont présentés à la fin du chapitre.

Le chapitre 6 présente la chaîne d'acquisition de la TBD incluant les étapes de mesures, de prétraitement et de génération de la TBD selon un système de coordonnées polaires. Un exemple de résultat obtenu ainsi que les erreurs associées sont analysées.

Le chapitre 7 analyse les variations diurnes de la TBD d'un couvert de maïs, dues au changement de la position du Soleil, et à des dates différentes qui font apparaître l'évolution de l'indice foliaire.

Les chapitres 8 et 9 présentent le développement et la validation d'un modèle géométrique optique hybride du type transfert radiatif (GORT) pour la simulation de la TBD d'un couvert en rangs. Ce modèle est basé sur une description simplifiée de l'architecture du couvert et de ses propriétés optiques ainsi que sur les températures des éléments constituant ce couvert (sol éclairé, sol à l'ombre et la végétation). Le modèle nécessite trois groupes de paramètres d'entrée : la structure géométrique du couvert, la température des composantes, et les directions du Soleil et de l'observation. En sortie, il peut générer un diagramme polaire de la température de brillance dans toutes les directions d'observations. Une analyse de sensibilité du modèle est effectuée. La validation du modèle est réalisée à la fois par rapport à la fréquence de trous et à la TBD.

Première partie

Bases physiques et étude bibliographique

Chapitre 1

Bases physiques et étude bibliographique

1.1 Introduction

La température de brillance directionnelle (TBD) d'une cible est un paramètre directement mesurable par des capteurs de télédétection. Elle a été largement utilisée dans de nombreuses études climatiques et environnementales, pour l'évaluation des températures et des taux d'humidité des surfaces agricoles, l'identification des surfaces, etc.... C'est un paramètre clé du bilan d'énergie qui dépend de nombreux facteurs tels que la structure géométrique et les propriétés thermiques de surface, l'atmosphère et l'environnement. Il dépend aussi des caractéristiques du capteur et de la géométrie de mesure.

Une application importante de la TBD est l'estimation des flux énergétiques des surfaces de couverts agricoles. Les résultats des recherches dans ce domaine sont aujourd'hui nombreux. Grâce aux avancées technologiques, il devient possible de réaliser des mesures multitemporelles, multispaciales, multispectrales et multidirectionnelles, mais l'utilisation simultanée de la masse de données constituée par ces mesures devient un réel problème. L'objectif de cette thèse est d'étudier la variabilité de la TBD d'un couvert en rangs. Dans ce chapitre, nous allons présenter une analyse bibliographique afin de mettre en évidence l'intérêt de cette étude, ses difficultés et les problèmes posés.

1.2 Intérêt de l'information produite par l'infrarouge thermique directionnel

La température de brillance (TB) de surface (Norman et al. 1995) est une variable importante pour caractériser les processus radiatifs associés aux échanges d'énergie et d'eau à l'interface biosphère - atmosphère. Elle joue un rôle important dans de nombreux domaines scientifiques tels que la météorologie, la climatologie et plus généralement le domaine de l'environnement. La télédétection multidirectionnelle a été largement appliquée ces dernières années pour étudier les surfaces naturelles et cultivées, notamment pour la caractérisation des paramètres de surface, et pour approfondir la compréhension de notre environnement. La TBD est calculée à partir de la luminance mesurée par le capteur dans la direction d'observation de la cible, par simple inversion de la fonction de Planck à la longueur d'onde considérée. Elle a montré un grand potentiel pour l'estimation des paramètres clés des surfaces agricoles et pour l'évaluation du transfert d'énergie.

La TBD a été utilisée pour évaluer l'état de stress hydrique (Jackson et al. 1987; Moran et al. 1994; Carlson et al. 1994; Morrow et al. 1998; Hamlyn 1999), estimer les flux de chaleurs sensible et latente et le bilan d'énergie (Seguin et al. 1983, Carlson 1986,

Kustas et al. 1989, Vining et al. 1992, Lhomme et al. 1994a,b; Ibanez et al. 1998; Kustas et al. 1999), apporter un supplément d'information sur la structure géométrique de la végétation et le changement de l'environnement local (Kimes 1980, 1983; McGuire et al. 1989; François et al. 1997, Cresswell et al. 1999; Lagouarde et al. 2000).

Dans le début des années 80, Idso (1981) et Jackson et al. (1981) ont créé un index du stress hydrique de couvert (CWSI - crop water stress index) pour décrire l'état hydrique des surfaces agricoles en se basant sur la TB des feuilles de la plante observée de façon oblique pour minimiser la contribution du sol. Cet index est étroitement corrélé à l'humidité du sol, au potentiel hydrique de la plante, à la résistance de diffusion des feuilles, à la photosynthèse et au rendement de la récolte, etc.... Il a été utilisé dans des applications importantes telles que le pilotage de l'irrigation, la prédiction des rendements et la détection de certaines maladies des plantes (Moran et al. 1994).

Pour des surfaces partiellement couvertes de végétation, Vining et al. (1992) ont suggéré un angle zénithal d'observation optimal pour estimer le flux de chaleur sensible dans leur expérimentation. Ils ont démontré que pour le flux de chaleur sensible estimé à partir de la TB de surface, les mesures correspondant aux angles zénithaux entre 0° et 20° donnent un meilleur accord pour une vitesse du vent supérieure à 5 m/s, et celles aux angles compris entre 40° et 60° pour une vitesse du vent inférieure à 4m/s. Prévot et al. (1994) ont utilisé la TBD pour déterminer le facteur de résistance additionnel kB^{-1} pour mieux estimer le flux de chaleur sensible. Ils ont aussi démontré que ce facteur (kB^{-1}) peut être déterminé en combinant des mesures multiangulaires pour un couvert homogène. Lhomme et al. (1994) ont présenté un modèle à deux couches pour estimer le flux de chaleur sensible à partir de la TB de surface. Ils ont utilisé une température infrarouge composite résultant de la somme pondérée de la température du sol et de celle des feuilles pour corriger la formulation initiale du flux de chaleur pour un modèle à une couche. Leurs résultats montrent que le flux de chaleur sensible estimé par ce modèle à deux couches correspond mieux aux valeurs observées.

En se basant sur un modèle 2D développé par Jackson et al. (1979) pour simuler des variations angulaires de température composite d'une culture en rangs, Kimes (1993) a présenté un modèle inverse pour estimer l'information sur la structure du couvert et les températures des composantes en utilisant une série d'observations angulaires. Le modèle a été appliqué avec succès sur un champ du coton. Les résultats ont montré que l'incertitude sur les paramètres estimés de la structure est de l'ordre de 10%, et celle sur les températures des composantes est de l'ordre de 1-2°C. Il a indiqué que cette méthode pourrait aussi être appliquée à d'autres types de végétation et avoir des applications potentielles considérables en télédétection. Il a recommandé de poursuivre les études sur la relation entre la structure géométrique du couvert et ses propriétés directionnelles dans l'infrarouge thermique.

D'un autre côté, tous les capteurs des imageurs spatiaux tels que NOAA-AVHRR, MODIS, ASTER, etc..., effectuent des mesures en visée oblique. Ainsi, il est parfois nécessaire de normaliser les effets angulaires pour corriger les mesures. Par exemple, le capteur NOAA-AVHRR a un champ d'observation (FOV pour Field Of View) de $\pm 55^\circ$, et chaque pixel correspond à une direction d'observation différente dans cette gamme. La différence de TB mesurée entre deux pixels de l'image peut être affectée par la

différence entre les directions d'observation. Suivant sa direction d'observation, une même surface présentera généralement au même instant des valeurs différentes de TB. Si une surface est observée à des instants distincts et selon des directions de visée différentes, la différence en TB est liée non seulement aux effets temporels affectant la surface, mais également aux différences directionnelles. Donc il est important de connaître les propriétés directionnelles pour mieux caractériser les surfaces. Avec le développement des nouvelles technologies d'observation spatiale, il devient possible d'effectuer des observations multidirectionnelles simultanées. L'exploitation des mesures directionnelles peut nous fournir des informations complémentaires sur les surfaces observées.

1.3 La température de brillance directionnelle (TBD)

1.3.1 Définition de la température de brillance directionnelle

La température de brillance directionnelle (TBD) d'une cible mesurée par un capteur selon une direction donnée est la température d'un corps noir qui émettrait la même luminance que cette cible dans la direction considérée:

$$R_i(\mathbf{q}, \mathbf{j}) = R(T_{B,i}(\mathbf{q}, \mathbf{j})) = \int_{I_1}^{I_2} \frac{f_i(I)C_1}{\pi I^5 [\exp(\frac{C_2}{IT_{B,i}(\mathbf{q}, \mathbf{j})}) - 1]} dI \quad (1.1)$$

$R_i(\mathbf{q}, \mathbf{j})$ est la luminance directionnelle mesurée dans le canal i de l'instrument dans la direction de la cible caractérisée par les angles zénithal et azimutal (\mathbf{q}, \mathbf{j}) ; $T_{B,i}(\mathbf{q}, \mathbf{j})$ est la TBD de la cible mesurée par le capteur dans le canal i ; I_1 et I_2 sont les longueurs d'onde inférieure et supérieure délimitant la bande spectrale du canal i du capteur; C_1 et C_2 sont des constantes universelles associées à la loi de Planck, de valeurs respectives $3.74 \times 10^{-16} \text{ Wm}^{-2}$ et $1.44 \times 10^{-2} \text{ mK}$; $f_i(I)$ est la réponse spectrale relative du capteur dans le canal i , normalisée selon l'équation suivante:

$$\int_{I_1}^{I_2} f_i(I) dI = 1 \quad (1.2)$$

Nous constatons que $T_{B,i}(\mathbf{q}, \mathbf{j})$ décrit quantitativement la luminance provenant de la direction de la cible. Cette TB dépend de l'état thermodynamique de la cible, de ses propriétés émissives, de son architecture, et enfin de la réflexion du rayonnement émis par l'atmosphère et par l'environnement de la cible. Dans ce travail, nous exprimerons la TBD selon $T_{B,i}(\mathbf{q}_s, \mathbf{j}_s, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v)$ de jour. Dans cette expression, $(\mathbf{q}_s, \mathbf{j}_s)$ sont les angles zénithal et azimutal solaires, et $(\mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v)$ indiquent les angles zénithal et azimutal de l'observation. Cette description prend en compte non seulement la direction de

l'observation mais également celle du Soleil. Elle sera utilisée quand nous décrirons l'ensemble des propriétés directionnelles de la surface.

Pour une surface homogène, la valeur de $T_{B,i}(\mathbf{q}_s, \mathbf{j}_s, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v)$ est tout d'abord déterminée par le bilan d'énergie au sol. Ce bilan dépend de l'énergie échangée avec l'atmosphère au moyen de la convection, la conduction, le rayonnement incluant les courtes et les grandes longueurs d'onde et le transfert de chaleur latente par évaporation du sol et par transpiration de la plante. Cette quantité est affectée par la structure géométrique du couvert, les propriétés thermiques des composantes du couvert, la turbulence, etc. Tous ces facteurs agissent simultanément et intègrent le sol, l'atmosphère, la végétation et leurs interactions.

1.3.2 Expression de la TBD pour une surface non isotherme

Dans le domaine de l'infrarouge thermique, de nombreux chercheurs ont étudié la signification physique de la TBD (Sutherland et al. 1977 ; Norman et al. 1990 ; Norman et al. 1994 ; François et al. 1997 ; Becker et al. 1994 ; Li et al. 1999). Afin d'élargir les domaines d'application, ils ont essayé d'établir des relations entre cette TBD et d'autres quantités telles que les températures thermodynamique, aérodynamique et radiative.

Si la cible est hétérogène, non isotherme et proche de l'équilibre thermique, ce qui est le cas d'un couvert de maïs dans un environnement naturel avec des composantes caractérisées par des températures thermodynamiques différentes, le rayonnement mesuré dans la direction de visée du radiomètre est une combinaison des rayonnements émis par chaque composante de la surface et des rayonnements réfléchis en provenance de l'atmosphère et des objets environnants. Donc le rayonnement mesuré en provenance d'une surface élémentaire de la cible située en (x, y) , à la longueur d'onde λ est:

$$R_{\lambda}(\mathbf{q}_s, \mathbf{j}_s, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v, x, y) = R(T_{b,\lambda}(\mathbf{q}_s, \mathbf{j}_s, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v, x, y)) + f_{\lambda} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} r_{\lambda}(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v, x, y) L_{\lambda}(\mathbf{a}, \mathbf{b}, x, y) \cos \alpha \sin \alpha d\alpha d\mathbf{b} \quad (1.3)$$

$R_{\lambda}(\mathbf{q}_s, \mathbf{j}_s, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v, x, y)$ est la luminance spectrale directionnelle provenant de la surface élémentaire de la cible située en (x, y) : cette surface est un élément de sol ou de végétation, considérée comme homogène et isotherme; $T_{b,\lambda}(\mathbf{q}_s, \mathbf{j}_s, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v, x, y)$ est la TBD de cette surface; f_{λ} est la réponse spectrale de l'instrument; $r_{\lambda}(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v, x, y)$ est la réflectance bidirectionnelle spectrale; $L_{\lambda}(\mathbf{a}, \mathbf{b}, x, y)$ est le rayonnement reçu par la surface élémentaire provenant du ciel et de son environnement; α et β sont les angles zénithal et azimutal pour le rayonnement incident à la surface élémentaire; $\mathbf{q}_s, \mathbf{j}_s, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v$ sont les angles zénithaux et azimutaux du soleil et de l'observation. Dans la mesure où nous nous intéressons à la description de la TBD pour une position du soleil donnée, nous pouvons omettre les angles du Soleil dans la formulation.

L'équation (1.3) peut alors être ré-écrite simplement, en omettant les paramètres de la direction du Soleil:

$$R_l(\mathbf{q}, \mathbf{j}, x, y) = R(T_{B,l}(\mathbf{q}, \mathbf{j}, x, y)) = R(T_{b,l}(\mathbf{q}, \mathbf{j}, x, y)) + L'_l(\mathbf{q}, \mathbf{j}, x, y) \quad (1.4)$$

avec:

$$L'_l(\mathbf{q}, \mathbf{j}, x, y) = f_l \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} r_l(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{q}, \mathbf{j}, x, y) L_l(\mathbf{a}, \mathbf{b}, x, y) \cos \mathbf{a} \sin \mathbf{a} d\mathbf{a} d\mathbf{b} \quad (1.5)$$

$L'_l(\mathbf{q}, \mathbf{j}, x, y)$ est la luminance spectrale du rayonnement réfléchi par la surface, fonction des luminances spectrales dans les différentes directions incidentes, de la réflectance bidirectionnelle de la surface et de la réponse spectrale de l'instrument.

Si on considère un radiomètre travaillant dans la bande spectrale i , limitée par les longueurs d'onde minimale I_1 et maximale I_2 , la luminance mesurée par le radiomètre est:

$$\begin{aligned} R_l(\mathbf{q}, \mathbf{j}, x, y) &= R(T_i(\mathbf{q}, \mathbf{j}, x, y)) = \int_{I_1}^{I_2} R(T_{B,l}(\mathbf{q}, \mathbf{j}, x, y)) dI \\ &= \int_{I_1}^{I_2} \frac{f_i(I) C_1}{I T_{B,l}(\mathbf{q}, \mathbf{j}, x, y) [\exp(\frac{C_2}{I}) - 1]} dI \end{aligned} \quad (1.6)$$

où $T_i(\mathbf{q}, \mathbf{j}, x, y)$ est la TBD de la surface élémentaire dans la bande i .

La luminance du rayonnement d'une cible de surface S , hétérogène et non isotherme, mesurée par un radiomètre, peut être obtenue en intégrant la contribution des surfaces élémentaires homogènes et isothermes:

$$R_i(\mathbf{q}, \mathbf{j}) = R(T_{B,i}(\mathbf{q}, \mathbf{j})) = \frac{\int_S R_{B,i}(\mathbf{q}, \mathbf{j}, x, y) dx dy}{\int_S dx dy} \quad (1.7)$$

où $R_i(\mathbf{q}, \mathbf{j})$ est la luminance mesurée dans la direction (\mathbf{q}, \mathbf{j}) et dans la bande spectrale i et $T_{B,i}(\mathbf{q}, \mathbf{j})$ est la TBD de la cible composite, égale à la température d'un corps noir qui émettrait la même luminance.

Nous pouvons récrire $R_{B,i}(\mathbf{q}, \mathbf{j})$:

$$R_i(\mathbf{q}, \mathbf{j}) = R(T_{B,i}(\mathbf{q}, \mathbf{j})) = \sum_{k=1}^N f_k(\mathbf{q}, \mathbf{j}) R_{k,B,i}(\mathbf{q}, \mathbf{j}) = \sum_{k=1}^N f_k(\mathbf{q}, \mathbf{j}) R_{k,B,i}(T_k(\mathbf{q}, \mathbf{j})) \quad (1.8)$$

où N est le nombre d'éléments composant la cible, k est le numéro d'élément, et $f_k(\mathbf{q}, \mathbf{j})$ le poids relatif normalisé des éléments dans la direction d'observation. La somme des $f_k(\mathbf{q}, \mathbf{j})$ est égale à 1; T_k est la TBD de l'élément k .

Jackson et al. (1975) ont démontré que le nombre d'éléments d'un couvert en rangs peut être réduit à quatre composantes : sol éclairé, sol à l'ombre, végétation éclairée et végétation à l'ombre. Dans ce cas, l'équation (1.8) peut être écrite en une somme de quatre contributions :

$$R(T_{B,i}(\mathbf{q}, \mathbf{j})) = \sum_{k=1}^4 f_k(\mathbf{q}, \mathbf{j}) R_{k,B,i}(T_k, \mathbf{q}, \mathbf{j}) = \sum_{k=1}^4 f_k(\mathbf{q}, \mathbf{j}) a_k \sigma T_k^4 \approx a_B \sigma T_{B,i}^4(\mathbf{q}, \mathbf{j}) \quad (1.9)$$

où a_k est la fraction de luminance totale (intégrant l'ensemble du spectre) émise dans la bande i d'un corps noir de température T_k , a_B est la fraction de luminance émise dans la bande i d'un corps noir de température $T_{B,i}$; σ est la constante de Stefan-Boltzmann.

En général, la différence entre les températures des quatre composantes est inférieure à 30°C. Dans ces conditions, les écarts entre les a_k et a_B sont négligeables. Nous avons donc

$$T_{B,i}^4(\mathbf{q}, \mathbf{j}) \approx \sum_{k=1}^4 f_k(\mathbf{q}, \mathbf{j}) T_k^4 \quad (1.10)$$

Dans ce cas, la TBD est égale à la température composite. Les cinq températures de brillance dans l'équation (1.10) sont toutes directement mesurables par un radiomètre infrarouge thermique.

Il est important de noter que la relation entre la température de brillance composite et les températures des composantes est une expression du quatrième degré, et non une somme arithmétique pondérée. Considérons à titre d'exemple une surface composée de 1/3 de végétation, 1/3 de sol à l'ombre et 1/3 de sol éclairé avec des températures de brillance respectives de 27°C, 33°C et 50°C. L'équation (1.10) donne une température composite du couvert de 37.1°C alors que la moyenne arithmétique est de 36.7°C, ce qui donne une différence de 0.4°C.

1.3.3 Contribution de l'atmosphère à la TBD

Si la distance entre le radiomètre et la cible est inférieure à 150 m, les effets atmosphériques (absorption et émission) le long du trajet de propagation sont négligeables (Kustas, 1990). Le rayonnement provenant de la cible observée est ainsi composé de trois parties : l'émission propre (directe) de la cible, l'émission de la cible

associée à des diffusions "à l'intérieur" de celle-ci et la réflexion par la cible du rayonnement atmosphérique descendant.

Dans notre étude, nous considérons seulement des cas de ciel clair. La luminance spectrale $R_{atm,l}(\mathbf{q}, \mathbf{f})$ du rayonnement atmosphérique réfléchi par la cible dans la direction caractérisée par l'angle zénithal θ et l'angle azimutal ϕ à une longueur d'onde λ donnée, peut être exprimée par (Norman et al. 1995):

$$R_{atm,l}(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \mathbf{r}_{b,l}(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{q}, \mathbf{f}) \cos(\mathbf{a}) L_1^\downarrow(\mathbf{a}, \mathbf{b}) \sin(\mathbf{a}) d\mathbf{a} d\mathbf{b} \quad (1.11)$$

où $\rho_{b,\lambda}(\alpha, \beta, \theta, \phi)$ est la réflectance bidirectionnelle spectrale de la cible; $L_\lambda^\uparrow(\alpha, \beta)$ est la luminance spectrale du rayonnement atmosphérique directionnel descendant; α et β sont les angles zénithal et azimutal du rayonnement descendant. En général, les mesures dans l'infrarouge thermique sont effectuées dans la fenêtre spectrale 8-14 μm . Dans cette bande spectrale, la luminance du rayonnement atmosphérique réfléchi par la cible dans la direction d'observation (\mathbf{q}, \mathbf{j}) , $R_{atm,i}$, est de :

$$R_{atm,i}(\mathbf{q}, \mathbf{f}) = \int_8^{14} R_{atm,l}(\mathbf{q}, \mathbf{f}) d\lambda = \int_8^{14} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \mathbf{r}_{b,l}(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{q}, \mathbf{f}) \cos(\mathbf{a}) L_1^\downarrow \sin(\mathbf{a}) d\mathbf{a} d\mathbf{b} d\lambda \quad (1.12)$$

Estimation du rayonnement atmosphérique hémisphérique descendant dans la bande 8-14 μm

Plusieurs formulations ont été proposées pour l'estimation du rayonnement atmosphérique hémisphérique descendant dans la bande 8-14 μm . Ce dernier s'exprime soit en fonction de la température de l'air T_a et de la pression de vapeur d'eau ambiante e_a (Brutsaert, 1975; Idso, 1981; Crawford et al. 1999), soit à partir des mesures de TB du ciel obtenues par un radiothermomètre (Chen et al. 1989; Rubio et al. 1997).

Sur tout le spectre, la luminance du rayonnement atmosphérique hémisphérique descendant dans le domaine des grandes longueurs d'onde, L^\downarrow est:

$$L^\downarrow = \mathbf{e}_{atm} \mathbf{S} T_{atm}^4 = \mathbf{e}_c(T_a, e_a) \mathbf{S} T_a^4 \quad (1.13)$$

où \mathbf{e}_{atm} est l'émissivité atmosphérique effective; T_{atm} est la température atmosphérique effective; $\mathbf{e}_c(T_a, e_a)$ est l'émissivité effective de l'atmosphère par ciel clair; T_a est la température de l'air proche de la surface; e_a est la pression de vapeur d'eau de l'air proche de la surface. D'après Brutsaert (1975), l'émissivité effective de l'atmosphère par ciel clair peut être exprimée comme:

$$\mathbf{e}_c = 1.24 (e_a/T_a)^{1/7} \quad (1.14)$$

Cette formulation a été améliorée par Crawford et al. (1999) en utilisant des données expérimentales, par l'introduction d'une variation saisonnière :

$$\mathbf{e}_c = (1.22 + 0.06 \sin((m+2) \mathbf{p}/6)) (e_a/T_a)^{1/7} \quad (1.15)$$

où le paramètre m est le numéro du mois.

Dans la bande (8-14 μm) (notée i), la formulation est modifiée par Idso (1981) et Oliosio (1995):

$$L_i^\downarrow = a_i(T_a) \mathbf{e}_{c,i}(T_a, e_a) \mathbf{s} T_a^4 \quad (1.16)$$

où $a_i(T_a)$ est le rapport entre la luminance dans la bande 8-14 μm et celle du spectre total. Elle prend une valeur entre 0.34 et 0.39 pour une température de l'air, T_a , entre -10°C et $+45^\circ\text{C}$. $\mathbf{e}_{c,i}(T_a, e_a)$ est définie comme l'émissivité de l'atmosphère dans cette bande spectrale:

$$\mathbf{e}_{c,i}(T_a, e_a) = 0.15 + 5.03 * 10^{-6} e_a \exp(2450/T_a) \quad (1.17)$$

Plusieurs expérimentateurs (Chen et al. 1989; Rubio et al. 1997) ont validé cette formulation. En outre ils ont introduit une variabilité directionnelle zénithale dans la luminance atmosphérique descendante:

$$L_i^\downarrow(\mathbf{a}) = L_i^\downarrow(0^\circ) \cos^{-x}(\mathbf{a}) \quad (1.18)$$

où $L_i^\downarrow(0^\circ)$ est le rayonnement atmosphérique descendant mesuré dans la direction verticale. x est un coefficient variant en fonction des conditions atmosphériques et de la bande spectrale considérée. Il prend une valeur de 0.45 pour le modèle d'atmosphère des moyennes latitudes en été (*Mid-Latitude-Summer*) dans la bande spectrale (8-14 μm).

En considérant que le rayonnement atmosphérique descendant ne présente pas de variation azimutale, nous pouvons relier la luminance du rayonnement atmosphérique descendant zénithal au rayonnement atmosphérique descendant hémisphérique dans la bande 8-14 μm par l'équation suivante:

$$L_i^\downarrow \approx 2\mathbf{p} \int_0^{\mathbf{p}/2} L_i^\downarrow(\mathbf{a}) \sin(\mathbf{a}) \cos(\mathbf{a}) d\mathbf{a} \quad (1.19)$$

Après intégration, nous avons:

$$L_i^\downarrow(0^\circ) \gg 0.25 L_i^\downarrow \quad (1.20)$$

Soit

$$L_i^\downarrow(\mathbf{a}) \gg 0.25 L_i^\downarrow \cos^{-0.45}(\mathbf{a}) \quad (1.21)$$

La figure 1.1 représente les variations de luminance du rayonnement atmosphérique descendant en fonction de l'angle zénithal incident dans la bande (8-14 μm). Pour un éclairement de 100 Wm^{-2} , la luminance varie de $25.5 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ au zénith à $44.6 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ pour un angle zénithal de 75° . Ces valeurs correspondent à des températures de brillance de -20°C et $+17^\circ\text{C}$ respectivement. Norman (1995) a trouvé que, pour des conditions de ciel clair, la luminance peut être 50% plus importante dans la direction de l'angle zénithal de 75° qu'au zénith.

Dans des conditions de ciel clair, la valeur de l'éclairement dans la bande 8-14 μm est faible. Elle est en général inférieure à 100 Wm^{-2} . Dans le cas d'une surface agricole partiellement couverte de végétation, les proportions de sol et de végétation peuvent être différentes suivant la direction de l'observation, les cas extrêmes étant de 100% de sol ou de 100% de végétation. Si le sol a une émissivité de 0.92, et la végétation de 0.96, la variation directionnelle maximale en émissivité est de 0.04, ce qui entraîne une différence inférieure à 4 Wm^{-2} en rayonnement atmosphérique réfléchi. Si le couvert présente une TB moyenne de 35°C , 4 Wm^{-2} sont équivalents à une variation de TB de 0.7°C . Une analyse approfondie peut être trouvée dans Oliosio et al. (1995).

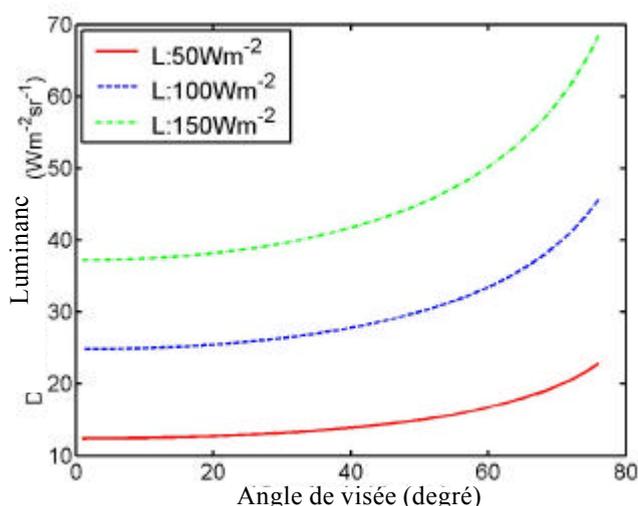


Figure 1.1 Luminance descendante de l'atmosphère claire dans la bande 8-14 μm

1.4 Principales limitations de l'information infrarouge thermique directionnelle en télédétection et questions posées dans notre recherche

Bien que la TBD mesurée par télédétection soit un indicateur intéressant pour étudier l'humidité du sol, la distribution de densité du couvert végétal, le bilan d'énergie, les changements environnementaux, etc..., son application est limitée par de nombreux facteurs perturbateurs tels que les effets atmosphériques, les effets directionnels et les difficultés de passage de la TBD à d'autres températures telles que la température aérodynamique.

Selon les conditions d'observation, l'influence atmosphérique sur la TBD mesurée par télédétection est susceptible d'être très importante. En effet, le capteur reçoit non

seulement l'émission propre directionnelle de la cible mais également celle de l'atmosphère dans la direction d'observation et le rayonnement atmosphérique descendant réfléchi par la surface. L'écart entre la TBD mesurée au niveau du capteur satellitaire ou aéroporté à 3000 m d'altitude peut être supérieur à 8K (Jacob 1999). Depuis ces deux dernières décennies, différentes méthodes ont été développées et validées pour corriger les effets atmosphériques sur la TBD acquises par des capteurs de télédétection : méthode du modèle de transfert radiatif simplifié pour des capteurs mono-bande (Prix, 1983; Li et McDonnell, 1988), méthodes de split-windows exploitant l'absorption différentielle dans deux bandes spectrales adjacentes dans la fenêtre atmosphérique (8-14 μ m) (Becker 1987; François et al. 1997), méthodes de split-windows directionnelles exploitant en plus la différence d'absorption entre deux trajets optiques (Chédin et al., 1984, Barton et al, 1992). La recherche d'une méthode optimale incluant les effets d'émissivité reste d'actualité.

En plus des effets atmosphériques, les mesures de TBD sont affectées par d'autres facteurs tels que la représentativité de la cible visée, l'influence de l'environnement, l'échantillonnage spatial, la géométrie de la mesure, l'étalonnage radiométrique et spectral du capteur, etc....

La structure géométrique d'une surface naturelle est un paramètre clé déterminant la variation directionnelle des composantes émise et réfléchie. Suivant la direction d'observation, la proportion des éléments composant la surface peut être très différente. De nombreuses études expérimentales et de modélisation ont été effectuées ces dernières années dans le domaine des courtes longueurs d'onde (visible et proche infrarouge). Des méthodologies réalistes pour mesurer et interpréter la variation directionnelle des surfaces dans les domaines du visible et du proche infrarouge sont maintenant disponibles. Cependant, dans le domaine de l'infrarouge thermique, les modèles directionnels sont peu nombreux, particulièrement pour les couverts de culture en rangs. Cela est dû d'une part à la difficulté de mesure directionnelle dans ce domaine et d'autre part à la méconnaissance de la distribution des champs de température au sein d'un couvert.

La TB doit être transformée en d'autres températures pour des applications thématiques. Dans les études de la dynamique de la planète, on utilise plutôt la température de surface (land surface température) en introduisant dans la TB une émissivité de surface composite. Pour des applications agro-météorologiques et des études de bilan d'énergie, on utilise les températures aérodynamique et radiométrique. La température de surface et les températures aérodynamique et radiométrique dépendent uniquement des propriétés de surface et sont indépendantes des propriétés du capteur. Ces trois températures peuvent être très différentes de la TBD, qui est affectée par des paramètres du capteur tels que la bande spectrale de mesure. Hall et al. (1992) ont indiqué que, dans la campagne de mesures FIFE, la différence entre la TBD et la température aérodynamique peut être supérieure à 2K. Il n'existe pas de relation simple entre la TBD et la température aérodynamique. L'établissement de la relation entre la TBD et les autres températures est un sujet de recherche actuel.

Cette thèse traite l'un des problèmes analysés ci-dessus: la variabilité directionnelle de la TB. Nous allons, dans un premier temps, concevoir et réaliser une expérimentation

sur un couvert de maïs, pour développer une méthodologie d'acquisition de haute qualité de la variation directionnelle de TBD. Dans un deuxième temps nous mettrons au point un modèle réaliste pour décrire cette variation directionnelle.

Les raisons du choix d'un couvert de maïs pour cette étude est triple: (1) c'est une culture en rangs, qui présente de fortes variations directionnelles; (2) son cycle de croissance est très court (deux mois) avec un développement de biomasse très important, qui entraîne une forte dynamique de variation directionnelle de la TBD; (3) il existe de nombreux travaux de recherche sur le couvert de maïs à la fois dans les domaines du transfert radiatif (España Boquera 1997), de la caractérisation géométrique du couvert (Prévoit et al. 1991) et dans la modélisation agronomique (Brisson etc., 1999).

1.5 Mesures multidirectionnelles de la TBD à partir de différentes plate-formes

On peut mesurer la TBD d'une surface terrestre selon différentes directions d'observation à partir d'un capteur satellitaire, d'un avion et du sol. Cela dépend des objectifs d'applications.

1.5.1 Mesures multidirectionnelles de la TBD par des capteurs satellitaires

Actuellement, les capteurs IRT satellitaires peuvent être classés en trois catégories: (1) ceux effectuant des mesures verticales ou monodirectionnelle (Landsat TM); (2) ceux effectuant des mesures dans deux directions, en général une observation verticale et une observation oblique de façon quasi-simultanée (ATSR); et (3) ceux effectuant des mesures multidirectionnelles d'une même surface à des moments ou des dates différentes (AVHRR, MODIS).

Le premier type de capteur n'effectue pas de mesure multidirectionnelle. La troisième catégorie de capteurs observe une même surface dans différentes directions à des moments différents de la journée ou à des dates différentes. Dans ce cas là, les effets temporels de la surface dominant en général les changements de température, l'observation multidirectionnelle est considérée plutôt comme un bruit dans le signal utile.

Dans l'objectif d'analyser l'information directionnelle de la TBD, seul le deuxième type de capteurs peut effectuer des mesures multidirectionnelles utiles. Un exemple typique peut être trouvé dans les travaux de François et Otlé (1994), qui ont utilisé des couples d'images ATSR en visées verticale et oblique pour déduire l'émissivité directionnelle de la surface marine.

L'avantage des mesures multidirectionnelles satellitaires est que le champ instantané (Instantaneous Field of View - IFOV) d'un pixel est extrêmement petit et nous rapproche de la définition d'un signal directionnel idéal. Mais les mesures satellitaires sont fortement perturbées par l'atmosphère avec de forts effets directionnels. A l'heure actuelle, dans le domaine de l'IRT cette technique de mesure n'est encore utilisée que de

façon marginale.

1.5.2 Mesures multidirectionnelles de la TBD par des capteurs aéroportés

La méthode aéroportée est la plus utilisée pour étudier les effets directionnels de la surface. Elle a d'abord l'avantage d'effectuer des mesures multidirectionnelles sur des surfaces de taille suffisamment petite par rapport aux études thématiques (pixel pur), dans une plage de temps relativement courte pour minimiser les effets de variation temporelle sur la surface pendant les mesures. En plus, le champ instantané correspondant à la surface élémentaire observée est assez faible. Par exemple, une taille de pixel de 20 mètres à la hauteur de vol de 500 mètres correspond à un champ instantané de 2.2° au nadir. Nous pouvons considérer que la variation des effets directionnels dans cet angle est négligeable.

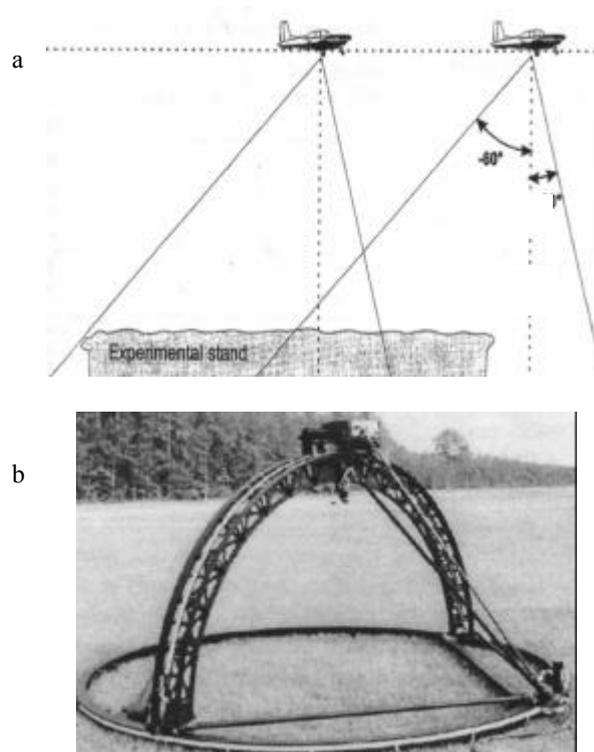


Figure 1.2 Deux méthodes pour des mesures multidirectionnelle: (a) par avion, (b) par goniomètre

Nous pouvons séparer les mesures multidirectionnelles aéroportées de la TBD en deux groupes:

Le premier groupe considère que la surface est spatialement homogène et suffisamment grande pour remplir approximativement le champ de la prise de vue d'une caméra grand

champ. Les mesures obtenues sont considérées ainsi comme des mesures instantanées d'une même surface dans toutes les directions caractérisées par le cône du champ de prise de vue (Lagouarde, 1999) (figure 1.2a);

Pour le deuxième groupe, la même surface est observée par l'avion sous différentes positions d'observation. Les mesures multidirectionnelles se réalisent par des déplacements successifs de l'avion et/ou par différents axes de vol (Jackson et al. 1979; Baret, 1999; Jacob, 1999; Gu et al. 2000) (figure 1.2b).

Les problèmes rencontrés sont principalement : (1) la validité de l'hypothèse de l'homogénéité de surface pour la première méthode, (2) la variation temporelle de la TBD de la surface pendant les acquisitions successives multidirectionnelles pour la deuxième méthode, et (3) dans les deux cas, les perturbations atmosphériques qui elles mêmes présentent des variations directionnelles, qui peuvent atteindre 1.5°C (Jacob, 1999).

Il faut noter que la méthode aéroportée est relativement coûteuse et difficile à mettre en œuvre. Il serait onéreux et compliqué d'effectuer des mesures répétitives pour un suivi temporel de la surface.

1.5.3 Mesures multidirectionnelles depuis le sol

Les mesures multidirectionnelles au sol dans des conditions naturelles sont souvent utilisées pour mettre au point et valider des modèles d'interprétation prenant en compte les effets directionnels de la TBD. Elles peuvent également servir comme vérité de terrain pour valider des mesures de télédétection satellitaires et aéroportées, ou être directement utilisées pour déduire des caractéristiques de la surface. (Kimes et al. 1981 ; Lagouarde et al. 1995, François et al. 1997 ; Kustas et al. 1999 ; Gu et al. 2000). Similaires aux méthodes de mesures aéroportées, les mesures multidirectionnelles au sol peuvent être également réalisées de deux manières : soit en observant la même surface dans différentes directions en déplaçant la position du radiomètre (figure 1.2b); soit en observant d'un poste fixe les différentes parties d'une grande surface homogène dans différentes directions (figure 1.2a).

Les mesures multidirectionnelles depuis le sol présentent plusieurs avantages. Elles sont faciles à mettre en œuvre avec des moyens matériels économiques, et peuvent être réalisées dans des conditions de surface et d'environnement bien contrôlées pour étudier les propriétés directionnelles de surfaces.

Mais elles sont aussi fortement perturbées par divers facteurs :

a) Pour obtenir une surface de mesure suffisamment grande et représentative, on est

obligé d'utiliser des radiomètres de champ important (souvent supérieur à 15°). Cela entraîne le lissage de la variation directionnelle réelle de la TBD, et la perte des fortes variations locales.

b) Dans la direction du soleil, l'ombre du radiomètre va perturber la surface visée. Combiné avec les effets de champ décrits précédemment, il est très difficile de capter les effets de hot spot;

c) Quand le radiomètre vise selon différentes directions zénithales (seconde méthode), les portions de la surface observée sont différentes. Si la surface n'est pas homogène à cette échelle, ces différences de surface visée vont produire des erreurs sur les mesures de TBD.

La plupart des chercheurs utilisent la première méthode dans leurs études. Kimes (1983) et Kimes et al. (1983) ont utilisé un dispositif similaire à celui de la figure 1.2a pour étudier la variation directionnelle de la TBD d'un couvert de coton avec un radiothermomètre de 15° de FOV monté sur un bras de 5.2 m de haut. Vining et al. (1992) ont développé une structure d'arc de 3 mètres de haut équipée de quatre radiothermomètres pour étudier une prairie. Dans une étude similaire réalisée par Lagouarde (1995), deux radiothermomètres de 35° de FOV ont été utilisés à une distance de 2 mètres de la surface visée.

Bien que la deuxième méthode soit déjà utilisée dans des observations multidirectionnelles aéroportées, son utilisation au sol a été seulement suggérée par Walthall et al. (2000). A ce jour, il n'existe pas encore d'étude publiée utilisant cette méthode.

1.6 Modélisation de la variation directionnelle de la TBD des couverts en rangs

1.6.1 Les différents modèles de variation directionnelle de TBD des couverts en rangs

Les modèles décrivant la variation directionnelle de la TB des couverts en rangs peuvent être classés en quatre catégories:

- a) des modèles optiques et géométriques (Geometric-Optical Model - GO model);
- b) des modèles hybrides combinant les modèles GO et des éléments de transfert radiatif (Radiative Transfert - RT, GORT);
- c) des modèles basés sur des simulations numériques de type Monte Carlo;
- d) des modèles "kernel" adaptés des modèles BRDF du domaine visible - proche infrarouge.

Modèles optiques et géométriques (Geometric-Optic Model - GO model)

C'est le modèle le plus simple développé pour décrire la variation directionnelle essentielle d'un couvert en rangs. Jackson et al. (1979) ont publié un des premiers modèles GO pour des couverts en rangs. Il a été ensuite validé et appliqué par Kimes et

al. (1982, 1983) sur un couvert de coton. Ce modèle considère que le couvert en rangs est composé d'une série de rangs de végétation opaques intercalés avec des bandes de sol nu. Il distingue quatre composantes caractérisées par leur TB: sol éclairé et à l'ombre, végétation éclairée et à l'ombre. Il n'existe pas de variation de température entre les éléments d'une composante. Le modèle calcule les poids relatifs de chaque composante dans les différentes directions d'observation du plan vertical perpendiculaire à la direction du rang. Il en déduit la température composite dans les directions considérées en calculant la valeur de la moyenne pondérée à partir de ces poids relatifs et des températures des composantes. Ce modèle peut être inversé pour estimer les températures des composantes, avec la connaissance des paramètres géométriques du couvert et des directions du soleil et de l'observation.

Modèles hybrides combinant modèles GO et éléments de transfert radiatif – (GORT)

Kimes et al (1981) ont développé un modèle hybride GORT dans le domaine de l'infrarouge thermique en prenant en compte le transfert radiatif à l'intérieur et au dessus du couvert végétal. Le couvert est composé de trois couches de végétation horizontales indépendantes dans lesquelles les bilans d'énergie sont étudiés. Le modèle utilise comme paramètres d'entrée, l'indice foliaire (essentiellement le LAI), la distribution de l'angle d'orientation des feuilles (LID), la fonction de la fraction de trous, et les coefficients de bilan d'énergie. En sortie, il délivre la température de brillance composite du couvert ainsi que celles de trois couches considérées. Prévot (1985) a amélioré ce modèle GORT de Kimes (1981) pour décrire la variation directionnelle d'un couvert de maïs en prenant en compte la diffusion multiple entre les couches. D'autres études ont été publiées sur les modèles GORT en y introduisant un peu plus de complexité géométrique ou en considérant d'autres types de couverts végétaux (Heilman et al. 1981; Smith et al. 1981; Sader 1986 ; Percent et al. 1988; McGuire et al. 1989)

François et al. (1997) ont adapté le modèle de Prévot (1985) pour interpréter la variation directionnelle de TB. Ils considèrent que le couvert est composé des deux composantes sol et végétation, qui sont caractérisées chacune par une température thermodynamique et une émissivité directionnelle. La TBD résulte de la somme pondérée de ces deux températures. Les coefficients de pondération sont le produit de l'émissivité de chaque composante et de sa fraction de trous directionnelle, qui elle-même est une fonction de l'indice foliaire et de la direction zénithale d'observation. Un des principaux avantages de ce modèle est qu'il est inversible. L'inversion réalisée avec des observations bi-angulaires (à 0 et à 55°) a donné des estimations des températures de composante avec une incertitude de 0.5K.

Modèles 3D: maquettes basées sur des simulations numériques de type Monte-Carlo

Récemment, plusieurs modèles basés sur la simulation numérique (maquettes informatiques) ont été développés pour décrire la structure géométrique 3D des couverts végétaux. Avec une description préalable des propriétés optiques et radiométriques des éléments dans la structure 3D et les méthodes de transfert radiatif du type "tracé de rayon" et "radiosité", on arrive à simuler les comportements radiométriques composites

du couvert, y compris ses variations directionnelles (Smith et al. 1997; Gastellu-Etchegorry et al. 2001; Dauzat et al. 2001; Luquet 2002, Guillevic, 1999).

Modèles "kernel" adaptés des modèles BRDF du domaine visible - proche infrarouge

Les modèles "kernel" sont les plus utilisés dans le domaine visible – proche infrarouge. Ils sont en général issus de la simplification mathématique des modèles de transfert radiatif complexe. Un exemple typique est l'étude de Snyder et al. (1997, 1998), qui a adapté plusieurs modèles "kernel" de BRDF (modèles géométriques des plantes "sphériques" du type arbre, modèles turbides volumiques du type blé et modèles de surfaces hétérogènes avec des effets spéculaires) pour décrire la variation directionnelle de la TBD du couvert.

Limites des modèles existants pour des couverts en rangs et nécessité de nouveaux modèles

Nous voyons que dans la revue des modèles existants, deux effets ont été pris en compte pour décrire les variations directionnelles de la TB des couverts en rangs : la structure géométrique en rangs et la distribution de la fraction de trous à l'intérieur de la végétation. Mais les modèles GO développés par Jackson et par Kimes n'ont pas pris en compte cette distribution de la fraction de trous à l'intérieur de la végétation. Les différents modèles GORT ont centré leurs efforts essentiellement sur l'amélioration du transfert radiatif à l'intérieur de la végétation, et n'ont pas considéré des couverts en rangs. Les modèles "kernel" peuvent être considérés comme des versions mathématiques simplifiées des modèles GORT, et présentent les mêmes limites.

Les modèles basés sur des maquettes informatiques peuvent au contraire intégrer ces deux effets, mais la description précise de la structure 3D d'un couvert nécessite un grand nombre de paramètres d'entrée difficilement accessibles, qui rendent souvent impraticable l'application de ce type de modèle.

Il apparaît ainsi important d'intégrer les considérations des modèles GO et celles de GORT, et de construire un modèle simple et inversible applicable aux couverts en rangs. Une autre amélioration souhaitable serait l'introduction des effets de hot-spot dans les modèles GO et GORT existants.

1.6.2 Fraction de trous des surfaces partiellement couvertes de végétation

La fraction de trous est l'un des paramètres clé des calculs de transfert radiatif. Elle est la probabilité avec laquelle la lumière traverse la végétation principale du couvert sans être interceptée par les éléments de cette végétation (feuilles, branches et tiges). Dans le cas d'un couvert de culture, on peut considérer qu'elle est la fraction relative de sol observé au travers du couvert. Au niveau du transfert radiatif, elle détermine le poids relatif de la contribution des éléments d'arrière-plan (le sol en général) par rapport à la végétation principale (feuilles, branches et tiges) dans le signal composite issu de l'observation du couvert.

L'étude de la fraction de trou dans les couverts végétaux remonte à plus de 30 ans. En 1971, Nilson a présenté une analyse théorique de la fraction de trou pour un milieu turbide et homogène. Il suppose que le couvert est composé de nombreuses couches de petites feuilles indépendantes de distribution aléatoire. L'atténuation de rayonnement dans chaque couche est caractérisée par une fonction de Poisson, ou du type binôme positif ou négatif. La fraction de trou finale est représentée par une fonction exponentielle négative de l'indice foliaire (LAI). Norman et al. (1983) ont ensuite validé cette relation.

Li et al. (1988) ont amélioré l'expression de la fraction de trous pour des couverts discontinus comme la forêt ou la savane. Ils conservent l'expression exponentielle négative, mais en fonction de la longueur totale du trajet optique, au lieu de l'indice foliaire. Des améliorations ont été ensuite apportées par d'autres études (Chen et al. 1992, 1995).

1.6.3 Effet de hot-spot dans les modèles BRDF

Quand on observe une surface dans la direction d'incidence du Soleil (ou antispéculaire), elle paraît généralement plus lumineuse que dans les autres directions. Cela est dû au fait que dans cette direction, tous les éléments visibles sont éclairés directement par le Soleil. Cela est encore vrai dans le domaine tellurique du spectre, et en particulier dans l'IRT, car les éléments éclairés sont aussi les plus chauds. Cette luminance décroît très rapidement dès que l'observation s'écarte de cette direction privilégiée. On appelle hot-spot la tache lumineuse plus intense ainsi observée dans un diagramme directionnel, dans la direction d'incidence du Soleil.

Beaucoup d'études ont été réalisées sur l'effet de hot-spot dans les domaines visible et proche infrarouge (Chen et al. 1997). Dans le domaine de l'infrarouge thermique, ce phénomène a été mis en évidence par Lagouarde et al. (2000). L'amplitude de l'effet et le diamètre apparent correspondant dépendent des structures géométriques macroscopique et microscopique de la surface observée.

Suivant les caractéristiques du transfert radiatif et les applications, les modèles de hot-spot peuvent être classés en quatre catégories (Qin et al. 1995): (1) les modèles issus des analyses statistiques de trou (Gap Statistic Analysis - GSA) applicables pour des couverts homogènes et continus (prairie, végétation dense); (2) les modèles de hot-spot optiques et géométriques (GOHS) applicables pour des couverts discrets (forêts ouvertes et bois); (3) les modèles hybrides plus généraux combinant GSA et GOHS; (4) les modèles mathématiques issus de la simulation numérique.

Parmi ces quatre types de modèles, les modèles GSA sont les plus simples. Ils sont basés sur le calcul de la corrélation statistique entre les fréquences de trou dans la direction du soleil et celle de l'observation. Parmi les modèles existants, celui de Kuusk (1985) est très simple et facile à utiliser. La fonction de hot-spot prend la forme exponentielle suivante:

$$Ht = \exp(\mathbf{t}l_s \mathbf{d}) = \exp(\mathbf{t}l_s \frac{1 - \exp(-kl_{sv})}{kl_{sv}} \sqrt{\frac{l_v}{l_s}}) \quad (1.22)$$

où t est l'épaisseur optique du couvert ; δ est le paramètre de corrélation (l_s et l_v) ; l_s et l_v sont les chemins optiques dans la végétation $k = s^{-1}$, s étant la dimension foliaire, l_{sv} est la variation des chemins selon les directions de visée et du Soleil :

$$l_{sv} = \left| \vec{l}_v - \vec{l}_s \right| = \sqrt{l_v^2 + l_s^2 - 2l_v l_s \cos \mathbf{x}} \quad (1.23)$$

où $\cos \mathbf{x}$ est la variation directionnelle entre la direction du Soleil et celle de l'observation :

$$\cos \mathbf{x} = \cos \mathbf{q}_s \cos \mathbf{q}_v + \sin \mathbf{q}_s \sin \mathbf{q}_v \cos(\mathbf{j}_v - \mathbf{j}_s) \quad (1.24)$$

où $\mathbf{q}_s, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v, \mathbf{j}_s$ sont les angles zénithaux et azimutaux du soleil et de la visée respectivement.

1.7 Conclusion

La variation directionnelle de la TB présente un grand intérêt dans de nombreuses applications telles que les études climatiques et environnementales, l'évaluation des états énergétiques et hydriques des surfaces agricoles, l'identification des surfaces etc.... Par rapport à un couvert homogène quasi turbide, la variation directionnelle de la TBD d'un couvert en rangs est très complexe, et est sensiblement affectée par sa structure. Depuis les travaux de Jackson en 1979, de nombreuses études se sont succédées à la fois dans le domaine de la méthodologie des mesures multidirectionnelles et dans les domaines de la modélisation et des applications. Cependant, à l'heure actuelle, de nombreuses questions nécessitent encore des études avancées : (1) comment réaliser des mesures multidirectionnelles précises et opérationnelles de la TBD sur les couverts en rangs ? (2) comment varie le comportement directionnel de la TBD en fonction de la croissance du couvert, de la position du Soleil, etc.... ? et (3) comment modéliser la variation directionnelle de la TBD d'un couvert en rangs ?

Les mesures multidirectionnelles de la TBD peuvent être réalisées par des capteurs satellitaires ou aéroportés et au moyen de capteurs au sol. Actuellement nous pouvons considérer qu'il n'existe pas encore de vraies mesures multidirectionnelles satellitaires pour la caractérisation des surfaces. Les mesures aéroportées sont relativement efficaces, mais il faut noter qu'elles sont onéreuses et lourdes à mettre en œuvre. Il serait très coûteux et difficile d'effectuer des mesures à forte répétitivité temporelle pour assurer un suivi temporel de l'évolution d'une surface. La méthode des mesures multidirectionnelles au sol est une méthode particulièrement adaptée à l'étude des couverts dans des conditions de surface et environnementales bien contrôlées, avec une très forte répétitivité temporelle.

Dans les études publiées sur les méthodologies de mesures au sol, des radiomètres à

grand champ d'ouverture (souvent supérieurs à 15°) ont été utilisés pour obtenir une grande surface visée. La variation directionnelle réelle est ainsi lissée, ce qui ne permet pas d'observer les variations directionnelles relatives à de faibles variations de direction (par exemple le hot-spot). De plus, l'échantillonnage directionnel est généralement limité à quelques angles zénithaux et quelques plans azimutaux, ce qui ne permet pas une description complète de la variabilité directionnelle de la TBD de la surface.

Dans le domaine de la modélisation, les modèles peuvent être classés en quatre catégories: (1) modèles géométriques et optiques (GO); (2) modèles hybrides (GORT) combinant les modèles GO et le transfert radiatif (RT); (3) modèles numériques; et (4) modèles "kernel" déduits des modèles BRDF du domaine visible et proche infrarouge. Cependant, peu d'études ont été réalisées pour les couverts en rangs, prenant en compte à la fois l'aspect géométrique particulier du rang et le transfert radiatif au sein de la végétation.

A partir des constats précédents, nous définissons les objectifs d'étude de la thèse de la façon suivante :

- mettre au point une méthodologie optimale pour mesurer la variation directionnelle de la TBD d'un couvert en rangs, dans le cas d'un champ de maïs, et faire un bilan des erreurs associées ;
- comprendre et analyser la dynamique de la variation directionnelle de la TBD d'un couvert de maïs à différents moments de la journée et à différents stades de croissance du couvert ;
- développer un nouveau modèle combinant des considérations sur la structure en rangs et sur le transfert radiatif au sein de la végétation.

Deuxième Partie

Acquisition et analyse de la TBD d'un couvert de maïs

Chapitre 2

Dispositif expérimental et prétraitement de données

2.1 Introduction

Une expérimentation a été menée de mai à août 1999 sur un champ de maïs de la station agronomique de l'INRA d'Avignon en France. Un des objectifs de l'expérimentation était de mettre au point une méthode de mesure in situ optimale pour l'acquisition des TBD de rangs de maïs. Un autre objectif était de décrire et d'expliquer les TBD observées et surtout d'évaluer les facteurs qui déterminent les caractéristiques de ces TBD.

Les mesures de réflectances par une caméra visible et proche infrarouge, de distribution spatiale des TB et de TBD ont été réalisées par le groupe composé de Jean-François Hanocq, Roland Bosseno, Xingfa Gu et moi-même. Ces données entrent dans l'évaluation de la mesure, le développement du modèle et les applications initiales.

Depuis que Jackson et al. (1979) essayèrent de mesurer et d'analyser la TBD sur une végétation incomplètement structurée en rangs en utilisant des capteurs aéroportés ou satellitaires, plusieurs méthodes expérimentales ont été proposées par Kimes (1983a, 1982b), Kustas et al. (1990), Lagouarde (1995), Sandmeier (2000), Jacob (2000). Les capteurs ont eux aussi été améliorés en termes de précision radiométrique et d'analyse spectrale de la mesure etc.... Cependant, si les mesures ont évolué en utilisant un champ stable pour les mesures et l'extraction de la TBD, leurs sélections ont été seulement basées sur des expériences ou un calcul simple de la taille de la cible. Pour la mesure au sol, on a utilisé un champ large, pour la mesure aéroportée un champ étroit a été jugé plus adéquat. Les erreurs associées à ces différents champs n'ont pas été évaluées. Une description détaillée des critères d'échantillonnage peut être trouvée dans Sandmeier (2000).

Les caméras thermiques numériques sont considérées comme optimales pour les études de TBD. Elles permettent une grande flexibilité dans le choix des protocoles de mesures et d'échantillonnage. Contrairement au radiomètre, elles permettent de séparer la mesure et l'échantillonnage en deux processus distincts. De la mesure on peut extraire l'information directionnelle des images qui ont une grande couverture spatiale ce qui permet donc d'obtenir un jeu haute résolution d'angles de vue. Avec le traitement des données, on peut choisir un échantillonnage en fonction de l'hétérogénéité de surface de la cible, des changements dans l'environnement, etc.... Nous profiterons de ces

avantages pour réaliser un échantillonnage optimal de ce type de structure en rangs qui comporte deux niveaux d'hétérogénéité, l'un dû à la périodicité spatiale des rangs, l'autre aux différences de densité de la végétation.

Dans ce chapitre, nous décrivons nos cibles de mesure, les instruments et les types de mesures qui ont servi à l'extraction des TBD dans l'IRT au moyen d'un capteur multi-angulaire composé par l'association d'une caméra et d'une grue. A la différence des mesures classiques depuis le sol, la caméra située à au moins 10 fois la hauteur du maïs, nous fournit des images à haute résolution spatiale qui rendent possible la sélection de différents types d'échantillonnage. Le principe de la mesure y est aussi présenté. Les corrections radiométriques et géométriques du système sont discutées en suivant les analyses détaillées de Lagouarde et al. (2000) et de Jacob (2000). Nous nous sommes assurés que ce système est efficace dans la collecte d'une information représentative de la distribution angulaire pour une période de courte donnée. En outre, les images thermiques pour différentes directions de visée ont été obtenues pour différentes hauteurs de la caméra afin d'étudier les effets de champ. De plus les mesures ont été utilisées pour évaluer les effets perturbateurs sur la mesure de la TBD au sol, tels que les effets du champ de visée, les effets de l'hétérogénéité spatiale, les turbulences microclimatiques. Une liste des différents types de mesures est présentée pour terminer.

2.2 Site expérimental et instruments

2.2.1 Site expérimental

Le site expérimental est situé à Avignon, dans l'enceinte de la station agronomique de l'INRA (à 43°57'N de latitude, 4°5'E de longitude et 24 m d'altitude). Cette région du sud-est de la France est caractérisée par un vent du nord prédominant canalisé par la vallée de Rhône (le Mistral). La vitesse du vent peut dépasser 50 km/h au printemps et en début d'été. C'est un avantage pour étudier l'influence du vent sur les variations angulaires de la température de surface. Cependant les jours sans vent ou avec vent faible sont assez rares pendant la période de mai à août. Il faut donc prendre des précautions pour réaliser des mesures pour lesquelles l'influence du vent est un inconvénient.

Les mesures ont été effectuées dans une parcelle de 150 mètres de long dans le sens nord - sud, et de 100 mètres de large dans le sens est-ouest. (Figure 2.1). Les rangs étaient orientés approximativement selon un axe nord-sud. Le champ a été irrigué une fois par semaine en juin et août et deux fois par semaine durant juillet, avec des apports de 20 mm d'eau.

C'est un maïs (mays *Zea L*) de la variété DK-604, qui a été planté le 10 mai 1999: jour julien 130 (JJ 130) avec une distance inter rangs de 80 cm et une densité de 91000 plantes par hectare, soit 9,1 plantes par m².

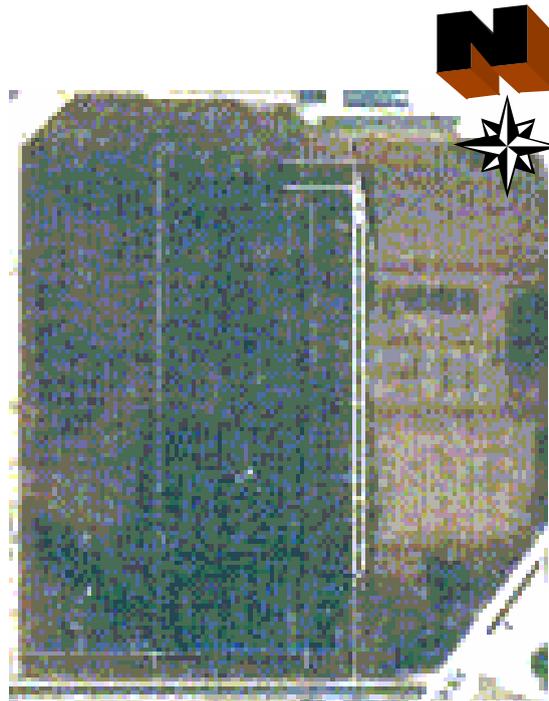
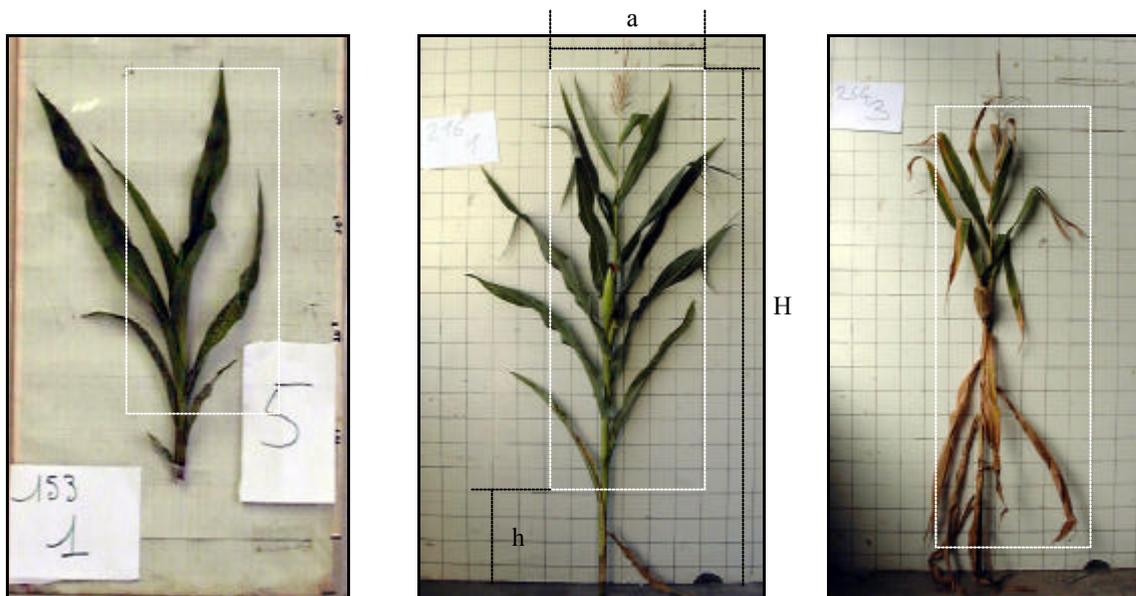


Figure 2.1 Le champ de maïs du site expérimental: les deux lignes blanches verticales parallèles sont les rails de la grue (image prise par une caméra vidéo à bord d'un petit avion).

L'expérience a duré presque trois mois de la fin mai à début août. Elle a couvert les premiers stades physiologiques de la croissance de la plante : le stade végétatif, le stade reproducteur, et la période de remplissage du grain. La période végétative (figure 2.2a) commence avec la germination du grain au mois de mai et arrive à 8 feuilles au début juin (JJ 153: 2 juin. Approximativement dix jours après les semences, la première feuille commence à apparaître si la température du sol reste continuellement au-dessus de 10 °C. Jusqu'à ce que la huitième feuille soit développée, la croissance du maïs est assez lente. La période de reproduction (figure 2.2b) commence avec la différenciation des organes mâles et femelles. Une fois la fleur mâle développée, toutes les feuilles ont terminé leur croissance et la hauteur maximale de la plante est atteinte. Peu après la fleur femelle apparaît et la fécondation peut avoir lieu. Pendant cette période, la plante croît plus rapidement ce qui conduit à une grande hétérogénéité dans la géométrie du maïs et dans la densité de biomasse. Le stade de remplissage (figure 2.2c) peut être divisé en deux phases : d'abord le développement du tissu et la division des cellules, puis l'accumulation d'amidon et la déshydratation des grains jusqu'à maturation complète (Combe et al. 1994). Pendant cette période, la géométrie évolue peu et la biomasse reste stable.



(a) maïs au stade de la huitième feuille (JJ 153)

(b) maïs au stade de la floraison (JJ 216)

(c) maïs au stade de la sénescence (JJ 264)

Figure 2.2 Photographies des trois stades caractéristiques de la croissance du maïs. Les rectangles en pointillés représentent la partie de la plante utilisée dans le modèle. La grille a une maille de 0.1 mètre.

2.2.2 La caméra infrarouge thermique INFRAMETRICS - 760

La caméra IRT employée pour mesurer la TB du couvert est une caméra INFRAMETRICS Model 760. Un capteur équipé d'un objectif grand angle donne des images en exécutant un double balayage, horizontal et vertical. Les spécifications sont présentées au tableau 2.1.

La caméra se compose de trois parties incluant, le système de balayage et de mesure, le système de contrôle et le système d'enregistrement. Le rayonnement entre par l'objectif et est dévié horizontalement et verticalement par le miroir du scanner, puis est absorbé et transformé en signal électronique par le détecteur semi-conducteur. Le système de contrôle comporte des fonctions pour traiter, digitaliser, reformater les signaux IRT pour leur visualisation ou leur exportation. En outre, un microprocesseur effectue un calibrage interne pour compenser les effets de température interne de l'appareil, de l'installation de lentilles différentes, ou de la modification des réglages. Le microprocesseur prend en charge chaque pixel de l'image, et calcule des températures correspondant au tableau d'étalonnage choisi par l'utilisateur. Les signaux numériques étalonnés sont convertis en données analogiques qui peuvent être enregistrées sur des bandes vidéo de 8 mm avec une fréquence de 25 Hz. On peut ensuite les numériser et afficher des images de 384x288 pixels en niveaux de gris avec une fréquence d'échantillonnage de 1 Hz (Lagouarde et al. 2000; Jacob 2000). Pendant la campagne de mesures, les signaux analogiques ont été transmis en temps réel à un ordinateur et ré-

échantillonnées en images de 255 lignes et de 367 colonnes par une carte avec une fréquence d'échantillonnage de 6Hz.

Table 2.1 Caractéristiques de la caméra INFRAMETRICS Model 760

Paramètre	Valeur
Canaux	7.25 μm à 13.25 μm
Détecteur	HgCdTe (température de fonctionnement 77 K)
Différence minimum typique de température détectable (à 30 °C)	0.1 °C
différence de température induite par le bruit (à 30 °C)	< 0.1 °C (pour une prise de vue);
Précision	< 0.05° C en moyennant sur 16 prises de vue (16 views) ±2 °C ou ±2% avec l'étalonnage standard +-0.5 °C après étalonnage spécifique
Fréquence de balayage	7812 Hz Horizontale; 50 Hz Verticale
Fréquence de sortie	15625 Hz Horizontale; 50 Hz Verticale
Gamme de température mesurable	-20 à 400 °C
Angle de l'objectif	Largeur: 37.94°+33.52° = 71.46° Hauteur: 26.00°+29.26° = 55.26°

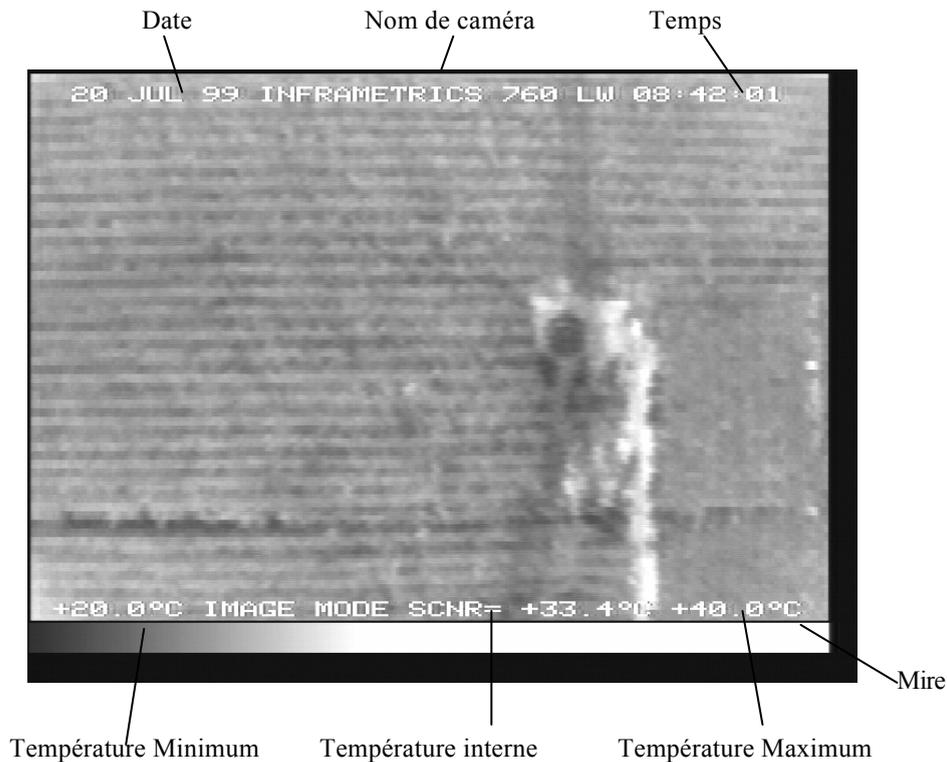


Figure 2.3 Exemple d'image obtenue avec la caméra.

La figure 2.3 présente un exemple d'image obtenue avec la caméra. La TB y est représentée en niveaux de gris dont l'échelle apparaît en bas de l'image. Les informations sur les réglages, sur le mode opératoire et sur le système secondaire de paramètres sont affichées séquentiellement et mises à jour toutes les 1.5 secondes, juste au dessus de l'échelle de niveaux de gris. Les valeurs de SCNR apparaissent toutes les 24 secondes.

2.2.3 Le système de mesure caméra-grue

Un système de mesure (Figure 2.4) développé par l'INRA d'Avignon en France, a été utilisé pour étudier l'effet de l'angle de visée sur la TB d'un champ de blé. En plus de la caméra thermique Inframetrics 760, que nous venons de décrire, le système est composé d'une grue, d'une plateforme multidirectionnelle et d'une unité de contrôle.



Figure 2.4 Le système de mesure: grue, plate-forme et caméra.

La grue a été modifiée pour réaliser des mesures de couvert au-dessus de la parcelle. Les rails qui ont une longueur de 110 mètres sont situés à l'est de la parcelle et sont orientés nord-sud parallèlement aux rangs de maïs (figure 2.1). La grue peut se déplacer le long des rails avec une vitesse de 0.45 m/s et peut s'arrêter à n'importe quel endroit. Sa flèche de 24 mètres de long se situe à 20 mètres au dessus du sol, elle peut pivoter sur 360° et s'arrêter dans n'importe quelle direction.

La plateforme multidirectionnelle qui porte la caméra peut se déplacer horizontalement le long de la flèche et verticalement. La caméra peut viser la cible d'une hauteur variant entre 1 et 20 mètres et peut donc simuler des mesures goniométriques ou aéroportées. En outre, la plateforme est conçue pour donner à la caméra jusqu'à 45° d'inclinaison et

permettre 360° de rotation autour du pivot de plateforme. Avec l'aide de l'objectif grand angle et de la plateforme multidirectionnelle, la caméra peut parcourir le champ entier sans changer de place. Pendant les mesures, l'inclinaison réelle et l'azimut de la caméra sont mesurés par des capteurs et enregistrés avec une précision de 0.1°.

Toutes les opérations de l'ensemble (grue, plateforme, caméra), sont contrôlées par une unité grâce à laquelle la caméra peut enregistrer rapidement toutes les informations angulaires avec une précision géométrique élevée.

2.3 Méthodes expérimentales pour acquérir la TBD et la TB des composantes (TBC) en utilisant le système caméra-grue

Le système caméra-grue nous fournit un large choix dans la sélection de TBD, de TB et de géométrie du couvert, par rapport à la distribution spatiale de ces paramètres. Il peut permettre d'acquérir des mesures de TB du sol nu ou des feuilles, comme le permet un radiomètre thermique, ou bien des mesures intégrales des caractéristiques de TBD comme avec un goniomètre de terrain pour une même cible, ou même l'observation de différentes zones d'une parcelle comme avec un système de capteur aéroporté.

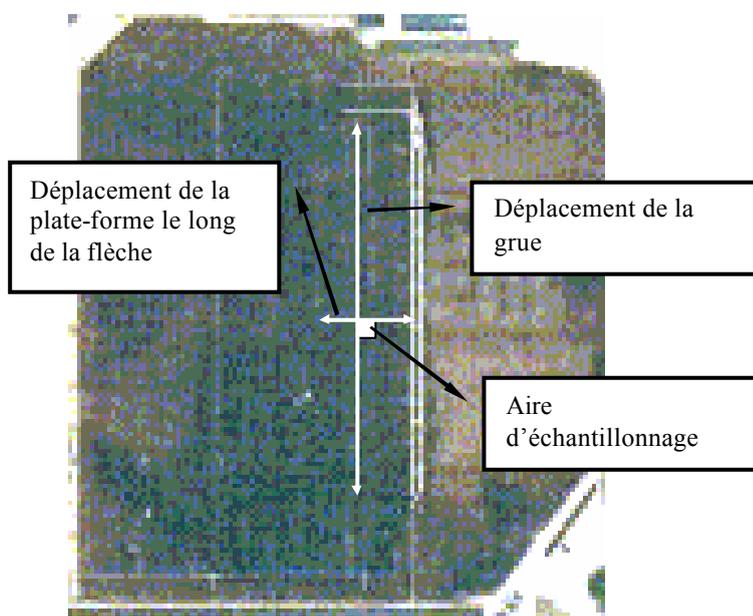


Figure 2.5 Possibilités d'observation dans différentes directions d'une même aire d'échantillonnage offertes par la grue.

En général on a appliqué l'une des quatre méthodes suivantes pour mesurer la TBD: (1) observation d'une même surface sous des angles différents en déplaçant la grue et la

plateforme et en laissant toujours la caméra dirigée vers la cible (Figure 2.5); (2) observation de surfaces différentes en faisant pivoter la caméra sans déplacer la grue (Figure 2.6); (3) observation de différentes parties du champ sous des angles différents en déplaçant la grue le long du rail (Figure 2.7); (4) mouvement de rotation de la caméra dans un plan perpendiculaire aux rangs de maïs afin d'effectuer un balayage de la parcelle.

Avant de commencer les mesures en utilisant la première méthode, un cadre carré en aluminium est placé dans le champ, de dimension $1.6 \times 1.6 \text{ m}^2$, correspondant au double de l'espacement entre deux rangs de maïs voisins. Avec une faible émissivité (0.04), ce panneau est contrasté et présente des bords nets par rapport au couvert. Deux côtés du cadre sont parallèles à la direction des rangs. Le cadre est à environ 11 mètres des rails de la grue, et à peu près à la verticale du milieu de la flèche. La plateforme est toujours dirigée vers le cadre, tandis qu'elle se déplace vers l'ouest le long de la flèche. On observe la cible sous différents angles dans un plan perpendiculaire aux rangs, la gamme des angles zénithaux étant comprise entre $\pm 30^\circ$. Ensuite on place la plateforme au milieu de la flèche. La grue avance le long du rail et fournit des images de la cible selon un plan de visée parallèle aux rangs, la gamme des angles de visée est comprise entre $\pm 70^\circ$. L'avantage de cette méthode est que l'aire d'échantillonnage est toujours la même, que la taille et les plantes qui se trouvent à l'intérieur du cadre ne changent pas. Cependant il est difficile avec cette méthode d'obtenir d'autres angles de visée. La gamme d'angle de visée dans un plan perpendiculaire aux rangs est seulement de $\pm 30^\circ$ ce qui n'est pas assez pour une mesure in situ. Un autre inconvénient de cette méthode est qu'elle prend beaucoup de temps comparée aux autres méthodes.

La figure 2.6 montre les surfaces que la caméra peut atteindre en utilisant la deuxième méthode. La grue a été positionnée au milieu du rail. La plateforme, montée au bout de la flèche de la grue dirigée perpendiculairement à la direction des rails permet de positionner la caméra au-dessus du champ. Celle-ci peut en conséquence observer l'ensemble du champ. Elle est placée verticalement pour observer en premier sa projection au sol. Après 20 secondes de mesures, on incline la caméra vers le sud jusqu'à 45° ce qui permet d'obtenir une gamme d'angles zénithaux de 10° à 75° vers le sud avec un recouvrement de 20° au nadir avec la première image. Cette direction est conservée pendant 20 secondes, puis la plateforme tourne autour de son axe vertical en direction de l'ouest. Donc la caméra peut enregistrer les températures pendant 20 autres secondes dans une gamme d'angle d'observation de 10° à 75° vers l'ouest. Il y a là encore une région commune avec les images au nadir. De la même façon, la caméra observe ensuite le nord puis l'est et acquiert les images dans un ordre adéquat. Finalement, des images ont été acquises de cinq directions différentes qui couvrent toutes les valeurs entre 0° et 75° pour les angles de visée zénithaux et entre 0° et 360° pour les angles de visée azimutaux, couvrant un champ d'angle solide de 1.5π ce qui correspond en théorie à toute la parcelle d'expérimentation. Il faut noter qu'à cause de l'ombre des rails, les images pour les observations vers l'est doivent avoir un angle zénithal d'observation inférieur à 30° . En utilisant cette méthode, la durée totale des mesures est d'environ 4 minutes. Pendant ce temps le Soleil s'est déplacé d'un degré dans le plan de son mouvement apparent, d'où des variations en angle zénithal et azimutal de cet ordre de grandeur.

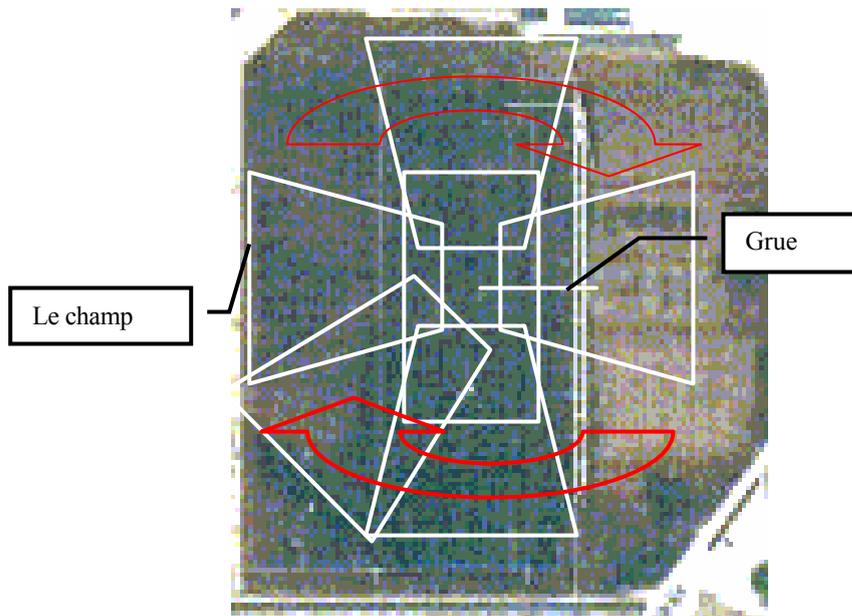


Figure 2.6 Observation de différentes parties du champ en effectuant une rotation de l'ensemble (plate-forme, caméra) sans déplacer la grue ni sa flèche.

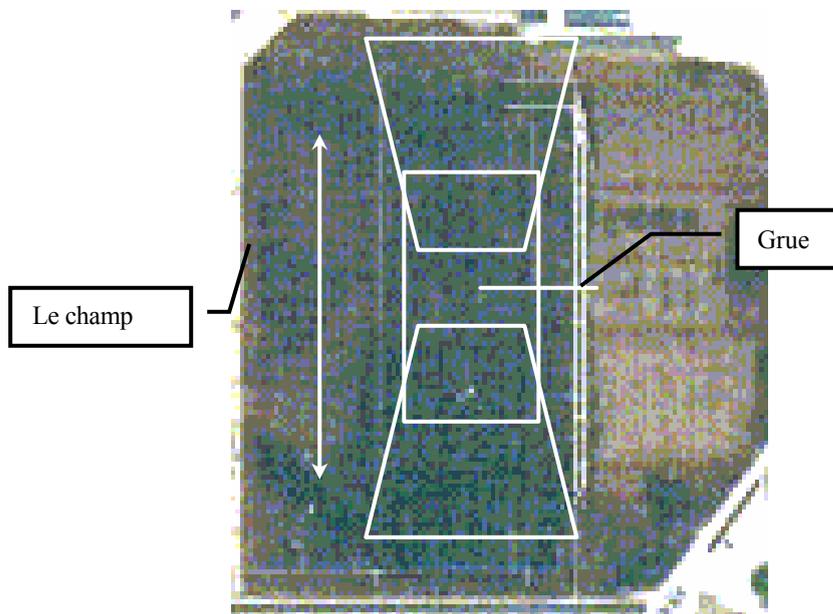


Figure 2.7 Observations répétées de différentes parties du champ en déplaçant la caméra et la grue.

La troisième méthode (Figure 2.7) permet à la caméra de viser différentes parties du champ avec le même angle de visée. D'abord, la grue est placée à l'extrémité nord du rail, la caméra est inclinée à 45° vers le sud. Grâce au déplacement de la grue du nord vers le sud, la caméra peut balayer une partie rectangulaire du champ. Dans une série d'images, un pixel donné est vu sous le même angle dans chaque image (mais il représente des éléments différents de la parcelle). Puis la caméra est inclinée à 45° vers le nord, la grue se déplace du sud au nord. Enfin la caméra observe le couvert verticalement, la grue est à nouveau déplacée du nord au sud. Cette méthode est celle des mesures aéroportées (Lagouarde et al. 2000). En effectuant des mesures IRT à des emplacements différents et à des instants d'acquisition différents, cette intégration spatiale de la cible réduit l'influence des variations temporelles et de l'hétérogénéité spatiale. Cette méthode peut être appliquée pour évaluer l'hétérogénéité du champ, et pour les mesures de TBD. Cependant, pour trois inclinaisons de la caméra cette méthode prend au minimum 12 minutes) à cause du déplacement lent de la grue, ce qui est plus long qu'avec la deuxième méthode. Ceci peut donc être un handicap pour le suivi de la TB du couvert.

La dernière méthode peut être utilisée pour toute hauteur de mesure car le principe est différent. D'abord la caméra s'oriente dans la direction perpendiculaire aux rangs, puis est déplacée le long de la flèche de la grue qui est orientée perpendiculairement à la direction des rangs. Avec une haute fréquence de prise d'images, une série de scènes est obtenue avec le mouvement de l'ensemble (plateforme, caméra). Un pixel donné est vu sous le même angle dans chaque image, en principe on doit couvrir toutes les conditions d'angles de visée si le nombre de pixels est suffisant. La valeur moyenne des pixels pour une même direction dans chaque image a été ensuite calculée pour représenter la TBD dans cette direction. Parce que le champ instantané de chaque pixel est très petit, cette méthode présente une grande précision directionnelle. En changeant l'inclinaison de la caméra on peut réaliser des observations sous d'autres angles de visée. Cette méthode est limitée par le volume des données à acquérir. Avec une haute fréquence de prise de vue et une observation sur une longue distance pour obtenir l'information IRT optimale pour chaque condition, la production de données est très grande. De plus, les effets d'ombre causés par l'instrument deviennent un inconvénient. Pour couvrir une grande gamme d'angles de visée, la hauteur de la caméra est réduite et une grande partie de la cible est couverte par l'ombre de l'instrument. Il faut 8 minutes au moins pour réaliser ce type de mesures. Toute mesure qui nécessite un déplacement de la grue ou de la plateforme augmente notablement le temps de mesure.

Ces quatre méthodes ont été évaluées pour extraire la TBD du couvert. La deuxième méthode offre une large gamme d'angles d'observation et prend peu de temps, elle a donc été largement utilisée pour la mesure des TB du couvert lors de l'expérimentation. Les autres méthodes demandent plus de temps pour chaque observation angulaire, ce qui amène des biais importants à cause du changement des conditions au cours du temps. Ce seront donc des méthodes peu utilisées pour mesurer la TBD du couvert.

Le système caméra-grue permettra d'étudier la distribution spatiale de la géométrie du couvert et des TB. En réduisant la hauteur de la caméra, la taille du pixel diminue rapidement. Pour une hauteur de la caméra de 2 m, la dimension du pixel à la verticale ne dépasse pas 1 centimètre ce qui permet d'étudier les variations de température entre

les parties de sol ou de plante à l'ombre ou exposées au Soleil. Avec cette haute résolution spatiale on peut aussi utiliser les images thermiques pour mesurer les dimensions des plantes et les distances les séparant.

2.4 Pré-traitement de données

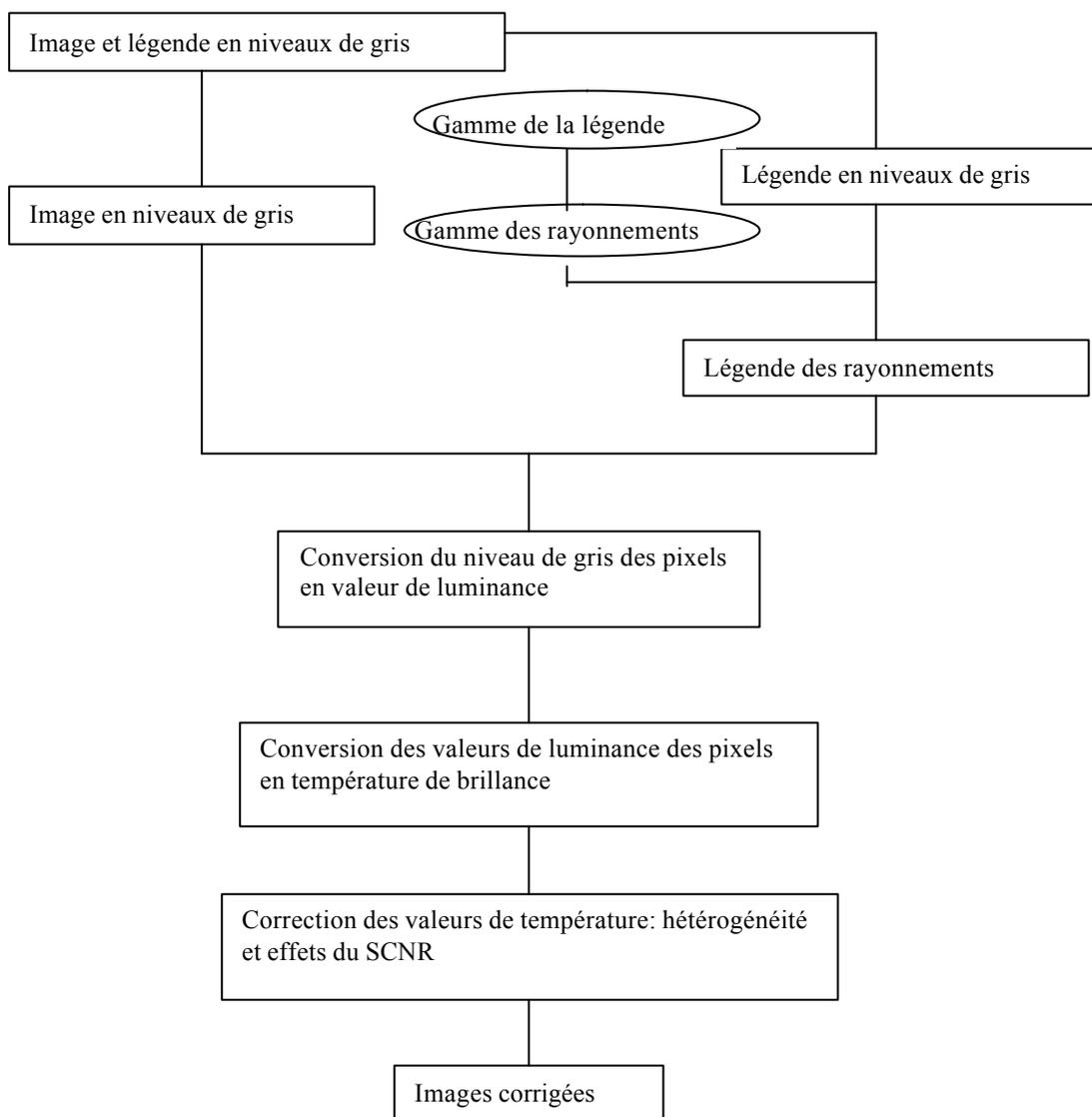


Figure 2.8 Organigramme du calcul de température de brillance des images

Les images ont besoin de corrections géométriques et radiométriques sophistiquées pour minimiser les effets de distorsion géométrique causées par l'objectif grand angle, l'hétérogénéité de la réponse de la caméra et la dérive de la TB provoquée par le SCNR

(la température de l'ensemble objectif-détecteur) avant leur mise en fonction. En fait, après corrections pour chaque image en utilisant l'échelle de gris qui est enregistrée simultanément et qui associe un compte numérique à toute température comprise dans la gamme, la valeur de gris de chaque élément de l'image est convertie en TB en fonction de la loi de Planck avec une faible précision (voir tableau 2.1). Un étalonnage plus précis de la caméra est essentiel. Lagouarde et al. (2000) et Jacob (2000) ont réalisé un étalonnage en laboratoire en visant avec la caméra une surface d'eau à différentes températures. En même temps, l'hétérogénéité de la réponse de la caméra dans la gamme d'angle de la lentille a aussi été analysée. Ils ont trouvé une dérive de 3°C pendant les 180 minutes d'observation d'une température constante et de 0.4°C pour la scène entière. Ils en ont conclu que la précision des données de la caméra atteint 0.5°C après tous ces ajustements nécessaires. Le logiciel de traitement des données radiométriques est décrit sur la figure 2.8.

Les déformations dues à l'usage d'objectif grand angle ont aussi été caractérisées expérimentalement en laboratoire au moyen d'une grille métallique à maille carrée régulière. La grille est à température ambiante, placée au-dessus d'un fond à basse température pour obtenir un grand contraste. La caméra vise cette cible verticalement et produit une image avec distorsions. La relation entre les coordonnées de l'image (colonnes et lignes) et les coordonnées de la cible a été construite en utilisant une technique d'ajustement par courbes polynomiales. Les angles azimutal et zénithal de l'observation de chaque pixel peuvent être calculés en se basant sur cette relation et en utilisant une méthode géométrique.

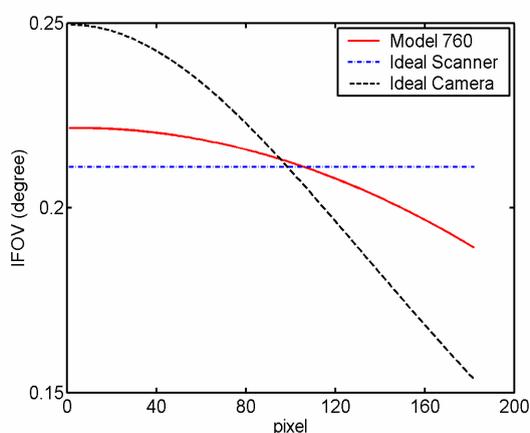


Figure 2.9 Comparaison des champs instantanés de pixels (IFOV), correspondant à trois sortes d'instruments.

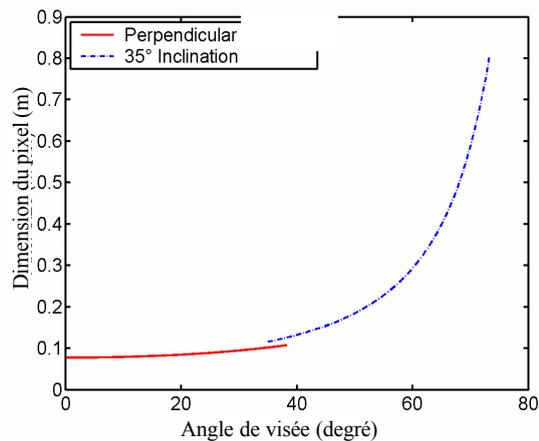


Figure 2.10 Taille du pixel en fonction de l'angle zénithal, pour une caméra à 20 mètres de hauteur.

D'autre part, le champ instantané des images est ajusté en tenant compte de l'objectif grand angle inclus dans la caméra. La figure 2.9 montre une comparaison de trois courbes de valeurs du champ instantané (pixels) pour trois sortes d'instruments. Chaque courbe représente les valeurs du centre de l'image (comportant 400 pixels) à l'une de ses extrémités. Pour le modèle 760, le champ instantané décroît régulièrement quand l'angle zénithal augmente. Sa valeur varie de 0.22° à 0.19° du centre au bord de l'image. Les deux autres courbes montrent deux conditions idéales où le champ instantané et la taille du pixel restent constants dans les images. Si la taille du pixel reste constante dans l'image, le champ instantané correspondant diminuera rapidement comme le montre la courbe relative à une caméra idéale.

La dimension du pixel varie avec l'angle zénithal de visée et le champ instantané. La figure 2.10 montre la taille du pixel en fonction de l'angle zénithal de visée (pour des visées au nadir et inclinées à 35°) et du champ instantané quand la caméra est placée à une hauteur de 20 mètres. Avec l'augmentation de l'angle zénithal, la taille du pixel passe de 0.07 à 0.11 mètres dans le cas d'une visée au nadir. Elle croît de 0.11 à 0.8 mètre dans le cas d'une visée à 35° . La taille du pixel change avec l'angle de visée, et a une grande influence sur la stratégie d'échantillonnage. Ce point sera discuté dans les prochains chapitres.

La figure 2.11 illustre le principe de la prise d'image avec le système de positionnement angulaire caméra-grue. Dans le cas où la caméra pointe dans une direction avec un angle d'inclinaison \mathbf{q}_0 et un angle de rotation \mathbf{j}_0 , le calcul de l'angle de visée de chaque pixel d'une image est dérivé d'une nouvelle relation géométrique prenant en compte le plan de la cible, le plan à l'entrée de la caméra et le plan de l'image de la caméra. La cible est projetée sur le plan à l'entrée de la caméra, qui est transformé par le système optique et projeté sur le plan où se forme l'image (plan de mise au point). Le plan de l'image et le plan à l'entrée de la caméra sont parallèles, ces deux plans sont perpendiculaires à l'axe du système optique qui correspond à l'angle de visée de la caméra.

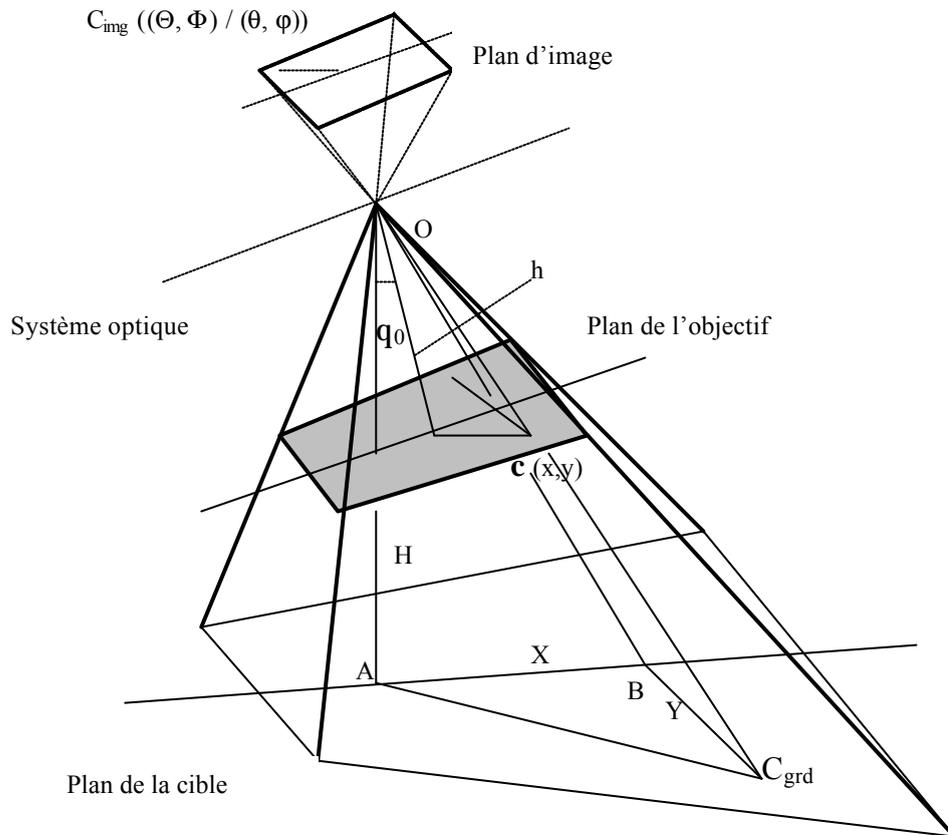


Figure 2.11 Acquisition des angles de visée azimutal et zénithal de chaque pixel quand la caméra n'est pas orientée au nadir. Au point objet C_{grd} de la cible correspond le point image C_{img} dans la direction (Θ, Φ) .

Dans le schéma, O est le centre optique, sa projection normale au sol est le point A. La distance entre O et A est H, la distance entre O et le plan à l'entrée de la caméra est h . Le point C_{grd} est une position quelconque (X,Y) au sol, son homologue est c dans le plan de l'objectif, de coordonnées (x,y). Il est transformé par le système optique en un point image C_{img} caractérisé par un angle zénithal \mathbf{q} et un angle azimutal \mathbf{j} . Soit Θ et Φ les angles zénithal et azimutal réels de C_{grd} .

La position des éléments dans l'image est utilisée pour calculer les points homologues du plan de l'objectif:

$$x = h \tan \mathbf{q} \sin \mathbf{j} \quad (2.1)$$

$$y = h \tan \mathbf{q} \cos \mathbf{j} \quad (2.2)$$

On définit:

$$\tan \mathbf{q}' = \frac{y}{h} = \tan \mathbf{q} \cos \mathbf{j} \quad (2.3)$$

$$\tan \mathbf{q}'' = \frac{x}{\frac{h}{\cos \mathbf{q}'}} = \tan \mathbf{q} \sin \mathbf{j} \cos \mathbf{q}' \quad (2.4)$$

Donc les coordonnées du point C sont:

$$X = BC = \operatorname{tg} \mathbf{q}'' OB = \frac{\operatorname{tg} \mathbf{q}'' H}{\cos(\mathbf{q}_0 + \mathbf{q})} \quad (2.5)$$

$$Y = AB = H \operatorname{tg}(\mathbf{q}_0 + \mathbf{q}') \quad (2.6)$$

Les angles réels du point objet visé C_{grd} , Θ et Φ sont donnés par:

$$\tan \Phi = \frac{BC}{AB} = \frac{\operatorname{tg}(\mathbf{q}'')}{\sin(\mathbf{q}_0 + \mathbf{q})} \quad (2.7)$$

$$\tan \Theta = \frac{AC}{H} = \frac{\operatorname{tg}(\mathbf{q}_0 + \mathbf{q}')}{\cos \Phi} \quad (2.8)$$

Si la caméra tourne d'un angle \mathbf{j}_0 , l'azimut final est $(\Phi + \mathbf{j}_0)$, ses valeurs limites vont de 0° à 360° . Lagouarde et al. (2000) fournissent une autre méthode pour calculer les angles de visée de la caméra placée obliquement. Ils utilisent une méthode géométrique reliant directement le plan image et le plan de la cible. Les coordonnées des pixels de l'image sont utilisées à la place des valeurs angulaires correspondantes.

La figure 2.12 montre des exemples qui représentent les angles zénithaux et azimutaux pour chaque pixel d'une image. Pour une visée verticale (figure 2.12.a, b) la projection de la caméra se trouve au centre de l'image, l'angle azimutal augmente dans le sens des aiguilles d'une montre. L'image des angles zénithaux montre que l'angle zénithal maximum atteint 46° . Quand la caméra est inclinée de 10° (figure 2.12.c, d), la projection de la caméra au sol se déplace vers la partie droite de l'image. La valeur de l'angle zénithal maximum passe à 56° . En changeant l'inclinaison de la caméra on décrit une gamme importante d'angles de visée.

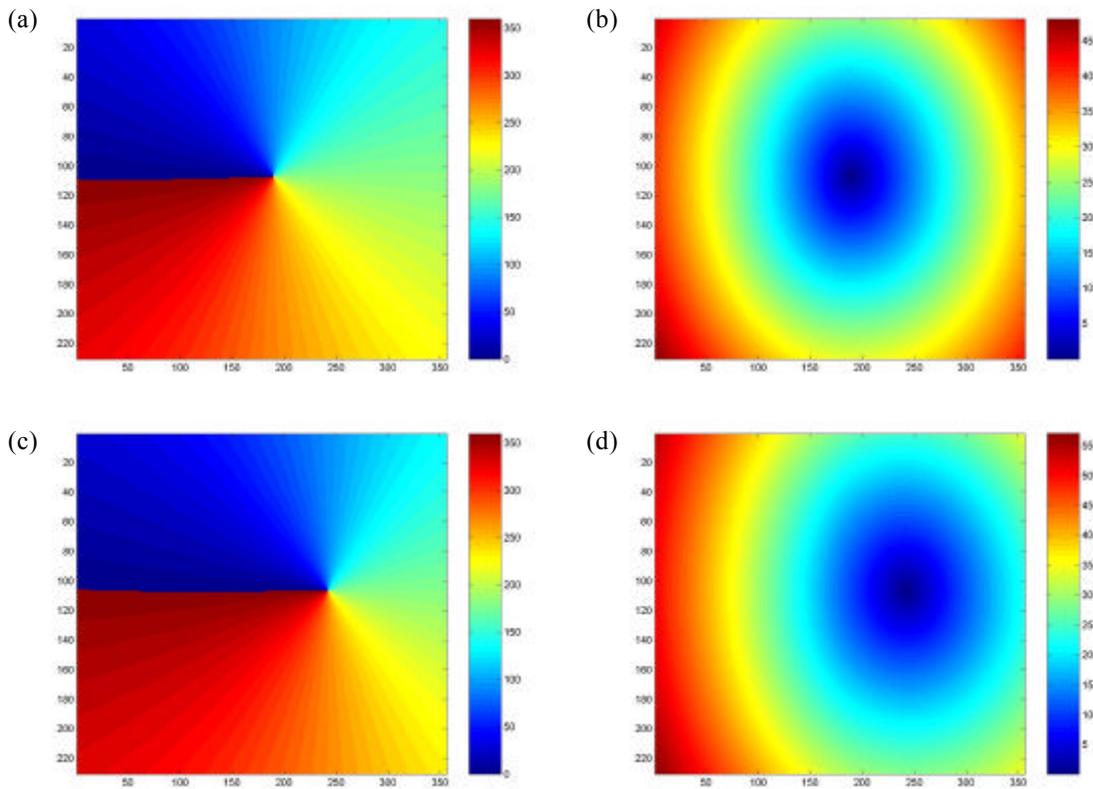


Figure 2.12 Représentation pour chaque pixel d'une image: (a) et (b) angles zénithal et azimutal quand la caméra vise le sol; (c) et (d) angles zénithal et azimutal quand la caméra est inclinée de 10° par rapport à la verticale.

2.5 Principales caractéristiques des mesures effectuées

2.5.1 Conception générale de l'expérience

Dans le but d'acquérir des mesures de TBD du couvert, de développer un modèle de simulation pour étudier les mécanismes physiques de la TBD et d'étudier les rapports entre les paramètres biophysiques et la TBD; trois types de paramètres ont été mesurés à des heures et des dates différentes entre mai et août: données géométriques du couvert, géométrie de la mesure et rayonnement directionnel, et paramètres clé environnementaux.

Les données géométriques du couvert incluent la hauteur et la largeur des plantes, la hauteur du bord inférieur des plantes (Figure 2.1), la largeur de végétation d'un rang, et la distance inter-rang. Ces paramètres seront utilisés dans l'élaboration du modèle et l'estimation des mesures. L'indice foliaire est lui aussi mesuré en différents endroits pour évaluer l'hétérogénéité du champ. Une caméra à six canaux visibles est utilisée

pour aider à distinguer les parties ensoleillées ou à l'ombre des feuilles ou du sol, et pour mesurer la largeur des plantes.

Dans les mesures, les caractéristiques géométriques de l'ensemble capteur-cible-Soleil seront enregistrées. La mesure sera conduite depuis des hauteurs différentes pour acquérir une bonne distribution de TBD et de TB du couvert. Les quatre méthodes de mesure seront évaluées. La première méthode sera aussi utilisée dans l'estimation de l'hétérogénéité du couvert.

Quelques paramètres climatiques tels que la vitesse du vent, l'humidité du sol seront mesurés car ils influent directement sur la distribution des TB et des TBD du couvert. La date des irrigations sera aussi prise en compte.

2.5.2 Liste des données obtenues

Tableau 2.2 Liste des mesures

Jour Julien (JJ)	Date	Ciel	Contenu des mesures
147	27/05	Clair	RM(M)
155	04/06	Part. clair	RM(M)
167	16/06	Clair	RM(M)
175	24/06	Clair	RM(M, A, N), objectif 7° testé
183	02/07	Clair	RM(M, A)
190	09/07	Clair	RM(M,A), test de la quatrième méthode de mesure de TBD
196	15/07	Clair	RM(M,A)
201	20/07	Clair	RM(M,A), caméra déplacée de 20 à 2 m graduellement pour comparer les échelles, test de la fréquence de prise rapide d'images
207	26/07	Clair	RM(M,A,N), caméra déplacée de 20 à 2 m graduellement pour comparer les échelles
211	30/07	Clair	RM (A), test de la première méthode de mesure de TBD
218	06/08	Clair	RM(A), caméra déplacée de 20 à 2 m graduellement pour comparer les échelles, test de la première méthode de mesure de TBD

Une partie des données de l'expérimentation de 1999 à l'INRA ont été sélectionnées en fonction des caractéristiques environnementales et des caractéristiques du couvert. Elles couvrent presque toute la période de croissance du maïs soit des jours juliens 147 à 218. Les mesures ont été conduites les jours sans pluie et par vent faible. Le tableau 2.2 indique la nature des mesures et l'état du ciel. Pendant les mesures de routine (RM), la TBD a été mesurée en utilisant la seconde et la troisième méthode, on a mesuré la distribution de la TB, et les paramètres géométriques du couvert. C'est le temps universel (très voisin du temps solaire local) qui a été utilisé. On a défini trois périodes:

le matin (M) quand la mesure est conduite entre le lever du Soleil et midi; l'après-midi (A) quand la mesure est conduite entre midi et le coucher du Soleil; et la nuit (N).

2.6 Conclusion

La mesure depuis le sol de la TBD permet de fournir des vérités de terrain pour évaluer et étalonner des mesures de télédétection. Elle a en plus l'avantage de permettre des observations fréquentes dans des conditions météorologiques et des états de surfaces bien contrôlés, pour le développement des modèles d'interprétation. De nombreuses expérimentations ont été effectuées avec des stratégies de mesure différentes en fonction des objectifs et du matériel utilisé: Kimes (1983a, 1982b), Kustas et al. (1990), Lagouarde (1995), Sandmeier (2000).

Notre étude expérimentale a été effectuée en 1999 sur une parcelle de maïs en utilisant un ensemble caméra-grue à l'INRA d'Avignon. Le système se compose d'une caméra thermique et d'une plateforme inclinable et orientable, montées sur une grue mobile. La caméra IRT est une caméra INFRAMETRICS Model 760 équipée d'un objectif grand angle. Nous avons réalisé les corrections géométriques et radiométriques pour minimiser les effets de distorsion géométrique provoquées par l'objectif grand angle, d'hétérogénéité de la réponse de la caméra et de dérive de la TB causée par le SCNR (la température de l'ensemble objectif-capteur) avant leur mise en fonction. La précision des données atteint 0.5 °C après tous ces ajustements. Le champ instantané a lui aussi été calculé et montre une variation continue de 0.22° à 0.19° en fonction de l'angle zénithal. Enfin, l'angle de visée a été calculé en fonction de la position des pixels dans l'image quand la caméra vise la cible obliquement.

La stratégie pour acquérir les TBD du couvert et développer un modèle de simulation de TBD est expliquée dans ce chapitre. On a déterminé la distribution de la TB du couvert de la cible. On distingue deux, trois ou quatre types de surface avec le sol et la végétation éclairés ou à l'ombre. La caméra a été placée à faible hauteur pour pouvoir détecter des profils de TB de la plante à des instants différents et à différents stades de croissance de la plante. Dans ces conditions la dimension du pixel est inférieure à 1 centimètre. Le biais causé par les pixels mixtes est négligeable. Puis, des mesures ont été réalisées pour évaluer l'influence de la hauteur de la caméra sur la mesure des TBD en diminuant graduellement la hauteur de la caméra.

Quatre méthodes pour la mesure de TBD du couvert ont été proposées dans ce chapitre ; en visant la même surface sous des angles différents en déplaçant la grue et en bougeant la caméra tout autour de la cible; en visant différentes parties du champ en faisant tourner la caméra et la plateforme sans bouger la grue; en visant répétitivement différentes parties du champ en déplaçant la caméra et la grue en même temps; enfin en déplaçant la caméra perpendiculairement à la direction des rangs pour observer le champ. La troisième méthode présente l'avantage de permettre l'observation des différentes parties du champ avec un même angle de visée, elle peut être utilisée pour vérifier l'hétérogénéité du champ et extraire les variations angulaires des TB proches du midi local. Cependant, c'est la deuxième méthode qui a été choisie comme méthode de

routine pour mesurer la TB du champ, parce qu'elle permet l'utilisation d'une large gamme d'angles de visée pendant un temps de mesure très court.

Les caractéristiques des plantes dans l'IRT sont aussi affectées fortement par l'environnement. Pendant la mesure des TB du champ du maïs, quelques paramètres climatiques tel que l'humidité du sol, la vitesse du vent, les paramètres du couvert ont aussi été mesurés. Enfin, on donne la liste d'une partie des données de l'expérimentation INRA 99 entre mai et août 1999.

Chapitre 3

Mesure de la température de brillance des composantes (TBC) et des paramètres biophysiques du couvert

3.1 Introduction

Dans le but de développer un modèle de simulation de TBD, d'aider à l'évaluation de la précision des mesures et d'améliorer les applications potentielles de la TBD du couvert, plusieurs paramètres géométriques et biophysiques du couvert et les modifications de l'environnement ont été mesurés pendant la campagne de mesures.

Kimes (1983) a conduit une campagne de terrain sur une culture de coton en rangs en Arizona en 1981 pour valider un modèle physique de culture en rangs, qui a été utilisé pour observer spatialement la structure de ce type de culture et la température de brillance de ses composantes (TBC). Dans l'expérimentation, il a mesuré la hauteur H et la largeur normalisée a des rangs de coton, la distance inter-rang L , et le taux de couverture. Dans l'expérimentation conduite par Ganis (1997) pour l'estimation du transfert radiatif dans un couvert de maïs, la hauteur de base des tiges h a également été mesurée car il a été observé que le sous-couvert présente une région proche du niveau du sol presque complètement dépourvue de feuilles. Dans le modèle de transfert radiatif qu'il a développé, il a conçu les rangs de maïs comme des barres rectangulaires étendues avec une distribution de trous aléatoire. La fonction de probabilité du transfert radiatif au sein du couvert et le paramètre de biomasse (l'indice foliaire) ont été déterminés à partir de mesures directes.

Dans les modèles de TBD du couvert développés par Jackson et al. (1979) et Kimes (1983), la surface du couvert a été décomposée en quatre composantes: la végétation éclairée, la végétation à l'ombre, le sol éclairé et le sol à l'ombre. Chaque composante a une TB unique. Il a été noté que durant le jour, contrairement au sol, les températures de brillance de la végétation éclairée et de la végétation à l'ombre sont très proches. Un exemple de la distribution de TB des composantes donné par Jackson et al. (1979) est de 55.3°C pour le sol éclairé, 31.1°C pour le sol à l'ombre, 29.5°C pour la végétation éclairée et 28.5°C pour la végétation à l'ombre. Kustas et al. (1990) estiment qu'une classification en trois composantes est plus appropriée pour la distribution de la TB d'un couvert de coton. Selon sa classification, une température unique a été attribuée à la végétation. Dans les travaux de François et al. (1997), le couvert a été défini par seulement deux composantes: le sol et la végétation.

Dans ce chapitre, nous allons décrire les mesures de TBC du couvert, les mesures des paramètres de structure du couvert et des propriétés géométriques telle que la largeur et l'orientation de la plante, la hauteur de base des tiges, la fraction de trous directionnelle et le paramètre d'atténuation du couvert. Le nombre de composantes du couvert sera évalué dans différentes conditions de mesure. D'autres paramètres comme l'indice foliaire, la hauteur du couvert, l'humidité du sol et la vitesse du vent ont respectivement été mesurées par Nadine Bruguier, Benjamin Kötz, Claude Doussan et Olivier Marloie de l'INRA d'Avignon. Une partie de nos mesures est basée sur leur travail. Enfin, nous discuterons des relations entre les paramètres.

3.2 Méthodes de mesure et d'estimation

3.2.3 Mesure et estimation de la TBC d'un couvert de culture en rangs

Les mesures de la TBC du couvert ont été réalisées à différentes heures de la journée et pour différents états de croissance du couvert pendant la campagne. Des images IRT et visibles ont été acquises au cours de la journée par une caméra IRT et une caméra visible à six bandes positionnée à 2 m au dessus du couvert.

Si on considère que les images IRT permettent de définir quatre composantes tout comme les images visibles, on peut se servir de ces deux images pour identifier les composantes du couvert dans les images IRT. La taille du pixel de l'image IRT est inférieure à 1 centimètre. Le biais induit par les pixels mixtes est ignoré.

Si au contraire le nombre de composantes des images IRT n'a pas de relation avec la classification dans le visible, et dépend seulement de la TB, on peut utiliser un histogramme pour classer ces composantes. Dans ce travail, nous avons utilisé un tel histogramme pour fixer le nombre de composantes des images thermiques, puis nous avons repéré les limites des composantes à l'aide des images visibles correspondantes pour estimer les valeurs des températures de brillance de chaque composante. Pour calculer la TBC, le nombre de pixels sélectionnés pour chaque composante est supérieur à 150, ce qui est suffisant pour obtenir une estimation fiable de la température de la composante avec une précision souhaitée de 0.5°C au seuil de confiance de 95%. Des paramètres statistiques tels que la valeur moyenne et l'écart-type ont été utilisés pour estimer le niveau de chaque composante. Si la TB du pixel i est T_i , la température moyenne T de la composante et son écart-type σ_T sont:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N} \quad (3.1)$$

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - T)^2}{N}} \quad (3.2)$$

le calcul étant effectué avec un échantillon de N pixels.

3.2.4 Mesures des paramètres de géo-structure et de la fraction de trous directionnelle

Dans cette expérimentation, les paramètres géométriques tels que la hauteur H du couvert et la largeur de plante D , la hauteur de base des tiges h , l'orientation \mathbf{a} de la plante, et la fraction de trous directionnelle sont mesurés. La hauteur de la plante est définie comme la distance moyenne entre le sol et le sommet de la plante. La largeur de la plante est définie comme la moyenne des largeurs maximales des plantes échantillonnées en visée au nadir. L'orientation de la plante est obtenue à partir de la direction définie par la plus grande feuille. Une largeur normalisée de rang a été en outre dérivée de la largeur de la plante et de son orientation. Dans la figure 3.1, L est la distance inter-rang, D_i est la mesure de largeur d'une plante individuelle, α_i est son orientation et a est la largeur de rang normalisée.

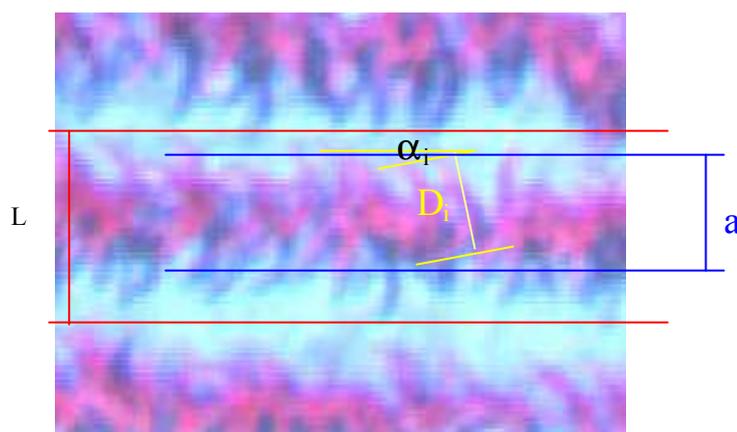


Figure 3.1 Une image visible du 16 juin 1999 (JJ 167) permettant de définir les dimensions géométriques du couvert: L la distance inter-rang, D_i la largeur d'une plante, α_i son orientation, et a la largeur normalisée de rang.

Les images numériques visibles sont utilisées pour la mesure de l'orientation et de la largeur de la plante. Elles sont acquises avec une caméra numérique de résolution 0.05° placée à 20 m au dessus du sol et visant au nadir. Ainsi la taille du pixel est inférieure à 0.02m au sol. La direction et la largeur des plantes ont pu être déterminées directement à partir de ces images. Pour représenter la variabilité spatiale du couvert végétal, plusieurs surfaces réparties sur l'ensemble de la parcelle ont été sélectionnées.

A partir des images obtenues par visée verticale, on a calculé la largeur moyenne de la plante D et son écart-type σ_D , la distribution de l'orientation des plantes f_a et la largeur de rang normalisée a comme suit:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N D_i}{N} \quad (3.3)$$

$$s_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (D_i - D)^2}{N}} \quad (3.4)$$

où D_i est la mesure de largeur de la plante i et N le nombre de mesures.

$$f_a = \frac{N_a}{N} \quad (3.5)$$

où f_a est la fréquence normalisée de l'angle α rencontrée dans les mesures, rapport du nombre N_a de fois où angle α apparaît dans les mesures au nombre N de mesures total.

$$a = D \sum f_a \cos a \quad (3.6)$$

La direction vers l'ouest est choisie comme origine d'orientation α de la plante.

Les variations directionnelles de la fraction de trous de la parcelle de maïs ont été mesurées à l'aide des images numériques infrarouge thermique de nuit. On note que les composantes nocturnes de la parcelle se distinguent clairement sur ces images. La nuit, après une période d'échanges énergétiques en l'absence du rayonnement solaire, un nouvel équilibre thermique est atteint où le sol et le couvert sont tous deux isothermes. En même temps, il existe une différence de TB à cause des différences entre les propriétés radiatives et thermiques de ces deux composantes.

Les caractéristiques de la caméra sont décrites au chapitre 2. Il faut signaler que la lentille large champ (80°) a été remplacée par une lentille plus étroite (7°) pour ces mesures. La caméra acquiert ainsi des images dont la taille des pixels passe de 10 cm à 1 cm depuis une hauteur de 20 mètres, ce qui est suffisamment précis pour estimer les fractions des composantes du couvert.

Pour la mesure, nous avons balayé le champ selon trois directions : du nord vers le sud, de l'ouest vers l'est et du sud-est vers le nord-ouest, en constituant ainsi trois séries d'images pour différents angles de visée. Dans chaque image, une région d'intérêt (ROI) a été sélectionnée pour le calcul de la fraction des composantes (Figure 3.2). Les bords sont parallèles ou perpendiculaires à la direction des rangs, les deux d'entre eux qui sont parallèles à la direction des rangs sont à une distance multiple entier de la distance inter-rang. La fraction de trous $p(x, \mathbf{q}, \mathbf{j})$ en fonction de la position est calculée comme suit :

$$p(x, \mathbf{q}, \mathbf{j}) = \frac{S_s(x, \mathbf{q}, \mathbf{j})}{S(\mathbf{q}, \mathbf{j})} \quad (3.7)$$

où x est la position relative dans un rang dans le sens perpendiculaire au rang; θ et φ sont respectivement les angles zénithal et azimutal de visée; S_S est la longueur de la fraction de sol selon la ligne à la position x ; S est la dimension verticale de la surface parallèle à la direction des rangs.

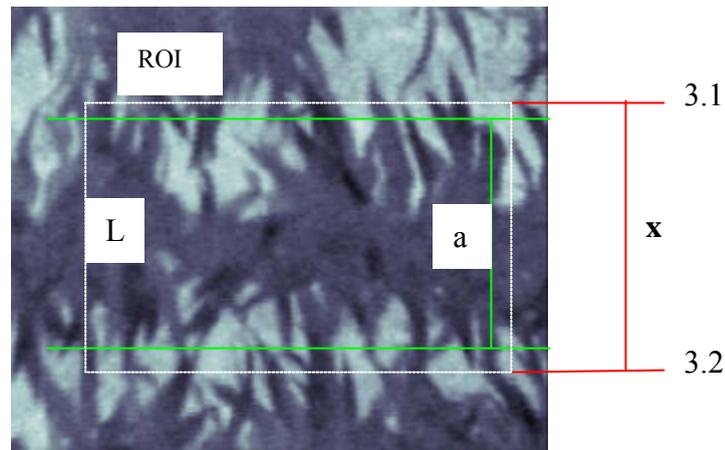


Figure 3.2 Une image thermique du 26 juillet 1999 (JJ 208) montre la surface sélectionnée et la largeur de rang normalisée. La visée est oblique à 15° dans la direction du rang.

Dans l'exemple de la figure 3.2, la fraction directionnelle de trous est:

$$P(\mathbf{q}, \mathbf{j}) = \frac{\int_0^L p(x, \mathbf{q}, \mathbf{j}) dx}{L} \quad (3.8)$$

On considère la grande feuille la plus basse comme limite supérieure pour mesurer la hauteur de base de la tige h . Les petites feuilles flétries et abîmées aux extrémités près de la zone racinaire sont négligées. Nadine Bruguier et Benjamin Kötz ont utilisé une méthode destructive pour obtenir l'architecture de la plante au cours de la période de croissance. Ils ont coupé la plante au niveau du sol, disposé celle-ci face à un tableau blanc avec des grilles en fond, et pris des photos numériques, présentées sur la figure 2.2. La hauteur de base de la tige h et son écart-type σ_h sont tels que :

$$h = \frac{\sum_{i=1}^N h_i}{N} \quad (3.9)$$

$$s_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h_i - h)^2}{N}} \quad (3.10)$$

Où h_i est la valeur d'une mesure individuelle, et N le nombre total de mesures.

Il faut noter que cette méthode est seulement utilisable pour les plantes dans les deux premiers stades. Dans le troisième stade, les grandes feuilles flétrissent et tombent au sol.

La mesure de la hauteur de plante H est identique à celle de h :

$$H = \frac{\sum_{i=1}^N H_i}{N} \quad (3.11)$$

$$s_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (H_i - H)^2}{N}} \quad (3.12)$$

Où H_i est la valeur de chaque mesure, et N le nombre total de mesures.

3.2.5 Mesures de l'humidité du sol, de la vitesse de vent, et de l'indice foliaire

Les caractéristiques thermiques de la plante sont fortement affectées par l'environnement. La température des éléments constituant le couvert de maïs est lié au stress hydrique, au contenu en eau de la plante et du sol, au stade de croissance, à l'insolation, à la vitesse du vent, etc.... Au moment des mesures des TBC, certains paramètres de l'environnement tels que l'humidité du sol, la vitesse du vent, les paramètres du couvert ont été mesurés.

L'humidité du sol a été mesurée en utilisant deux sondes à neutron (type Solo 25 et Solo 40) disposées en deux endroits différents de la parcelle, l'une dans la partie nord, l'autre dans la partie sud. La profondeur des sondes était supérieure à 2 m. Les mesures ont été réalisées entre 5 et 150 cm, tous les 10 cm.

La vitesse du vent a été mesurée par un anémomètre à coupelles (anémomètre à faible puissance A100L2) placé au dessus du couvert à une hauteur de 2 mètres régulièrement ajustée avec la croissance de la végétation. L'étendue de mesure de l'anémomètre est bornée par une vitesse minimale de 0.2m/s et une vitesse maximale de 75m/s. Les valeurs moyennes, maximale et minimale et l'écart-type ont été enregistrées, pour une fréquence de mesures de 20mn.

Plusieurs variables du couvert telles que l'indice foliaire ont été échantillonnées de façon hebdomadaire tout au long de la saison pour suivre l'évolution phénologique du maïs. Les variables ont été estimées par échantillonnage aussi bien destructif que non-

destructif. Les sites d'échantillonnage étaient distribués sur la parcelle afin d'estimer la variabilité spatiale du couvert végétal. La structure du couvert végétal a été décrite par des mesures effectuées avec un analyseur LAI2000.

3.3 Résultats

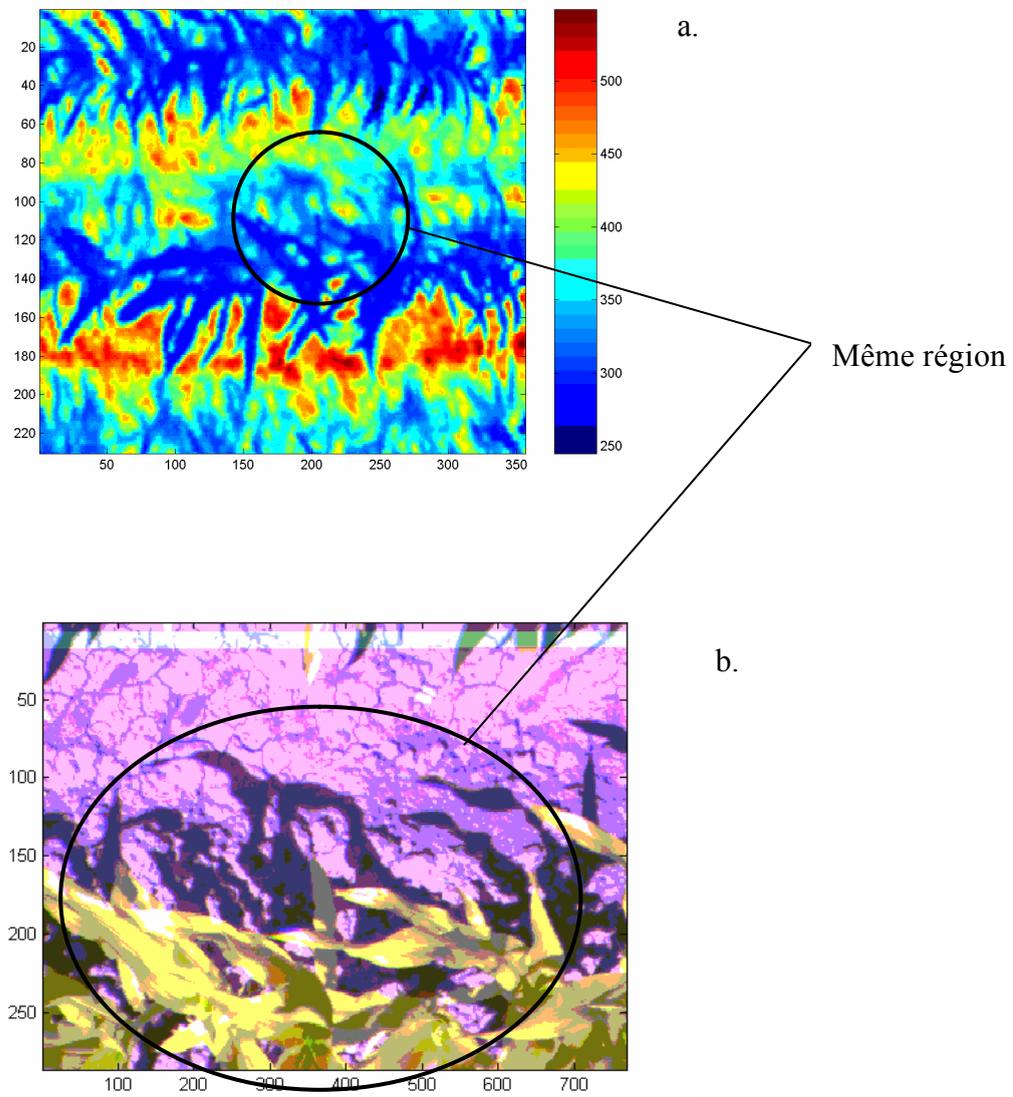
3.3.3 Distribution spatiale des TBC du couvert et leurs relations

Distribution spatiale des TBCs du couvert et critères de classification des composantes

La figure 3.3 montre un exemple d'images IRT (a) et visible (b) pour une même cible. Les images ont été acquises à 10h30 le 16 juin 1999. Dans l'image visible, on distingue nettement quatre composantes constituées par le sol et les feuilles, d'une part éclairés, d'autre part à l'ombre. Dans l'image IRT, le sol éclairé a la luminance la plus forte, et offre une large gamme de température. Le sol à l'ombre et la végétation ont des luminances plus faibles et plus homogènes. Il est intéressant de noter que l'on n'a pas pu distinguer la végétation éclairée de la végétation à l'ombre à partir de l'image IRT. Les limites en TB entre ces composantes ne sont pas nettes, contrairement à celles indiquées sur l'image visible.

Outre la différence spectrale, il existe une différence de direction de visée entre ces deux images. Pour la mesure, les deux caméras étaient positionnées en parallèle sur la plate-forme, séparées pour une distance de 0.3 m, alors que la distance entre les caméras et l'objet était de 2 mètres seulement. Cette distance entre les deux instruments a introduit une différence entre les scènes visées.

L'histogramme normalisé de la TB du champ est montré sur la figure 3.4a. Le nombre de pixels considérés est supérieur à 30000, et leur TB varie de 25°C à 55°C. On voit apparaître clairement trois pics sur l'histogramme, correspondant essentiellement au sol éclairé, au sol à l'ombre et à la végétation. Il n'est pas possible de distinguer deux pics correspondant aux parties éclairées et à l'ombre de la végétation. L'histogramme montre aussi qu'il existe de grandes zones d'intersection entre les trois composantes, ce qui signifie que des composantes différentes peuvent avoir la même valeur de TB. A l'aide des images visibles, nous avons sélectionné les pixels de chaque composante. Les résultats sont présentés sur la figure 3.4b. Les modes de ces trois composantes sont séparés. Sur l'histogramme IRT, la végétation a la TB la plus basse et la distribution la plus étroite, sa température moyenne est de 28.9°C et son écart-type est de 0.9°C. Le sol éclairé a la TB la plus élevée et la distribution la plus large avec une moyenne de 46.6°C et un écart-type de 2.4°C. Pour les sols à l'ombre, la moyenne et l'écart-type sont respectivement 34.1°C et 2.3°C. Dans de telles conditions, séparer la végétation en deux composantes éclairées et à l'ombre est impossible et inutile. La végétation peut être considérée comme une seule composante.



3.2.3 Figure 3.3 Images IRT (a) et visible (b) de la même surface obtenues à 10h15 le 16 juin 1999

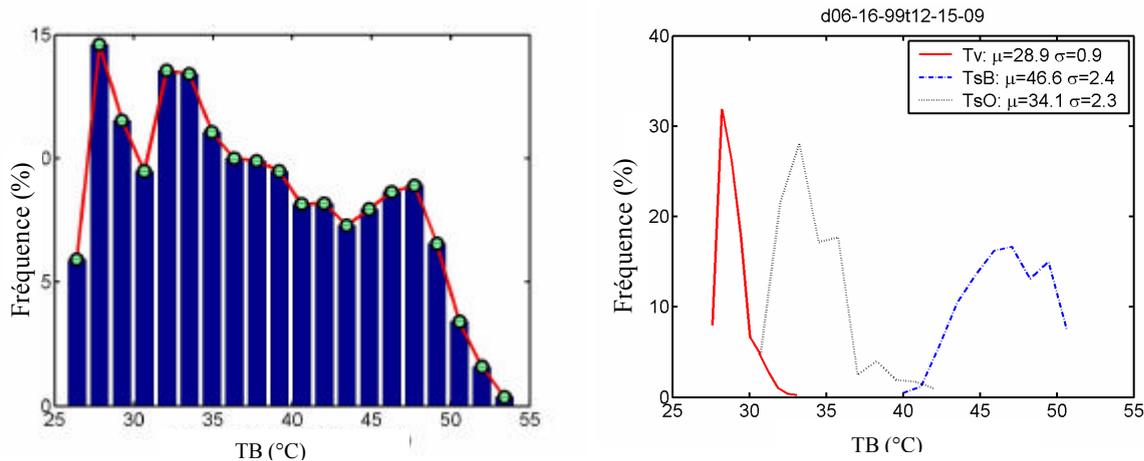


Figure 3.4 Histogramme de distribution de la TB du couvert (a) et séparation des trois composantes dans l'image visible (b)

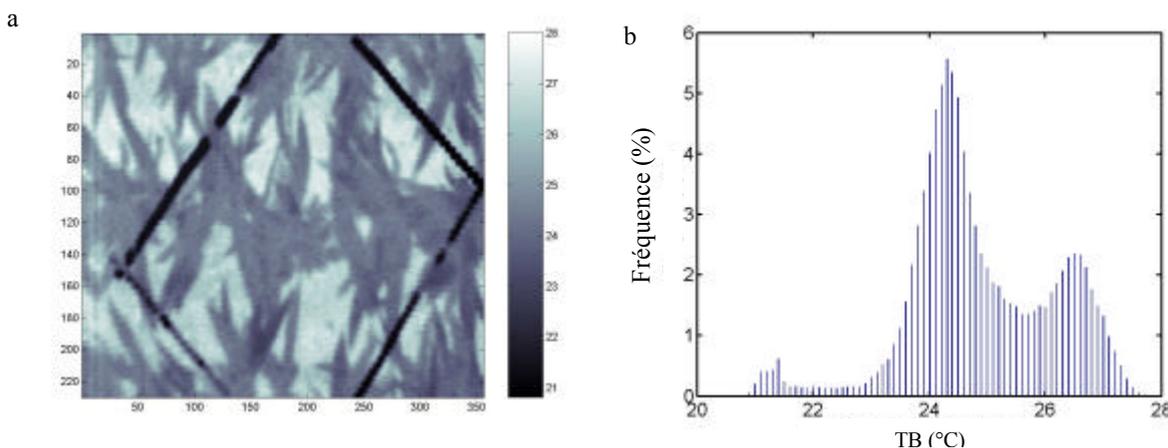


Figure 3.5 Une image infrarouge thermique (a) acquise de nuit (22h) le 26 juillet 1999 et l'histogramme des températures de brillance correspondantes (b).

La figure 3.5a montre une image IRT acquise de nuit (à 22h) par la caméra thermique en visée au nadir, le 26 juillet 1999 (JJ 207). On voit sur l'histogramme de la figure 3.5b que la gamme des TB est de 7°C, de 21°C à 28°C. Le cadre rectangulaire en aluminium visible sur la figure 3.5a a la TB la plus faible à cause de la faible émissivité de l'aluminium (moins de 0.04). Il a été utilisé pour limiter les échantillons pour l'application de la première méthode de mesure de la TBD. Le sol a la température la plus élevée. La température de la végétation est intermédiaire entre le sol et le cadre en aluminium. Les composantes du couvert se distinguent nettement sur la figure 3.5a, tout comme sur l'histogramme de la figure 3.5b où apparaissent trois pics. Le plus froid représente la distribution de température de l'aluminium, le pic intermédiaire représente la végétation et le pic de plus chaud représente le sol.. La TB de l'aluminium se situe

aux alentours de 21.5°C. Les TB de la végétation et du sol sont respectivement de 24.3°C et 26.6°C.

A partir des mesures de TB, nous constatons que la représentation par quatre composantes du couvert, valide dans les domaines du visible et du proche infrarouge (végétation éclairée et à l'ombre, sol éclairé et à l'ombre) n'est pas applicable dans l'IRT. En général et pour la plupart des mesures de jour, la différence entre la température du sol et celle de la végétation est très faible, et il est difficile de les séparer.

En comparant les images acquises à différents moments de la journée, on a noté qu'il existe alors une grande différence de température entre le sol éclairé et le sol à l'ombre. En revanche, après le coucher du soleil on observe une température du sol unique. Ainsi, le nombre de composantes du couvert peut changer en fonction du moment de la mesure. De jour on observe trois composantes dans le couvert, de nuit on en observe deux. On observe une variation de TB plus faible pour la végétation que pour le sol. Ceci s'explique par le bilan local d'énergie au niveau des feuilles qui régulent leur transpiration en adaptant leur résistance stomatique en fonction de l'énergie reçue, afin de maintenir une température toujours proche de celle de l'air. Comme la température de l'air au contact de la végétation éclairée et de la végétation à l'ombre est peu différente, il en va de même de la température de la végétation éclairée et à l'ombre. Le nombre de composantes observables et son évolution est affecté par au moins quatre facteurs : l'évapotranspiration de la végétation et les échanges de flux de chaleur, la finesse de la structure géométrique végétale, les propriétés thermiques du sol, et l'hétérogénéité de la distribution de l'humidité du sol près de la surface.

En fonction de l'évapotranspiration et des échanges de chaleur entre les plantes, la végétation tend à conserver une température constante dans le temps, avec des différences spatiales minimisées. Comme l'épaisseur de la végétation (feuilles) est faible, la résistance aux transferts de chaleur à travers celle-ci est minimale. Ainsi deux côtés du couvert qui font l'un face au rayonnement solaire incident l'autre non, peuvent avoir des TB très proches.

Les variations d'humidité du sol superficiel et le faible transfert thermique entre les différentes parties de la surface conduisent à une grande variabilité de la température du sol. La TB du sol éclairé augmente rapidement dès qu'il est éclairé par le soleil. Le sol resté à l'ombre conserve une température plus basse et cette situation ne peut pas être modifiée par les échanges de flux horizontaux à l'intérieur du sol. Si les propriétés thermiques de surface sont différentes à cause de l'humidité du sol, cela entraînera aussi des variations de température du sol éclairé.

Le rayonnement solaire incident passe à travers les trous de la végétation et se projette sur la surface du sol. Donc à la surface du sol, les parties du sol à l'ombre et éclairées se juxtaposent. On observe que la taille d'une portion de sol éclairé influence sa température. Une grande portion de sol éclairé a habituellement une plus forte température que celle d'une surface éclairée plus petite.

Variation temporelle des TBCs et leurs relations

Les TBC varient au cours du jour. La figure 3.6 montre leur évolution temporelle le 24 juin pour trois séries de mesures. Les heures locales(?) de mesures sont 9h18, 12h32 et 17h03. Au cours de la journée, on observe toujours trois composantes: la végétation, le sol éclairé et le sol à l'ombre. La végétation a toujours la TB la plus faible, et le sol éclairé a la TB la plus élevée. La TB de la végétation augmente régulièrement au cours de la journée. La TB du sol éclairé augmente dans la matinée, atteint un pic aux alentours de midi, et diminue dans l'après-midi. La TB du sol à l'ombre augmente également dans la matinée, puis reste constante dans l'après-midi, ce qui lui donne alors des valeurs assez proches de celles de la végétation.

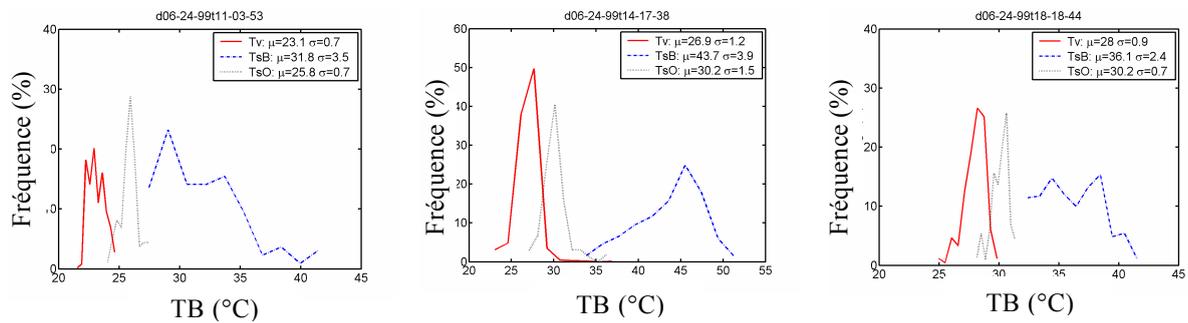


Figure 3.6 Les trois composantes de la distribution des TB, mesurée à trois instants de la journée du 24 Juin 1999: 9h18, 12h32 et 17h (de gauche à droite)

La différence de TB moyenne entre le sol éclairé et à l'ombre est plus grande qu'entre le sol à l'ombre et la végétation, comme l'a montré Kimes et al. (1983). Jackson et al. (1979) confirment les faibles différences de TB entre les surfaces à l'ombre (sol et végétation), ainsi qu'avec la végétation éclairée.

La structure géométrique du couvert influence également les variations temporelles de TBC du couvert. La figure 3.7 montre ces variations temporelles dans la matinée du 6 août à 8h35, 9h29 et 10h15. Avant 10h00, seules deux composantes: sol et végétation peuvent être distinguées, la TB de la végétation étant plus élevée que celle du sol. Après 10h00, trois composantes apparaissent rapidement dans le champ. Leur différence de température est faible, la plus grande partie de l'histogramme correspond aux zones d'intersection. Il est difficile de distinguer les composantes à partir des images thermiques.

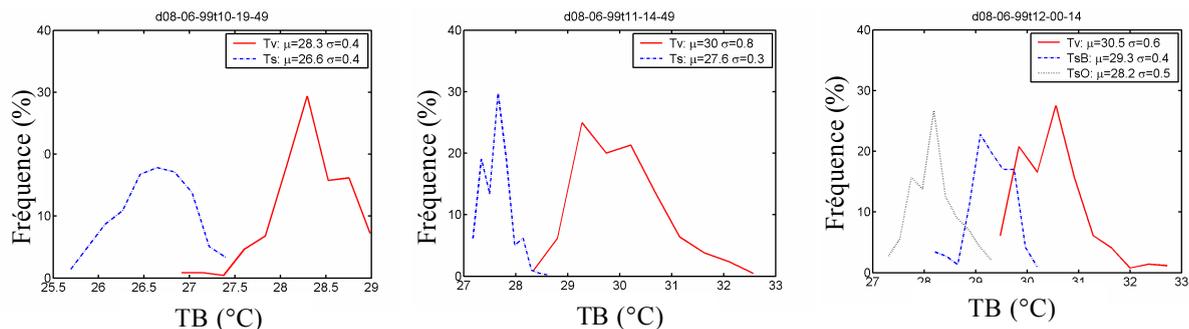


Figure 3.7 Variations temporelles des TBC du couvert au cours de la matinée du 6 août 1999.

Des mesures ont été réalisées de juin à août pour étudier les relations entre les TBC du couvert et suivre leur évolution temporelle au cours de la journée. Le tableau 3.1 contient les paramètres statistiques de la distribution de TB du couvert: température moyenne de chaque composante (μ), écart-type (σ), et valeurs maximale (max) et minimale (min). Les différences de valeurs moyennes des températures de brillance entre le sol éclairé (TsB), le sol à l'ombre (TsO) et la végétation (Tv) sont aussi reportées. Toutes les mesures ont été réalisées en milieu de journée (aux alentours de midi) à différentes périodes de la croissance. Par exemple, la mesure du 16 juin 1999 (à 13h55) montre que les mesures se classent selon trois composantes. Les valeurs moyennes de TB de la végétation, du sol éclairé et du sol à l'ombre sont respectivement 31.1°C , 50.2°C et 37.2°C . Les écart-types correspondants sont 1.5°C , 2.2°C et 2.2°C . Les gammes de TB sont de 26.6°C à 41.6°C , de 39.6°C à 54.1°C , et de 31.7°C à 44.0°C , avec des zones de chevauchement entre composantes voisines.

Pour les mesures réalisées les autres jours, les trois composantes sont toujours présentes. Avant le 20 juillet (JJ 201), les composantes de sol éclairé et de sol à l'ombre ont un écart-type assez important, mais bien inférieur à la différence des températures moyennes de ces deux composantes. Donc les zones de sol éclairées et à l'ombre peuvent être identifiées. Après le 20 juillet, tandis que l'écart-type diminue rapidement de 4°C à 0.5°C , la différence des températures moyennes du sol éclairé et à l'ombre diminue également. Il devient alors difficile de séparer les trois composantes.

D'après le tableau 3.1, on note aussi que la température moyenne de la végétation à la mi-journée est relativement stable, comparée à la température du sol éclairé et à l'ombre. Sa valeur moyenne est de 29.7°C , et son écart-type de 1.6°C . Au contraire, la température moyenne et l'écart-type du sol éclairé et à l'ombre sont largement dispersés avec des valeurs de 39.2°C et 7.4°C , et de 31.8°C et 3.3°C . La figure 3.8a montre la relation statistique entre $(\text{TsB}-\text{Tv})$ et $(\text{TsO}-\text{Tv})$. Le carré du coefficient de corrélation R^2 est de 0.85, l'écart-type de 1.2°C , la pente de l'ajustement de 0.37 et l'ordonnée à l'origine de -1.4°C . La figure 3.8b reprend les mêmes données en y adjoignant les mesures des 16 et 24 juin et du 6 août, entre 9h20 et 16h31. Les paramètres statistiques précédents évoluent à peine avec des valeurs respectives de 0.85, 1.1°C , 0.37, -1.4°C . Cette forte corrélation montre que la température du sol à l'ombre est reliée étroitement à la température du sol éclairé.

Tableau 3.1 Paramètres statistiques de TBC

Date	16 Jun.	24 Jun.	2 Jul.	9 Jul.	20 Jul.	30 Jul.	6 Aug.
JJ	155	175	183	190	201	211	218
Heure	13:55	12:32	10:50	13:51	13:06	14:07	10:31
μ -Tv (°C)	31.1	26.9	28.8	30.5	30.6	28.2	31.5
σ -Tv (°C)	1.5	1.2	1.3	1.0	0.8	0.5	0.8
Max -Tv (°C)	41.6	37.6	30.5	34.0	37.8	30.3	33.9
Min-Tv (°C)	26.6	22.3	25.5	27.9	29.2	27.3	29.4
μ -TsB (°C)	50.2	43.7	41.4	43.5	33.1	32.5	30.1
σ -TsB (°C)	2.2	3.9	3.3	4.1	1.7	0.9	0.5
Max-TsB (°C)	54.1	52.3	47.4	51.1	38.3	34.9	31.7
Min-TvsB (°C)	39.6	32.9	32.5	35.0	30.4	30.2	28.9
μ -TsO (°C)	37.2	30.2	31.2	35.8	30.0	29.9	28.7
σ -TsO (°C)	2.2	2.5	3.0	2.3	0.5	0.4	0.4
Max-TsO (°C)	44.0	40.7	37.7	39.3	31.9	31.0	29.9
Min-TsO (°C)	31.7	26.6	29.2	29.9	29.0	29.0	27.4
TsB-TsO (°C)	13.0	13.5	10.2	7.5	3.1	2.6	1.4
TsO-Tv (°C)	6.1	3.3	2.4	5.3	-0.6	1.7	-2.8
TsB-Tv (°C)	19.1	16.8	12.6	13	2.5	4.3	-1.4

L'ordre des valeurs des TB des trois composantes à la mi-journée change avec la date de la mesure. Avant le 20 juillet (JJ 201), on classe par ordre décroissant le sol éclairé, le sol à l'ombre et la végétation. Après le 20 juillet (JJ 201), l'ordre devient: sol éclairé, végétation et sol à l'ombre, ou encore la végétation, le sol éclairé et le sol à l'ombre le 6 août (JJ 218). La principale raison de cette variabilité est la modification de structure du maïs. Un couvert de forte densité atténue plus le rayonnement solaire incident qui atteint le sol et diminue la période de chauffage du sol par le rayonnement solaire direct.

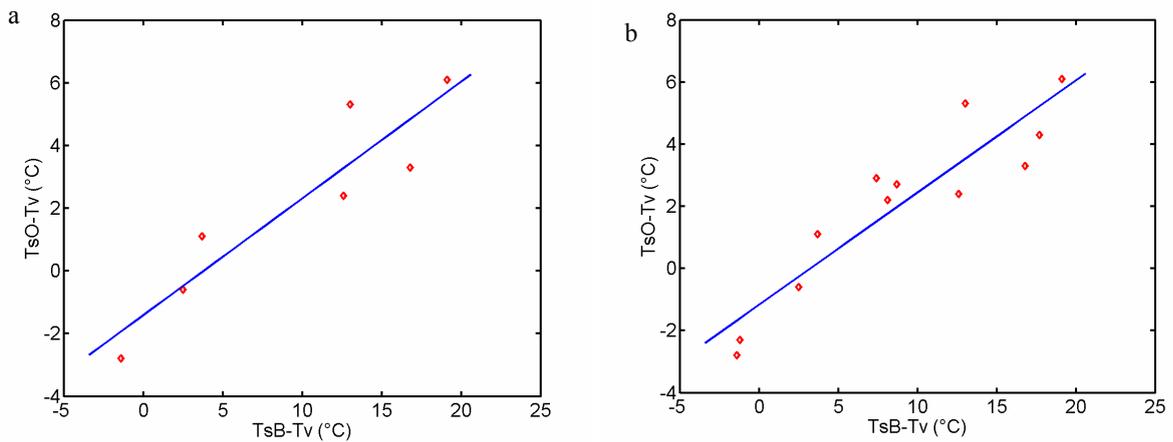


Figure 3.8 Relations entre TsB-Tv et TsO-Tv

Hypothèse à deux composantes

D'après les mesures de Jackson et al. (1979), Kimes et al. (1983) et Kustas et al. (1990), la végétation et le sol à l'ombre présentent une différence de TB plus faible que les différences avec le sol éclairé pour la plupart des mesures de jour, ce qui est aussi en accord avec nos mesures. Pour étudier la tendance des TB en fonction de l'heure des mesures, on suppose que la parcelle est une structure simplifiée qui contient seulement les deux composantes de sol éclairé et de végétation avec sol à l'ombre. Alors il est facile de distinguer sur les images thermiques ces deux composantes qui sont matérialisées par des rangs de sol et des rangs de couvert. Les rangs de sol observés sont principalement du sol éclairé et une petite partie de sol à l'ombre, les rangs de couvert contiennent la végétation et la plupart du sol à l'ombre. La TB des rangs de sol et des rangs de végétation sont respectivement Tsl et Tvl.

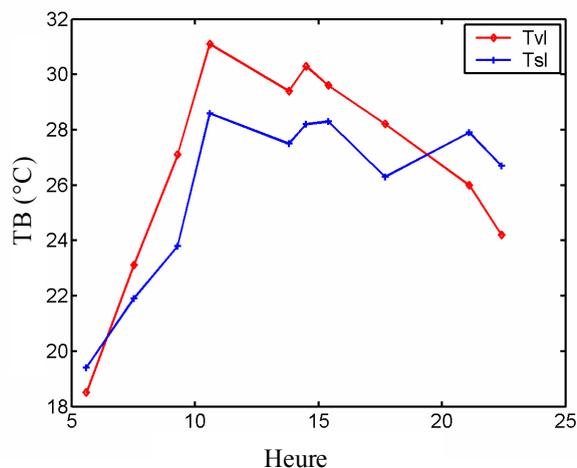


Figure 3.9 Evolution temporelle de la TB de deux parties du champ (rangs de sol et rangs de végétation) du 26 juillet 1999.

La figure 3.9 illustre l'évolution des températures de brillance Tvl et Tsl en fonction de l'heure locale, le 26 juillet 1999. Pendant la matinée, Tvl et Tsl augmentent rapidement. Au lever du Soleil, Tvl est plus élevée que Tsl. Après une heure d'ensoleillement environ (vers 8h), Tsl devient plus élevée que Tvl. Vers midi, Tvl et Tsl diminuent simultanément à cause d'une période d'irrigation de 20 mn (à partir de 11h30). L'après-midi, Tsl diminue de façon continue, Tvl reste relativement stable. La tendance peut s'exprimer clairement par la différence entre Tvl et Tsl.

La figure 3.10 montre la différence entre Tsl et Tvl en fonction de l'heure des mesures à différentes dates entre le 24 juin (JJ 175) et le 8 août (JJ 218). Avant le 15 Juillet (JJ 196), Tsl est toujours plus grand que Tvl, et la valeur maximale apparaît autour du midi local. Après le 26 Juillet (JJ 207), Tsl est inférieur à Tvl pendant la journée. Entre ces deux dates, les valeurs des différences de température fluctuent autour de zéro, et on peut considérer que le champ est constitué d'une seule composante. Comme nous l'avons souligné, la principale raison de cette variation est que l'accroissement de la densité du couvert atténue beaucoup le rayonnement solaire incident au sol. Un couvert de faible densité laisse le sol sous-jacent recevoir plus de rayonnement solaire pendant une durée plus grande, ce qui laisse la température du sol augmenter plus rapidement vers une valeur plus élevée.

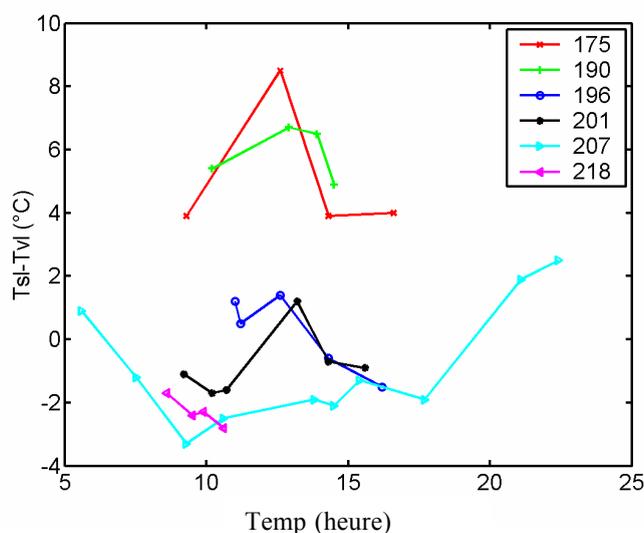


Figure 3.10 Différence entre Tsl et Tvl en fonction de l'heure à différentes dates entre le 24 juin (JJ 175) et le 8 août (JJ 218).

Pour toutes ces définitions des composantes de la parcelle, le sol éclairé est toujours considéré comme un paramètre indépendant du couvert de maïs. La figure 3.11 montre la relation entre la TBD du couvert et la fraction de sol éclairé. La mesure a été réalisée de 12h51 à 12h54 le 14 juin 1999. On diminue la fraction de sol éclairé en inclinant la caméra, le sol éclairé étant masqué par la végétation. Au contraire en visant au nadir,

une surface maximale du sol peut être vue, ce qui conduit à une valeur élevée de la fraction de sol éclairé. La TBD du couvert a été calculée comme suit :

$$T^4 = \frac{\sum_{i=1}^N T_i^4}{N} \quad (3.13)$$

où T est la TBD du couvert et T_i la TB du pixel i de la zone échantillonnée.

La zone échantillonnée a été définie comme un rectangle dont les extrémités sont distants de L, distance inter-rang (L). Il y a une très bonne relation entre la TB composite du couvert et la fraction de sol éclairé.

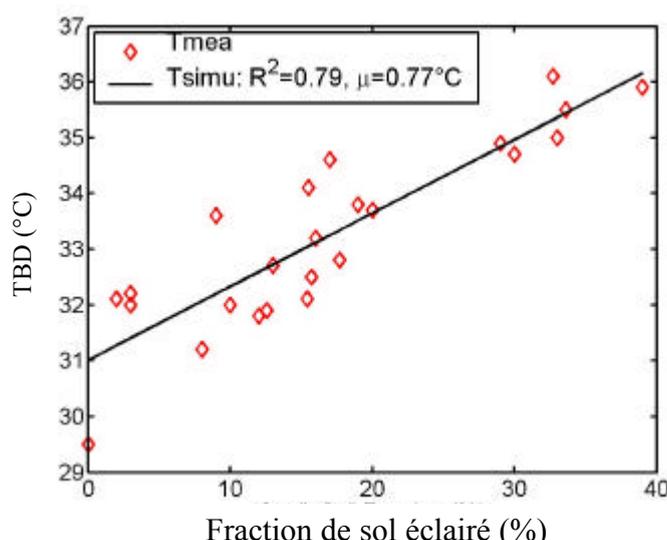


Figure 3.11 Relation entre la TBD du couvert et la fraction de sol éclairé.

3.3.4 Paramètres géométriques du couvert

Indice foliaire du couvert, hauteur et largeur des plantes et hauteur de base des tiges

La figure 3.12 présente des photos numériques du couvert de maïs prises au nadir à différentes étapes phénologiques du 4 juin (JJ 155) au 6 août (JJ 218). Toutes les photos ont été prises aux alentours de midi avec la caméra visible - proche infrarouge à six bandes spectrales. Sur ces images, nous pouvons évaluer certains paramètres de structure du couvert tel que le taux de couverture, la largeur de la plante et l'orientation azimutale des feuilles. On peut observer des bandes évidentes de sol éclairé jusqu'au 20 juillet (jour julien 201). Après cette date, la végétation domine le couvert mais la structure en rangs est toujours évidente.

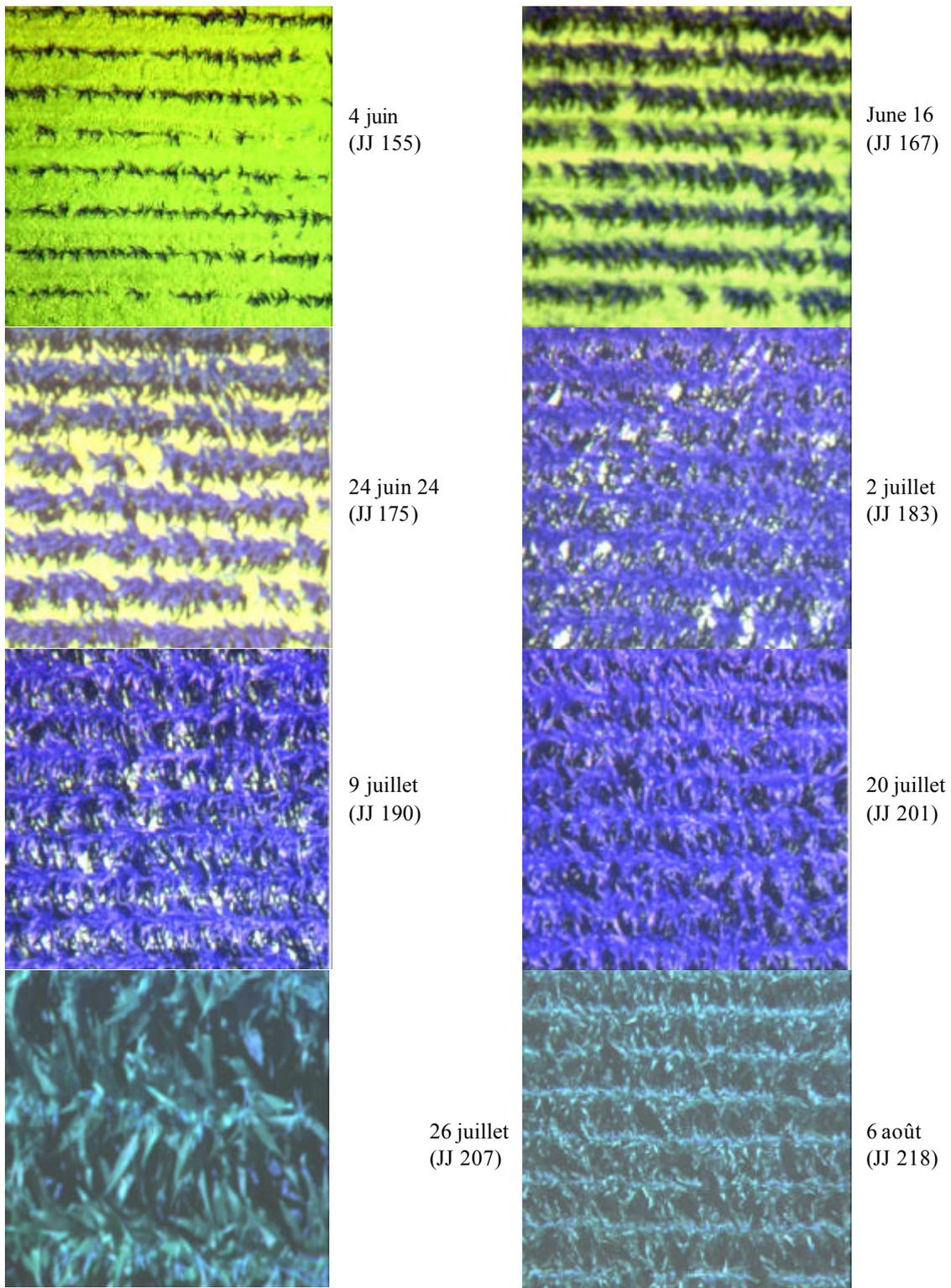


Figure 3.12 Photos numériques visibles du couvert de maïs à différentes périodes. Toutes les photos sont prises à midi.

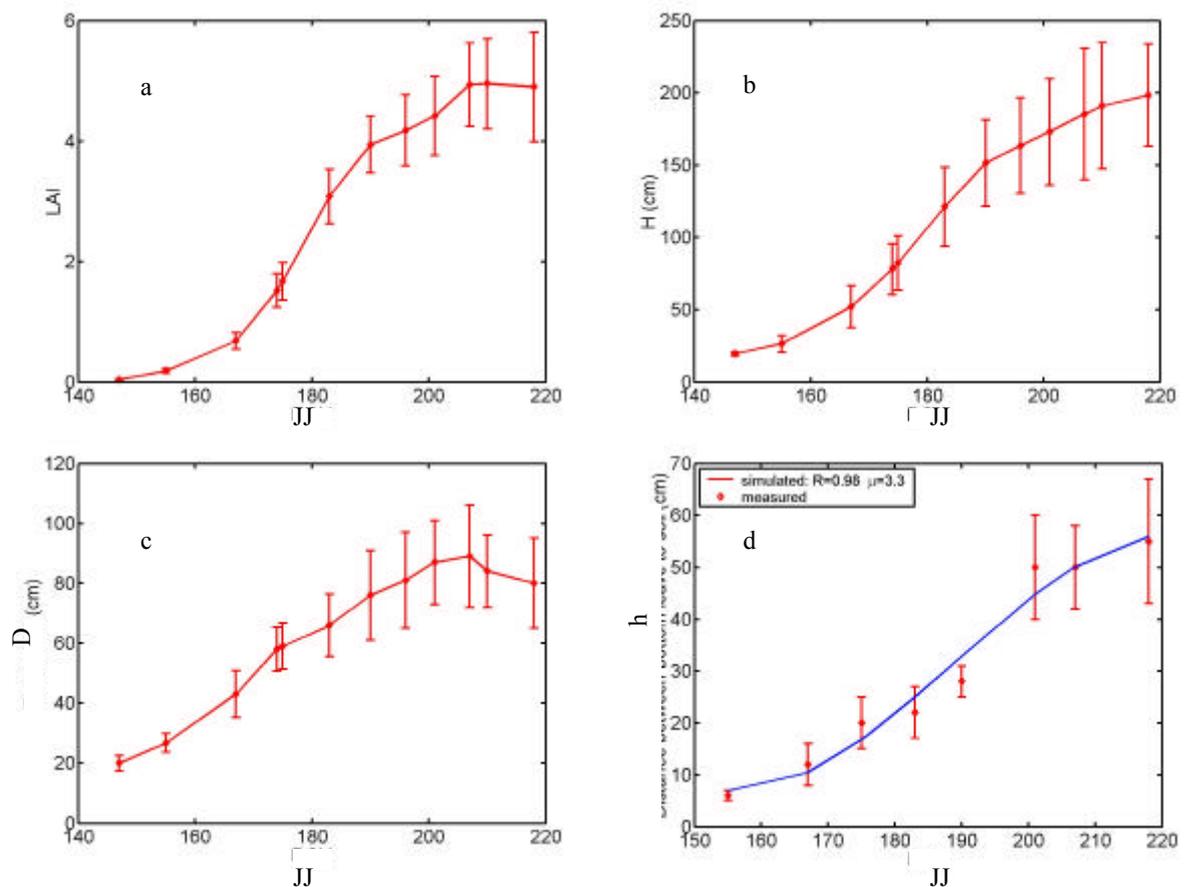


Figure 3.13 Evolution des paramètres de structure du couvert de maïs en fonction du jour julien: l'indice foliaire LAI (en haut à gauche); la hauteur de plante H (en haut à droite); la largeur de plante D (en bas à gauche) ; la hauteur de base des tiges h (en bas à droite).

La figure 3.13 représente l'évolution temporelle des principaux paramètres de structure du couvert, l'indice foliaire (LAI), la hauteur de plante (H), la largeur de plante (D) et la hauteur de base des tiges (h). Ils augmentent tous logiquement avec le temps pendant la période de croissance foliaire, jusqu'au 20 juillet (JJ 206). Après cette date, la hauteur de la plante continue à croître mais l'indice foliaire du couvert et la largeur des plantes diminuent légèrement à cause de la sénescence des feuilles.

Nous pouvons observer qu'il existe une très bonne corrélation entre l'indice foliaire LAI et la largeur de plante D (Figure 3.14a). Un modèle d'ajustement polynomial à l'ordre deux a donné un écart-type résiduel de 0.049 m quand on estime la largeur de plante à partir du LAI avec un coefficient de corrélation (R^2) de 0.98. Comme le LAI peut être estimé par télédétection du domaine visible - proche infrarouge, la largeur de plante sera également estimée de la même manière. Dans la figure 3.14b, nous pouvons constater que la hauteur de plante et la hauteur de base des tiges sont bien corrélées. Nous pouvons ainsi estimer la hauteur de base des tiges à partir de la hauteur de plante (écart-type résiduel de 4.3 cm avec un coefficient de corrélation de 0.95).

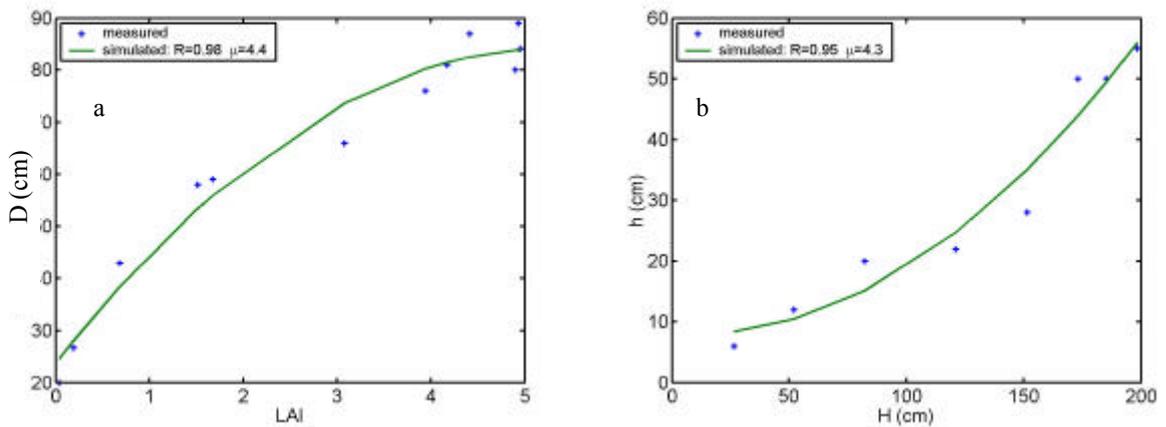


Figure 3.14 Relations entre le *LAI* et la largeur de plante *D* (a), entre la hauteur de plante *H* et la hauteur de base des tiges *h* (b)

La figure 3.15a représente la distribution de l'orientation azimutale des feuilles à deux dates différentes le 4 et le 16 juin (JJ 155 et JJ 167). On peut constater qu'en début de croissance (4 juin, JJ 155), l'orientation des feuilles est quasi aléatoire. Après onze jours de croissance foliaire rapide (16 juin, juillet 167), les feuilles sont orientées plutôt dans la direction perpendiculaire au rang (angle azimutal égal à 0°). Si on examine l'angle d'orientation moyen (figure 3.15b), nous pouvons constater que les feuilles s'orientent de plus en plus dans la direction perpendiculaire au rang.

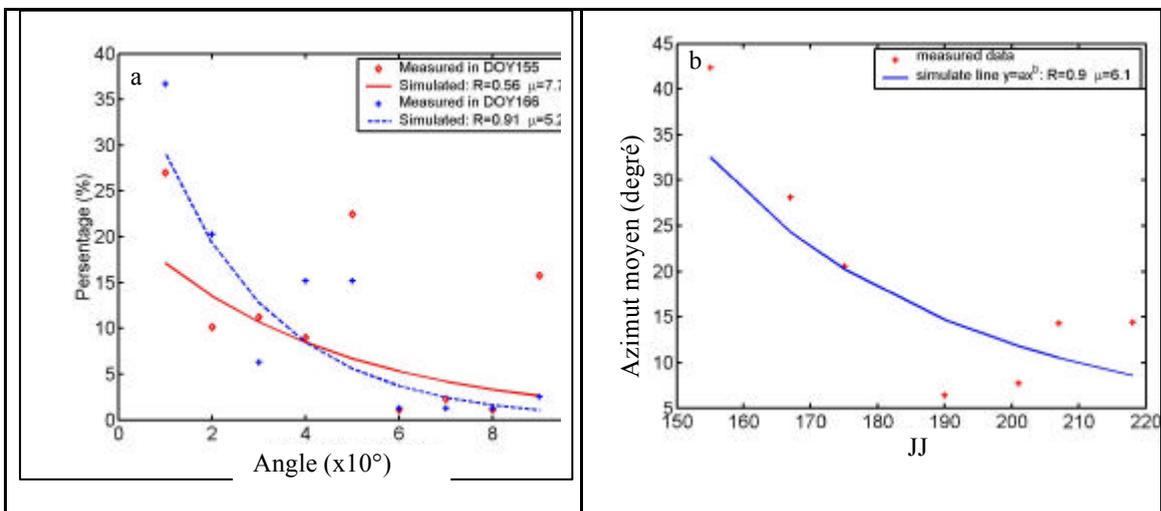


Figure 3.15 Orientation des feuilles des plantes, (a) distribution de l'orientation des feuilles à deux dates au début de la croissance du couvert; (b) évolution temporelle de l'orientation moyenne des feuilles.

Fonction de fraction de trous

La figure 3.16 représente une distribution de trous du couvert obtenue par une observation oblique à 45° par rapport au nadir. Ici, les trous sont représentés par le sol vu à travers la végétation. Ces figures ont été obtenues à partir d'images infrarouges thermiques prises la nuit (22h) au-dessus du couvert de maïs, le 26 juillet 1999 (figure 3.5a). Le fort contraste en TB entre le sol et les plantes a permis une réalisation facile de ce type de représentation, puis la mesure de la fraction de trou dans les directions observées. En utilisant l'objectif à 7° de champ, les effets angulaires à l'intérieur des images sont négligeables.

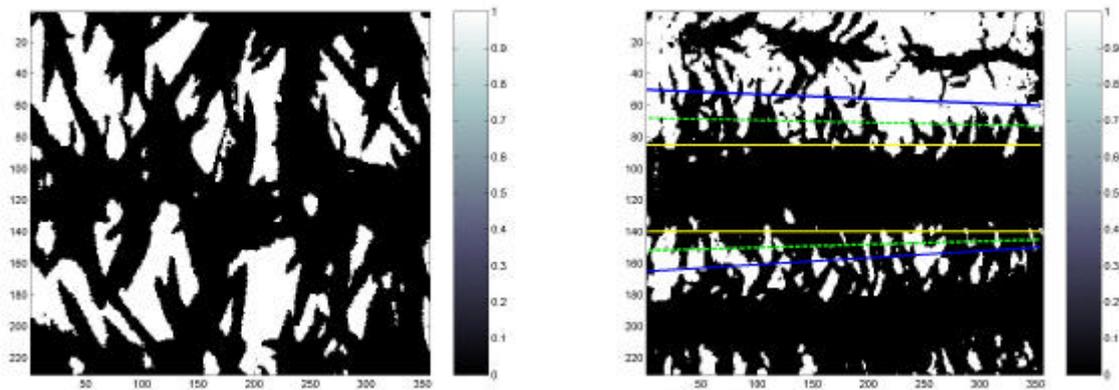


Figure 3.16 Distribution de trous obtenue par la segmentation des images IRT prises le soir à 22h du 26 juillet (à gauche: observation au nadir, à droite: observation perpendiculaire au rang selon un angle zénithal de 45°).

La figure 3.17 montre la variation de la fraction de trous en fonction de l'angle zénithal de l'observation pour trois directions azimutales (parallèle et perpendiculaire aux rangs, et à 45° par rapport à la direction des rangs). Nous pouvons constater que (1) la fraction de trous diminue logiquement et régulièrement avec l'augmentation de l'angle zénithal d'observation; (2) la fraction de trous est nettement supérieure dans le sens parallèle au rang à ce qu'elle est dans les autres directions; (3) la fraction de trous dans la direction à 45° de la direction des rangs est très proche de celle dans la direction perpendiculaire aux rangs. Un modèle polynomial du second degré décrit bien les variations zénithales de la fraction de trous, avec de forts coefficients de corrélation (tableau 3.2)

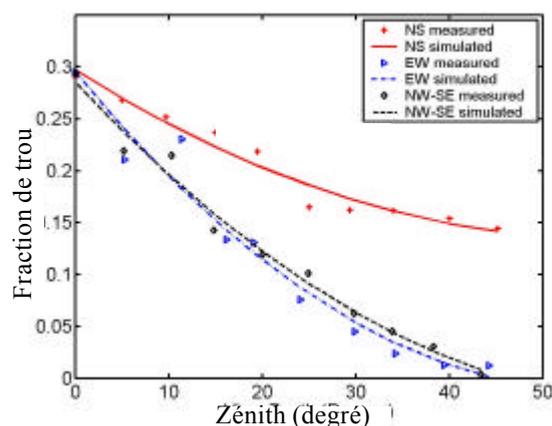


Figure 3.17 Variation zénithale de la fraction de trous dans trois directions azimutales. Les points représentent des mesures obtenues à l'aide des images de nuit du 26 Juillet de la caméra IRT. Les courbes correspondent au résultat de l'ajustement.

Tableau 3.2 Résultat de l'ajustement de la loi de variation zénithale de la fraction de trous pour trois directions azimutales

Direction azimutale	Relation ajustée	Corrélation (R^2)	Ecart-type
N-S ($\varphi=0$, parallèle au rang)	$0.00005\theta^2 - 0.0057\theta + 0.30$	0.96	1.1
NO-SE ($\varphi=45^\circ$)	$0.0001\theta^2 - 0.0097\theta + 0.284$	0.98	1.2
E-O ($\varphi=90^\circ$, normal au rang)	$0.0001\theta^2 - 0.011\theta + 0.295$	0.97	2.0

θ : angle zénithal de l'observation

3.3.5 Humidité du sol et vitesse du vent

La figure 3.18 illustre l'effet de la variation temporelle de l'humidité du sol pour deux emplacements et à deux profondeurs (5cm et 35cm). Au cours de l'expérience, nous constatons que l'humidité à 5 cm est systématiquement inférieure à celle de 35 cm. Cela est probablement dû au dessèchement de la couche superficielle. Cet écart diminue globalement avec l'augmentation de la densité de la végétation. Pour les courbes à 5 cm, les pics correspondent aux irrigations. Ces pics sont peu visibles pour les mesures à 35 cm. La tendance à la diminution de l'humidité du sol à 35 cm est probablement un phénomène de diminution de la réserve en eau du sol.

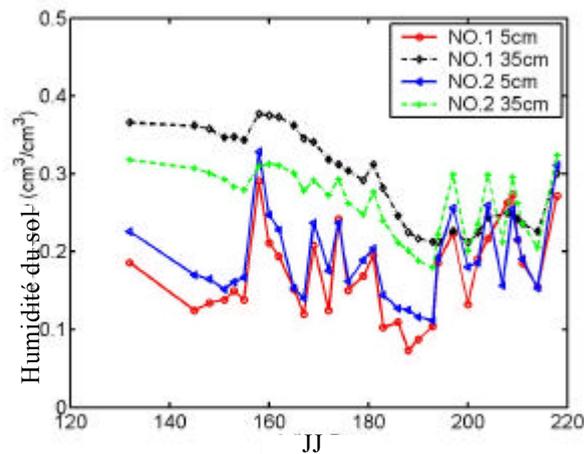


Figure 3.18 Evolution de l'humidité du sol mesurée en deux emplacements et à deux profondeurs (5 cm et 35 cm).

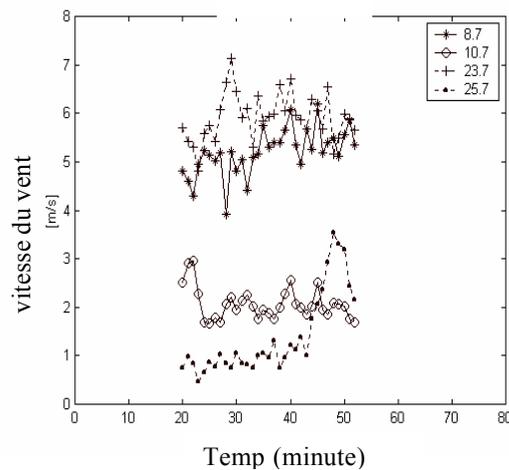


Figure 3.19 Fluctuations de la vitesse du vent mesurée à 2 mètres du sol pour 4 dates (8, 10, 23 et 25 juillet 1999)

La figure 3.19 représente les fluctuations de la vitesse de vent mesurée à 2 mètres du sol pour 4 dates différentes. Nous pouvons constater des situations bien différentes suivant la date et une fluctuation temporelle importante. La vitesse du vent peut affecter l'écart de température entre les composantes, et sa fluctuation peut introduire des erreurs sur les mesures IRT. En plus, la vitesse du vent peut entraîner des gradients thermiques dans le champ de maïs, sources d'erreurs sur les mesures IRT.

3.4 Conclusion

Dans l'infrarouge thermique, un couvert végétal est considéré comme composé soit d'une seule composante (couvert), soit de deux composantes (sol et végétation), soit de trois composantes (sol éclairé, sol à l'ombre, végétation), soit de quatre composantes (sol éclairé, sol à l'ombre, végétation éclairée, végétation à l'ombre). Nos observations de la distribution de TB au sein du couvert de maïs en rangs à partir des images d'une caméra thermique, ont montré que les feuilles éclairées et à l'ombre présentent une différence typiquement inférieure à 1 K. L'écart-type des variations de TB de la végétation (éclairée et à l'ombre) reste toujours faible (1.5K). Dans les cas d'hétérogénéité maximale des températures du couvert, les sols éclairés et à l'ombre peuvent avoir des températures de 16K et 6K supérieures à celle de la végétation. A partir de ces observations, nous pouvons considérer qu'un couvert de maïs est composé de trois composantes en TB. Il faut noter que ces trois composantes peuvent évoluer vers deux, voire même une seule composante en fonction de l'heure de la mesure, de la densité de la végétation et de l'état hydrique du sol.

L'indice foliaire augmente pendant la période de croissance foliaire et devient stable pendant la période de remplissage des grains. Il subit une légère diminution pendant la période de sénescence. La largeur normalisée des rangs de végétation augmente également avec le temps. Elle est bien corrélée avec les valeurs de l'indice foliaire. Il est ainsi possible d'estimer cette largeur à partir de l'indice foliaire, lui-même estimable à partir des données de la télédétection du domaine visible – proche infrarouge. L'orientation des feuilles est quasi aléatoire au début de la croissance mais prend progressivement la direction dominante perpendiculaire aux rangs.

Les images IRT prises de nuit selon différentes directions permettent d'évaluer facilement et précisément la fraction de trous d'un couvert de maïs en rangs. Les résultats montrent que la fraction de trous est bien différente et supérieure dans la direction du rang à sa valeur dans les directions perpendiculaires au rang et à 45° de celui-ci.

Chapitre 4

Analyse des perturbations des mesures multidirectionnelles de la TBD du couvert en rangs

4.1 Introduction

Dans le domaine du visible et du proche infrarouge, le paramètre de surface mesuré, la réflectance, est très stable dans le temps à l'échelle de quelques jours. Ce n'est pas le cas pour l'IRT, dans lequel la TBD mesurée varie continuellement et fluctue à l'échelle de la seconde, sans loi prévisible. Bien que des instruments précis aient été utilisés, et que les cibles et l'environnement de mesure aient été choisis soigneusement, il reste beaucoup d'influences comprises sur les mesures multidirectionnelles, à la fois dans les étapes de mesure et dans les étapes de traitement des données.

Une mesure multidirectionnelle consiste à mesurer une cible dans plusieurs directions d'observation. Comme nous l'avons indiqué dans les paragraphes 2.5 à 2.7 (chapitre 2), ceci peut être réalisé en visant une même surface dans différentes directions, ce qui entraîne que ce sera souvent à des moments très différents, ou en visant dans différentes directions des surfaces différentes en considérant qu'elles ont des propriétés identiques (ce qui peut être réalisé plus rapidement). Cependant, la TBD des surfaces varie et fluctue pendant la période de mesure, et les surfaces sont généralement hétérogènes. En outre, la précision de l'instrument utilisé et le protocole de mesures peuvent affecter directement la qualité de la mesure finale.

Dans ce chapitre, nous allons analyser les facteurs perturbateurs des mesures multidirectionnelles de la TBD, puis quantifier les erreurs liées aux effets temporels et spatiaux du couvert de maïs dans notre configuration de mesures.

4.2 Analyse générale des facteurs perturbateurs des mesures multidirectionnelles de la TBD

Les facteurs perturbateurs des mesures multidirectionnelles de la TBD peuvent être regroupés en trois catégories :

1. Les effets instrumentaux: incertitude d'étalonnage, résolution radiométrique et sensibilité spectrale et pour un système imageur, les effets angulaires, la résolution spatiale, la fonction de transfert de modulation (FTM);

2. Les effets de la cible observée – essentiellement des effets spatiaux : la structure géométrique du couvert, les propriétés radiatives des éléments constituant le couvert, et leur hétérogénéité;
3. Les effets de l'environnement - essentiellement des effets temporels: la position du soleil, l'humidité du sol, l'atmosphère et le vent.

Il faut noter que l'importance de ces trois effets est étroitement liée aux protocoles de mesure.

4.2.1 Effets instrumentaux de la caméra IRT Inframetrics

Aspects radiométriques

La performance radiométrique d'un instrument est avant tout caractérisée par sa précision d'étalonnage, qui est la précision de transformation du signal mesuré en une grandeur physique d'intérêt, la TB dans notre cas. Elle est également caractérisée par ses sensibilités radiométrique et spectrale, son bruit équivalent, ses niveaux de quantification, sa stabilité temporelle, etc...

Les caractéristiques générales de la caméra IRT Inframetrics sont présentées dans le tableau 2.1 du chapitre 2. Elle possède un système de refroidissement du détecteur par Stirling à 77K, qui assure un très bon rapport signal sur bruit. De plus, l'étalonnage absolu de cet appareil a été étudié soigneusement par Jacob (1999) en tenant compte de la température ambiante de l'instrument et de sa dérive temporelle. L'incertitude finale sur les mesures a été estimée à 0.5K avec un seuil de confiance de 95% (Jacob 1999). Dans notre expérimentation, nous avons installé une petite piscine d'eau au sol pour la vérification de l'étalonnage. Les résultats sont présentés au paragraphe 4.4.

Effets propres du système imageur

En utilisant un objectif de grande ouverture (grand champ), nous pouvons effectuer des mesures multidirectionnelles selon des directions très différentes. Il faut prendre en compte plusieurs facteurs géométriques: la déformation de l'image, la variation de la taille du pixel en fonction de l'angle d'observation, la résolution angulaire correspondante.

Le système imageur introduit également des effets perturbateurs supplémentaires. On observe des effets angulaires dans lesquels la sensibilité radiométrique varie en fonction de l'angle d'observation. Une cible isotrope paraît plus froide si elle est située en bord d'image que si elle se trouve au centre. L'amplitude de variation pour la caméra Inframetrics est relativement faible (de l'ordre de 0.5K, Lagouarde et al., 2000). Un modèle de correction a été appliqué dans notre expérimentation, basé sur les résultats de Lagouarde et al. (2000).

La fonction de transfert de modulation (FTM) est un paramètre important du système imageur. Elle décrit la capacité de restitution sur l'image du contraste en fonction de la fréquence spatiale. Le caractère imparfait de la FTM entraîne une réduction du contraste entre les pixels voisins: l'image devient floue. Mais cet effet est négligeable dans notre

cas, parce que nous utilisons la moyenne de groupes de pixels voisins, plutôt que leurs valeurs individuelles.

4.2.2 Effets de la cible observée

Dans le chapitre 2, nous avons présenté les quatre protocoles possibles de mesures multidirectionnelles de la TBD. Ils impliquent d'observer des parties différentes du couvert et ceci pendant une durée de quelques minutes à quelques dizaines de minutes. Ainsi, les variations spatiales et temporelles de TBD du couvert affectent la qualité de la mesure.

L'hétérogénéité spatiale du couvert peut se décomposer en trois niveaux:

- (1) les plantes individuelles ne sont pas identiques (hauteur de la plante, nombre de feuilles, largeur et orientation de celles-ci, etc...);
- (2) les propriétés du sol varient à l'intérieur de la parcelle : profondeur de sol, humidité de sol, disponibilité en azote, etc...;
- (3) la répartition spatiale des plantes varie (structure en rangs, taux de couverture différent) en rapport avec l'hétérogénéité du semis et du sol.

En conséquence, d'une part, la TB des éléments du couvert varie spatialement, et d'autre part la proportion relative de la végétation par rapport au sol varie également spatialement. Ces deux effets conduisent à des variations de TBD à la fois en valeur absolue et en valeur relative selon la direction.

4.2.3 Effets de l'environnement

Une mesure multidirectionnelle complète nécessite plusieurs minutes, voire plusieurs dizaines de minutes. Pendant ce temps, la TBD du couvert évolue et fluctue.

L'évolution lente de la TBD est essentiellement due à celle du rayonnement solaire incident, tant en qualité radiométrique (intensité, distribution spectrale) qu'en géométrie (position du Soleil, rapport des flux direct et diffus). Elle est également due à l'évolution de la température de l'air, de son humidité et de l'évapotranspiration.

Les fluctuations de la TBD peuvent être dues (1) à la fluctuation des états atmosphériques (passages nuageux, fluctuations de l'humidité et des aérosols dans l'atmosphère), et (2) notamment à la fluctuation du vent (en vitesse et en direction) qui modifie la structure du couvert et affecte les échanges locaux d'énergie.

Il faut noter également que d'autres paramètres micro-météorologiques peuvent avoir une certaine hétérogénéité spatiale. Par exemple, la température de l'air au sein du couvert peut être différente spatialement dans une parcelle à cause des influences extérieures (obstacles, propriétés des surfaces environnantes, etc...) ou de l'influence propre du couvert (densité de végétation, humidité du sol, etc...).

Ces effets environnementaux perturbent à la fois la TB des composantes et la répartition relative des composantes, et perturbent ainsi la TBD absolue et ses variations directionnelles.

4.3 Evaluation de l'étalonnage de la caméra Inframetrics

Des caractérisations radiométriques et géométriques approfondies de la caméra IRT Inframetrics ont été réalisées pendant la campagne de mesures Alpilles-RESEDA (Jacob et al., 1999, Lagouarde et al., 1999, Gu et al., 2000). Afin d'évaluer la précision de mesure, nous avons placé à l'extrémité de la parcelle de maïs, une piscine de 2 mètres de diamètre et de 20 cm de profondeur pendant toute la durée de la campagne de mesures. La caméra était placée en position habituelle de mesure, c'est-à-dire sur la flèche de la grue à 23 mètres du sol. La température de l'eau de la piscine était mesurée par un thermomètre digital étalonné à 0.1°C près. Avant d'effectuer ces contrôles, l'eau était agitée de façon à obtenir une température homogène dans la piscine. Des images de cette piscine ont été prises par la caméra quasi simultanément aux mesures de température par thermomètre.

La figure 4.1 représente les mesures de la caméra visant la piscine entre 8 et 16 heures ; le 23 juin 1999. Nous pouvons constater que:

- La relation entre la température mesurée par la caméra et celle du thermomètre est bien linéaire avec une pente très proche de 1 et un écart-type de 0.25°C. Cela montre la grande stabilité radiométrique et temporelle de la caméra ainsi que la fiabilité de la chaîne de traitement radiométrique;
- La température de brillance de la piscine estimée par la caméra est systématiquement inférieure à celle mesurée par le thermomètre de l'ordre de 1.6°C. Cet écart peut être dû aux dérives ou à l'incertitude sur les coefficients d'étalonnage utilisés. Il est partiellement dû à l'effet de l'émissivité qui est inférieure à 1. Il peut y avoir également un effet notable dû au refroidissement de la surface par l'évaporation – ceci en dépit du brassage de l'eau.

Cet écart systématique peut être ajusté en introduisant une correction sur l'étalonnage absolu de la caméra. Mais, notre étude s'intéresse plutôt à la variation directionnelle de la TBD qu'à sa valeur absolue, et nous conserverons donc l'étalonnage initial. Comme nous sommes plutôt intéressé à la variation directionnelle relative et non à la valeur de température absolue, la TB estimée par la caméra est très précise, et l'incertitude finale, toutes erreurs instrumentales confondues, ne doit pas dépasser 0.5K au seuil de confiance de 95%.

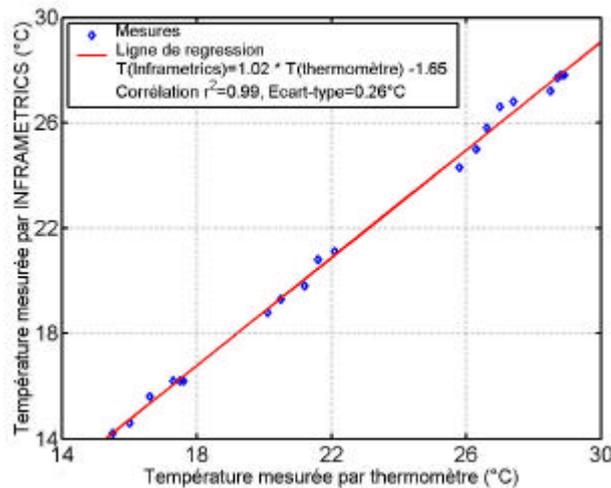


Figure 4.1 Relation entre la TB d'une piscine d'eau mesurée par la caméra Inframetrics et la température mesurée par un thermomètre , le 23 juin 1999

4.4 Evaluation des effets spatiaux

L'hétérogénéité spatiale d'un couvert de maïs en rangs peut être caractérisée à trois niveaux:

1. *l'hétérogénéité spatiale absolue de la TBD dans une direction donnée;*
2. *l'hétérogénéité spatiale de la variation directionnelle, c'est-à-dire de la différence de TBD dans deux directions;*
3. *les effets combinés liés à la structure en rangs et au champ de l'instrument de mesure.*

4.4.1 Hétérogénéité spatiale absolue

En déplaçant la grue, nous pouvons prendre des images IRT à des endroits différents de la parcelle. Dans chaque image individuelle, nous pouvons sélectionner des portions d'image de taille différente pour examiner l'hétérogénéité à des résolutions spatiales différentes.

La figure 4.2a représente la variation de la TBD parallèlement aux rails de la grue (direction nord-sud, également direction des rangs). Les mesures ont été prises à 13h30, le 24 juin 1999, pour des surfaces carrées visées verticalement, présentant cinq tailles différentes allant de 1 à 25 rangs de côté. Nous pouvons constater la forte amplitude des variations (entre les températures 31.5 et 37.5°C) pour les surfaces de taille égale à un rang, et sa diminution avec l'augmentation de la taille d'échantillonnage (33-35°C pour les surfaces de taille égale à 9 rangs).

La figure 4.2b est obtenue pour le même jour à 8 heures. Nous pouvons constater que les variations sont quatre fois plus faibles qu'à 13h30. L'amplitude de variation à 9 rangs est d'environ 1°C. Cette différence de comportement de la TBD dépend du

contraste entre la TB du sol et de la végétation, qui varie dans la journée. L'hétérogénéité spatiale est dominée par l'hétérogénéité du taux de couverture de la végétation. Quand la température de la végétation est proche de celle du sol (c'est le cas le matin à 8 heures), la TBD composite du couvert devient plus homogène.

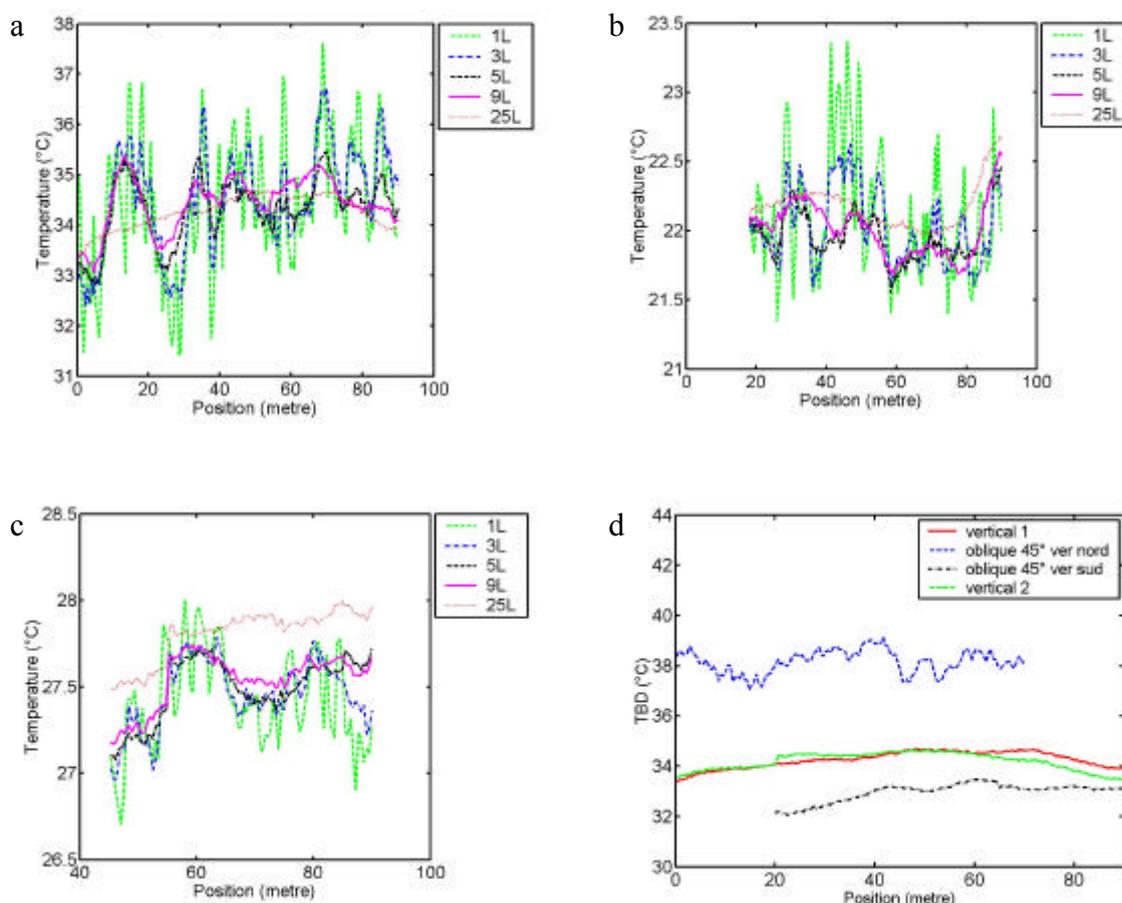


Figure 4.2 Variations de la TBD parallèlement aux rails de la grue.

L'hétérogénéité spatiale en TBD varie non seulement pendant la journée, mais aussi en fonction de la date à cause de la croissance de la végétation. La figure 4.2c illustre le résultat obtenu à 9h locale le 20 juillet 1999. Elle montre que par rapport au 24 juin, les variations spatiales pour les surfaces de grande taille sont comparables, tandis qu'avec les surfaces de petite taille (par exemple un rang de côté), l'hétérogénéité spatiale de la TBD est réduite de manière significative à cause de l'accroissement de la largeur de la partie végétale (c'est à dire de d et a) et de l'homogénéisation spatiale du taux de couverture.

L'hétérogénéité spatiale en TBD dépend également de la direction de visée. La figure 4.2d montre que, pour des images d'environ 25 rangs, la variation spatiale est la plus forte quand la direction de visée est proche de la direction anti-spéculaire (vers le nord)

et la plus faible dans la direction opposée (vers le sud). L'explication de cet effet peut être la plus grande importance de sol éclairé dans la direction anti-spéculaire.

4.4.2 Hétérogénéité spatiale de la variation directionnelle

Nous avons constaté dans la figure 4.2 que la parcelle de maïs est hétérogène, et son hétérogénéité varie dans la journée, en fonction de l'angle de visée et en fonction de la date d'observation. C'est cette hétérogénéité qu'il faut prendre en compte si on s'intéresse à la TBD absolue. Mais dans notre étude, nous nous sommes davantage intéressés à ses variations relatives directionnelles. Cela nous conduit à étudier comment se comporte spatialement le signal directionnel, c'est-à-dire la différence de signal dans deux directions.

Pour cette étude, nous allons utiliser les mesures réalisées en des endroits différents parallèlement aux rails de la grue. Au lieu d'analyser la TBD absolue, nous allons créer un indice qui est la différence de TBD entre la visée verticale et la visée à 30° du nadir vers l'ouest ($T_0 - T_{30}$)

La figure 4.3 montre la variation de cet indice ($T_0 - T_{30}$) parallèlement aux rails de la grue, avec trois tailles d'échantillon (des carrés de 1, 3 et 9 fois la distance inter-rangs, soit 0.8, 2.4 et 7.2 m de côté respectivement). La distance entre deux échantillons est de 12 mètres. La figure 4.3 présente six situations: (a) 14h54 le 16 juin; (b), (c) et (d) 7h53, 13h52 et 15h49 le 24 juin; (e) et (f) 9h49 et 15h09 le 22 juillet.

Nous pouvons déduire deux informations de la figure 4.3:

- De manière similaire à la variation spatiale de TBD absolue (paragraphe 4.4.1), l'hétérogénéité spatiale directionnelle varie également dans la journée (figure 4.3b, 4.3c et 4.3d) avec le maximum de variation vers 14 heures (figure 4.3c). Mais cette différence dans la journée devient négligeable quand le couvert devient dense comme on peut l'observer pour la date du 22 juillet (figure 4.3e et 4.3f).
- L'hétérogénéité spatiale directionnelle dépend de la date d'observation. Elle ne varie pas linéairement avec le temps (ou la croissance de la végétation), mais présente un maximum au milieu du cycle de croissance (pour la date du 24 juin dans la figure 4.3). La raison est que le taux de couverture de la parcelle présente lui-même un maximum d'hétérogénéité.
- L'amplitude de variation est réduite quand on s'intéresse à la variation directionnelle de la TBD au lieu de sa valeur absolue. En comparant la figure 4.3c avec la figure 4.3a issues des mêmes mesures, nous pouvons constater que les amplitudes de variation maximale sont réduites de l'ordre de 1°C pour les trois tailles d'échantillon considérées (1, 3 et 9 fois la distance inter-rangs);
- L'hétérogénéité diminue avec l'augmentation de la taille de l'échantillon.

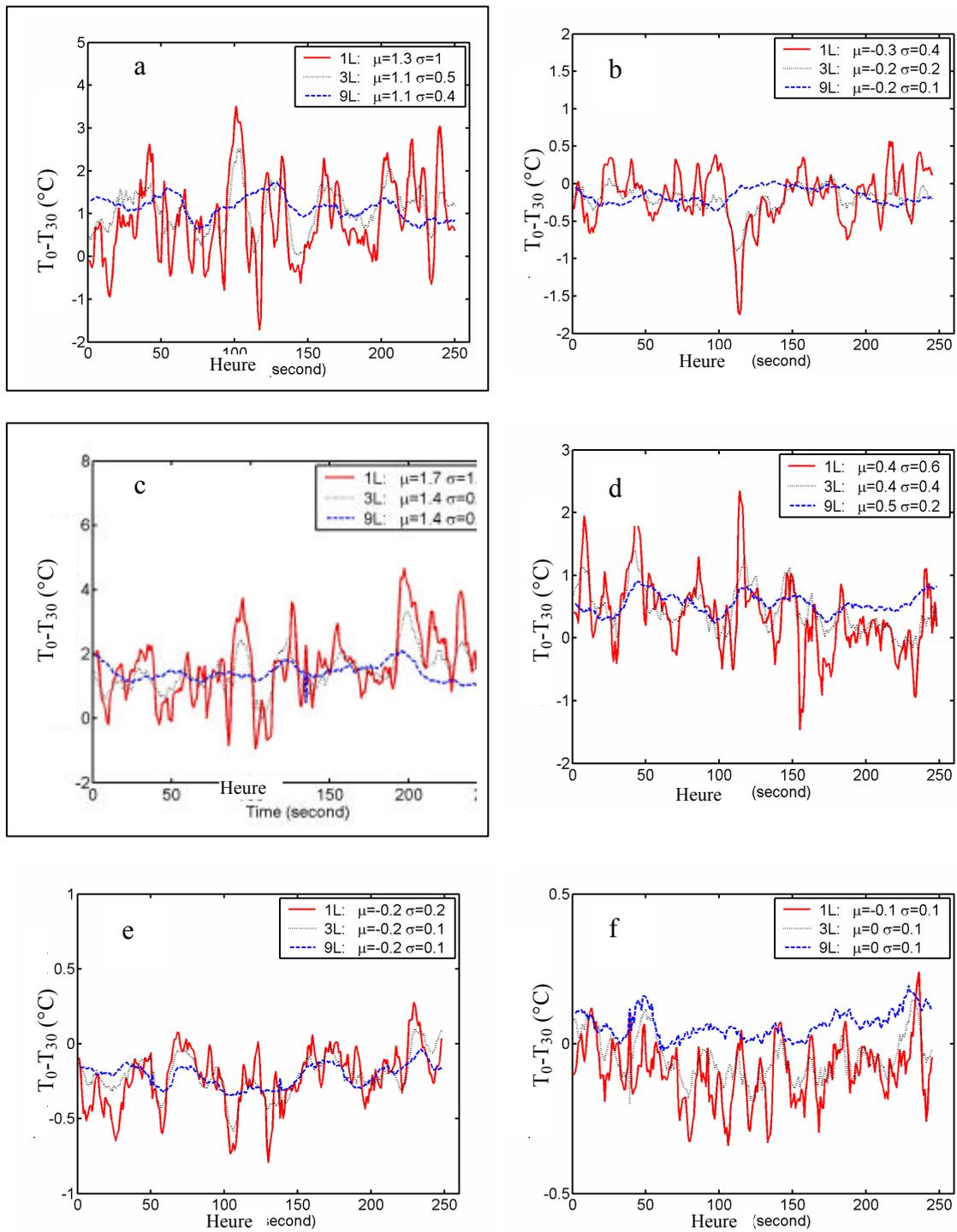


Figure 4.3 Hétérogénéité spatiale directionnelle du couvert de maïs dans diverses conditions

4.4.3 Position, taille d'échantillon et champ correspondant

En plus de l'hétérogénéité à l'échelle de la parcelle, un couvert en rangs introduit une erreur supplémentaire dans la mesure directionnelle de la TBD. En effet, même quand on considère une surface de couvert de taille multiple entier d'un rang, la TBD composite mesurée varie en fonction de deux facteurs: le calage de la surface observée par rapport à la position des rangs et l'angle d'ouverture utilisé (champ) pour mesurer le signal de cette surface.

Effet de la position d'échantillonnage

Prenons l'exemple de la mesure d'une cible de dimension une distance inter-rangs, la figure 4.4 illustre deux situations de mesure pour son observation. Dans ces deux situations, le rapport des contributions du sol et de la végétation est différent. De plus, dans une situation on observe la couche supérieure végétale alors que dans l'autre on observe aussi les parois verticales.

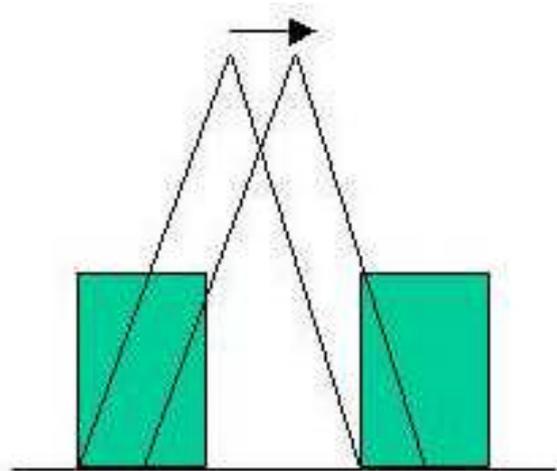


Figure 4.4 Deux situations de mesure pour l'observation d'un rang.

La figure 4.5 est un exemple de résultats illustrant cet effet. Les images utilisées ont été prises le 24 juin à 13h15 à 2 mètres du couvert pour avoir une résolution spatiale élevée. La surface considérée est celle d'un carré de côté égal à la distance inter-rangs (soit 0.8x0.8m), ce qui correspond à un champ de 16° pour une visée oblique à 15° vers l'ouest. En déplaçant la caméra dans le sens perpendiculaire au rang, nous obtenons des TB différentes (figure 4.5). L'amplitude de variation atteint 5°C . Il faut noter que la zone d'étude a été soigneusement choisie de manière à éviter une variation spatiale locale. Une analyse théorique plus approfondie sera présentée dans le chapitre suivant, qui confirme cette amplitude de l'effet de rang.

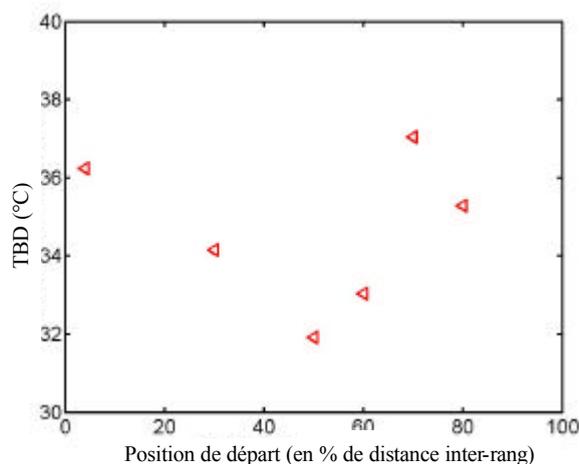


Figure 4.5 Variation de la TB d'un rang de maïs en fonction de la position de départ à partir du milieu entre deux rangs de végétation. La position est exprimée en % de la distance inter-rangs. La position zéro se trouve au milieu de la bande de sol nu dans le sens du rang.

Effet de la taille de l'échantillon et du champ associé

Pour un couvert en rangs, non seulement le calage de la surface échantillonnée affecte la mesure de la TBD, mais la dimension de cette surface et du champ associé modifie aussi sa valeur.

Nous avons vu l'effet de la taille lorsqu'elle est un multiple entier de la distance inter-rangs. Pour des tailles multiples non entières de cette distance, nous pouvons diviser la surface en deux parties: une partie multiple entier du rang dont le signal est représentatif du couvert en rangs, et la partie restante inférieure à une distance inter-rangs qui privilégiera la contribution du sol par rapport à celle de la végétation, ou inversement.

L'effet du champ peut être expliqué à l'aide de la figure 4.6. Prenons l'exemple d'une visée verticale. L'observation était suffisamment binaire (c'est le cas des mesures aéroportées et satellitaires), les faisceaux d'observation sont parallèles et les éléments vus seront le sommet de la végétation et le sol. Pour une mesure depuis le sol, nous utilisons au contraire un appareil ayant une certaine ouverture de champ (pour observer une surface suffisante). Ainsi, nous pouvons constater que les éléments vus ne sont plus les mêmes. La figure 4.6 présente les variations de la TBD en fonction de la taille de l'échantillon pour différentes directions de visée dans le plan perpendiculaire au rang. Les courbes bleues et rouges correspondent respectivement aux surfaces débutant au milieu d'un rang de végétation, et décalée de la moitié d'une distance inter-rangs (au milieu d'une bande de sol nu)..

Pour une visée verticale, quand la surface échantillonnée est inférieure au rang, on peut avoir des valeurs de mesures très différentes en fonction de sa position de départ dans le rang. L'amplitude de variation est donnée par l'écart entre les courbes bleue et rouge. Quand la surface augmente, le champ augmente proportionnellement. On observe alors

que la TBD diminue, ce qui est dû au fait qu'on observe le couvert de façon plus oblique. Dans les visées obliques, la proportion de végétation est plus importante et en observation rasante on ne voit plus que la végétation. Les petites oscillations autour de la tendance sont les effets de la position de calage de surface considérée lié au champ.

Cet effet de taille d'échantillon (lié au champ) devient faible pour des visées obliques. Cela est dû au fait que la proportion de sol dans le couvert vu obliquement est faible, et sa variation avec l'angle d'observation négligeable.

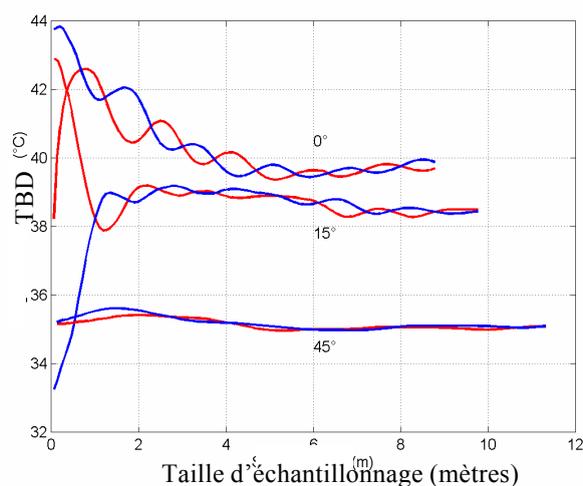


Figure 4.6 Variations de la TBD simulées en fonction de la taille de l'échantillonnage et du zénith de visée. Les courbes bleues correspondent aux observations d'une surface centrée sur le rang de la végétation, et celles en rouges centrées sur la bande sol nu du rang, conditions générales du couvert et du soleil à midi le 16 Juin 1999).

4.5 Evaluation des effets temporels

La TBD peut changer pendant la période de mesure. Cette variation temporelle peut être rapide à cause de la turbulence liée au vent, des passages nuageux et des fluctuations de la nébulosité. Elle peut être lente, liée au mouvement du Soleil et à l'évolution de la température de l'air. En comparant des mesures prises par la caméra, de la même surface à des instants différents, nous pouvons évaluer l'amplitude de cette variation temporelle. Les mesures ont toutes été prises dans la même direction de visée pour éviter les perturbations angulaires.

4.5.1 Fluctuations rapides

La figure 4.7 montre l'évolution temporelle de la TBD avec des tailles d'échantillon différentes. Les figures 4.7a et 4.7b correspondent aux mesures du 20 juillet à 9h43 et 15h01, et la figure 4.7c aux mesures du 22 juillet à 9h27 (fréquence de mesure de 6Hz).

La vitesse du vent pour ces trois situations était faible avec des valeurs moyennes respectives de 0.9, 1.3 et 1.9 m/s.

Le couvert était dense avec une TB de végétation supérieure à celle du sol systématiquement à l'ombre. Quand la surface considérée est plus grande, l'augmentation correspondante du champ conduit à une augmentation de la proportion de végétation (effet de mesure oblique), et donc à une augmentation de la TBD.

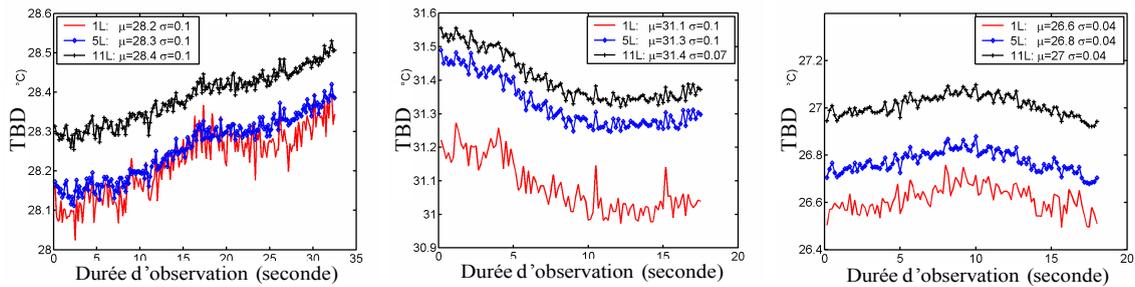


Figure 4.7 Fluctuations de la TBD d'un couvert de maïs; (a) et (b) correspondent aux mesures du 20 juillet à 9h43 et à 15h01; (c) correspond aux mesures du 22 juillet à 9h27.

Nous pouvons observer à la fois une fluctuation très rapide de la TBD (environ 0.05°C) et une variation lente (environ 0.2°C) pendant les durées d'observation de 20 secondes. La fluctuation rapide peut être expliquée par le bruit temporel de la caméra et par l'échange rapide des flux entre la surface et l'atmosphère. Ce phénomène avait fait l'objet d'une étude approfondie par Lagouarde et al. (1997). La variation lente peut être liée aux changements de rayonnement et de température de l'air, et également à la variation lente du vent. On voit une augmentation dans la figure 4.7a (mesures du matin) et une diminution dans la figure 4.7b (mesures de l'après-midi), en rapport avec l'évolution du rayonnement et de la température de l'air. La figure 4.7c montre une stabilité approximative. Dans notre expérimentation, la TBD est considérée stable à l'échelle de temps de 20 secondes, et les fluctuations sont considérées comme des erreurs résiduelles. Nous pouvons constater également que l'augmentation de la surface visée diminue légèrement l'amplitude des fluctuations rapides mais reste sans conséquence sur les variations lentes.

4.5.2 Variations lentes

La figure 4.8 montre les variations de TBD pendant 12 minutes (cadence de mesure de 1Hz) pour une surface de 1.6 mètres de côté visée verticalement. Cette durée correspond sensiblement au temps moyen pour effectuer une séquence de mesures multidirectionnelles.

Les numéros de courbes indiquent la date de mesures (604 pour le 4 juin, 726 pour le 26 juillet et 805 pour le 5 août). Les heures de mesures sont respectivement 14h54, 13h47 et 11h14 pour ces trois dates

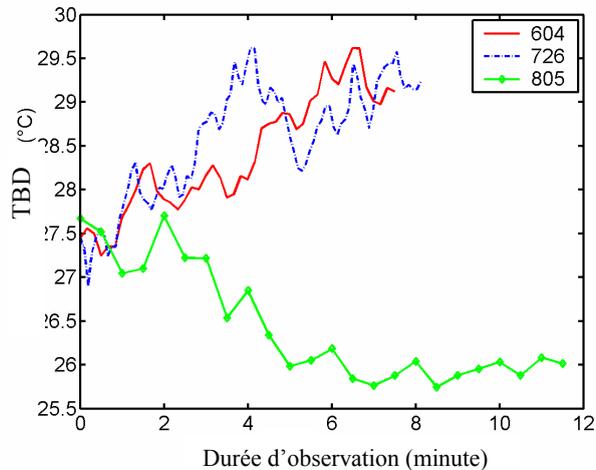


Figure 4.8 Variations temporelles de la TBD à trois dates différentes

Nous constatons une variation de 3°C sur une période de dix minutes. Cette variation peut être due aux changements de paramètres environnementaux tels que le rayonnement solaire, la vitesse de vent, l'échange thermique etc.... Ces courbes correspondent à des situations de vent faible. En cas de fort vent, on a observé une variation de 7°C en 12 minutes (11 juin 1999, vitesse du vent de 50 km/h). Pour les mesures multidirectionnelles au sol, il est important d'éviter les temps venteux.

4.6 Conclusion

Les mesures multidirectionnelles sont perturbées par plusieurs facteurs. Ces derniers sont liés à l'instrument utilisé (l'étalonnage et les performances radiométriques et géométriques), à la cible observée (essentiellement l'hétérogénéité spatiale de la structure du couvert et les propriétés radiatives des éléments constituant ce couvert), et à l'environnement (les paramètres agrométéorologiques, tels que le rayonnement, le vent et la température de l'air). La vérification de l'étalonnage de la caméra assure une bonne qualité de mesures radiométriques. Les deux facteurs de perturbation sont la variabilité spatiale de la TBD du couvert et sa variation temporelle pendant le temps nécessaire à l'acquisition complète des mesures multidirectionnelles.

L'hétérogénéité spatiale du couvert introduit les erreurs les plus importantes dans l'ensemble de mesures. Elle peut être caractérisée par une hétérogénéité spatiale du taux de couverture et un effet de rang. Les images de la caméra thermique sont idéales pour ce type d'analyse. Les résultats montrent que l'hétérogénéité spatiale varie dans une journée et dépend de la taille d'échantillonnage, de l'angle d'observation et de la date de mesure. L'amplitude de variation de la TB est de 1 à 5°C pour notre parcelle expérimentale de 100x150m² avec des tailles d'échantillon de 20 à 0.8 m. Cette variation spatiale n'est que de 1°C quand on s'intéresse à la différence directionnelle au lieu de sa valeur absolue.

L'effet du champ d'observation (FOV) est un problème propre à la structure en rangs. Les erreurs commises peuvent atteindre facilement 5°C. Les erreurs sont plus importantes pour des visées au nadir que pour des mesures obliques. Une analyse plus approfondie et théorique sera présentée dans le chapitre suivant.

Il existe à la fois des fluctuations rapides et des variations temporelles lentes des mesures de TBD. Elles sont principalement liées à la variation des paramètres environnementaux (vent, rayonnement, température de l'air, etc...). Une valeur de 0.2°C de la fluctuation pendant 20 secondes a été observée. Pour une échelle de temps de 10 minutes, la TBD peut varier de 3°C, voire de 7°C en présence d'un fort vent.

En fonction du protocole de mesure considéré, les différents effets vont jouer des rôles plus ou moins importants. Dans le chapitre 6, nous essaierons d'estimer un bilan d'erreur sur un exemple.

Chapitre 5

Etude théorique des erreurs dues au champ d'échantillonnage

5.1 Introduction

Comme toute culture en rangs, un couvert de maïs présente une structure périodique due à l'alternance de rangées de plantes et de sol. Ce schéma affecte fortement la TBD de la parcelle, ainsi que le choix du dispositif de mesure. La TBD des couverts en rangs a été étudiée par de nombreux auteurs (Richardson et al. 1975; Jackson et al. 1979; Suits, 1983; Kimes, 1983; Gijzen, et al. 1989 ; Ganis, 1997 ; Li, et al. 2000). Cependant, des méthodes pratiques pour l'analyse des erreurs de mesure faites depuis le sol n'ont que rarement été développées. Un dispositif d'échantillonnage et un champ de visée adaptés à l'estimation de la TBD n'ont que rarement été suggérés pour des cultures en rangs. Jackson et al. (1979) ont décrit la complexité de la structure géométrique de ce type de culture, couplée aux caractéristiques du capteur, pour des mesures de TBD aéroportées et spatiales. Ceci est utile pour l'évaluation des effets du champ de visée sur les mesures depuis le sol.

Jackson et al (1979) ont développé un modèle géométrique pour simuler les erreurs provoquées par ces conditions d'observation de la structure en rangs. Ils ont assimilé la végétation à des barres solides. La parcelle comporte quatre types de surface: sol éclairé, sol ombragé, végétation éclairée et végétation ombragée, dont les proportions changent avec le champ de la caméra, sa hauteur, sa résolution, la géométrie soleil-cible-caméra, etc... Le modèle indique les fluctuations et les erreurs de la fraction de champ des composantes, qui conduisent à une erreur dans l'évaluation de la TB et de la réflectance.

Pour les mesures depuis le sol, l'effet du champ de visée est essentiellement influencé par le fait que les observations au sol sont conduites avec un champ plus large (ceci pour plusieurs raisons). Kimes (1983a, 1982b) a observé une parcelle homogène de coton irrigué plantée en rangs avec un radiomètre IRT de 15° de champ. Des mesures selon différents angles de visée ont été réalisées depuis une plate-forme à 5.2 m de hauteur. Lagouarde (1995) a préféré utiliser deux radiomètres de 35° de champ montés à l'extrémité de deux bras fixés à un trépied de 2 mètres de hauteur pour mesurer la TB d'une parcelle de maïs sous différents angles de visée. Comme il le mentionne, la réponse des radiomètres résulte des contributions de différentes directions, ce qui lisse les variations angulaires de manière significative. Ce passage n'est pas clair !!!! je ne comprends pas cette dernière phrase, Peut on la remplacer par celle là : Comme il le mentionne, les variations angulaires du signal sont lissées de manière significative à cause de la grande ouverture angulaire de l'instrument qui intègre le signal radiométrique sur différentes directions. Bien que les applications des mesures à large

champ soient nombreuses, aucune méthode pratique n'a été développée pour analyser l'effet d'un large champsur l'interprétation de la température radiative. Dans ce chapitre, nous proposons un modèle de culture en rangs, adapté à partir des recherches de Jackson et al. (1979), pour évaluer les erreurs liées aux effets angulaires des champs dans les mesures. Le modèle permet le calcul des fractions de sol et de végétation, éclairées et ombragées, que l'on utilise ensuite pour évaluer l'erreur produite par les variations de champ, de structure géométrique de la culture, et de géométrie de la mesure.

5.2 Modèle géométrique pour l'étude des effets du champ de visée

5.2.1 Modélisation géométrique simple d'une parcelle de maïs et détermination des fractions de chaque composante

Reprenons la définition, d'après Jackson et al. (1979) et Kimes (1983a, 1982b), d'un couvert simplifié assimilé à une barre végétale sans trou, dont la base est posée sur le sol décrit comme une surface plane idéale.

Selon notre description, le couvert est supposé combiner trois composantes, le sol éclairé, le sol à l'ombre et la végétation. Chaque composante a une température unique. Les caractéristiques angulaires des rayonnements dans les canaux IRT ne sont pas prises en compte.

Les fractions de composante sont utilisées dans l'évaluation des erreurs. La TB de l'échantillon peut être calculée en utilisant les fractions de composante. Comme les fractions de composante, à l'intérieur d'une scène, changent avec la géométrie d'échantillonnage, ces changements induisent des erreurs de mesure de la TB que l'on peut calculer. Par exemple, pour une parcelle de maïs dont le taux de couverture végétale est de 25% et dont les composantes de sol et de végétation sont respectivement à des TB de 50°C et 25°C, une surestimation de 3% du taux de couverture induit 0.7°C d'erreur dans le calcul de la TB.

Le couvert de maïs est habituellement décomposé en quatre composantes, le sol éclairé, le sol à l'ombre, la végétation éclairée et la végétation à l'ombre, comme le proposent Jackson et al. (1979), Kimes (1983a, 1982b), Kustas et al. (1990), Lagouarde (1995), etc... Cependant, ces auteurs indiquent, en concordance avec les hypothèses de notre étude, que la différence entre la température de la végétation à l'ombre et celle de la végétation éclairée, est très faible. Dans nos mesures ce phénomène est vérifié pendant toute la période de croissance du maïs. Nous considérons donc seulement les trois composantes identifiables que sont le sol éclairé, le sol à l'ombre et la végétation, pour l'établissement du modèle et l'analyse de la simulation.

Une autre simplification faite dans cette étude concerne la structure des échantillons. A partir d'un motif de base composé d'un rang de végétation et d'un rang de sol, on peut reconstruire le champ entier. Un tel motif conserve une proportion constante de composantes de sol éclairé, de sol à l'ombre et de végétation pour un angle de visée et un angle d'éclairement solaire donnés. Ceci permet d'extrapoler les résultats obtenus

pour un rang à la totalité du champ. Dans cette étude on a donc évalué uniquement des surfaces dont la largeur était un multiple entier de la distance inter-rang.

A une altitude donnée, la position du capteur par rapport à la cible influe sur le contenu de l'image. Le modèle simule le changement dans les proportions des différentes composantes à l'intérieur d'un rang, le long d'un axe perpendiculaire à ce rang.

Le capteur utilisé dans cette simulation est imaginé comme une caméra idéale sans distorsion géométrique. Son système optique fournit des pixels de même taille, qui n'ont pas l'inconvénient de compresser l'image sur ses bords. La structure des images reflète avec exactitude et proportionnellement, la structure de la scène visée. L'image représente la scène vue par l'œil.

5.2.2 Calcul de la fraction de chaque composante

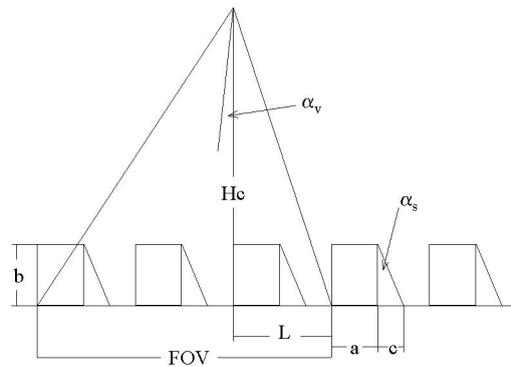


Figure 5.1 Schéma du modèle d'une culture plantée en rangs et de la géométrie de la mesure. Ici, a est la largeur des rangs de végétation, b est la hauteur de la végétation, c est la largeur de l'ombre, L est la distance inter-rangs, cH_C est la hauteur de la caméra, les projections des positions du capteur et du Soleil dans le plan perpendiculaire aux rangs sont définies par les angles zénithaux respectifs α_v et α_s , le champ est de $3L$ (3 fois la distance inter-rangs).

Selon le modèle de culture en rangs décrit par Jackson et al. (1979), b et a sont respectivement la hauteur et la largeur de la barre de végétation, c est la largeur de l'ombre au sol, déterminée par la position du Soleil. Quand les angles zénithaux et azimutaux du Soleil sont respectivement θ_s et ϕ_s , la valeur c est égale à :

$$c = btgq_s \sin j_s \quad (5.1)$$

La caméra est suspendue au-dessus du couvert à une hauteur H_C , elle balaye le plan vertical perpendiculaire à la direction des rangs, avec une taille d'échantillonnage kL (où k est entier) qui correspond à un champ q , l'angle zénithal visé dans le plan

perpendiculaire aux rangs est \mathbf{a}_v . La valeur du champ est (sauf pour une observation au nadir):

$$\mathbf{q} = atg \left(\frac{-\frac{H_c(1+tg^2 \mathbf{a}_v)}{kL} + \text{sqrt} \left(\left(\frac{H_c(1+tg^2 \mathbf{a}_v)}{kL} \right)^2 + tg^2 \mathbf{a}_v \right)}{tg^2 \mathbf{a}_v} \right) \quad (5.2)$$

Pour une observation au nadir, $\mathbf{a}_v=0$ et la valeur du champ est:

$$\mathbf{q} = 2tg^{-1} \left(\frac{kL}{2H_c} \right) \quad (5.3)$$

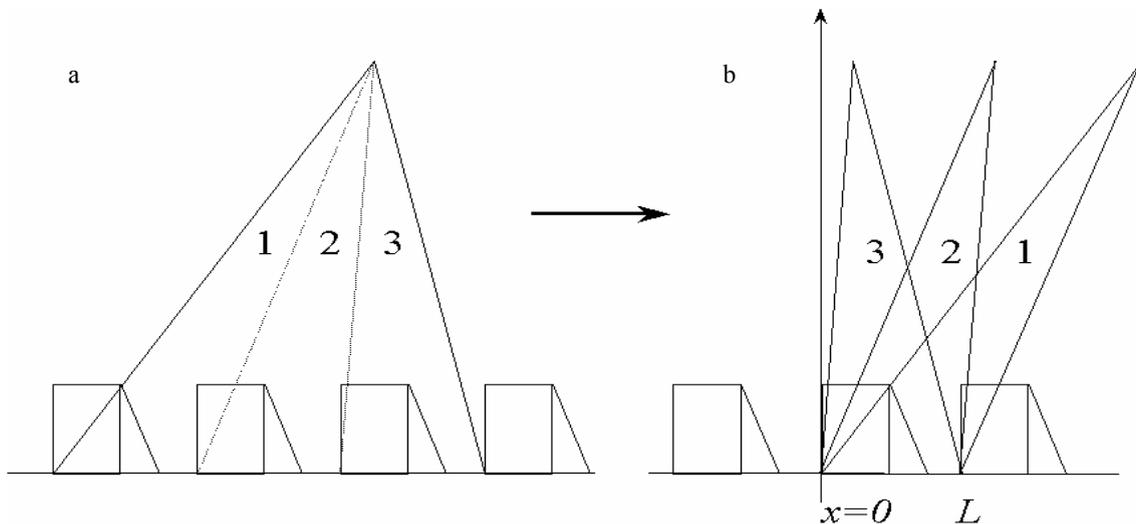


Figure 5.2 Champs pour différents types de visée: échantillon de largeur trois distances inter-rangs (a), équivalence avec trois visées d'un échantillon de largeur égale à une distance inter-rangs (b).

Pour calculer l'influence des changements de position de la caméra, celle-ci est déplacée horizontalement d'une distance inter-rangs L perpendiculairement aux rangs. La proportion de chaque composante est une fonction de la hauteur H_c de la caméra, de l'angle \mathbf{a}_v de visée, de la taille kL de l'échantillon, de la position et de la structure de l'échantillon. Alors l'image obtenue par la caméra conserve les proportions de longueur au lieu des proportions d'angle. Le champ correspondant a une largeur d'échantillon kL formé de k visées, chaque distance inter-rangs correspond à une visée individuelle comme le montre la figure 5.2. Ainsi le calcul des fractions de composante à l'intérieur du champ peut être obtenu à partir de la fraction des composantes de chaque visée individuelle (figure 5.2b), en cumulant les fractions pour obtenir la fraction finale, selon:

$$C_{i,x} = \frac{\sum_m l_{i,m,x}}{kL} = \frac{1}{k} \left(\sum_m \frac{l_{i,m,x}}{L} \right) \quad (5.4)$$

Où $l_{i,m,x}$ est la longueur de la composante i à l'intérieur de chaque distance inter-rangs, avec $i = s_e, s_o, v$ représentant respectivement le sol éclairé, le sol à l'ombre et la végétation; m est le numéro de rang dans l'échantillon; x est la distance de déplacement de la caméra, $x \in [0, L]$; $C_{i,x}$ est la fraction de la composante i du couvert pour la visée.

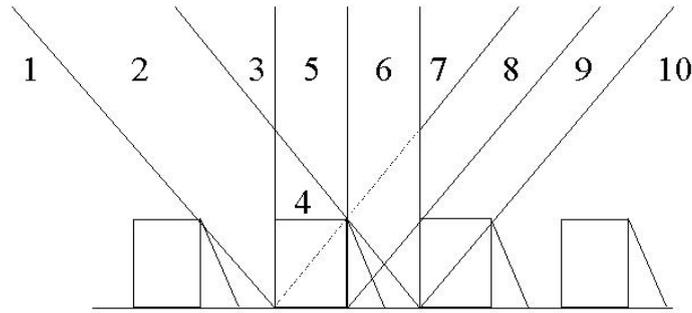


Figure 5.3 Les domaines déterminés en fonction du comportement des changements de proportion des composantes des visées individuelles.

Dans la figure 5.3, plusieurs domaines au-dessus du couvert sont déterminés pour le calcul de la fraction de composante pour chaque visée individuelle. Le choix de ces domaines a été établi en fonction des changements du taux des composantes de chaque visée individuelle. Les changements dans chaque domaine sont du même type. On a classé et décrit dix domaines. Dans les domaines 1 et 10, seule la végétation peut être vue par le capteur pendant tout son déplacement. Dans le domaine 2, deux ou trois composantes peuvent être vues selon la position du capteur. Dans les domaines 3, 4, 5 et 6, au moins deux composantes peuvent être vues par le capteur pendant tout son déplacement. Dans les domaines 7 et 8, les types de visées sont similaires au domaine 3, tant que le sol est à l'ombre de la végétation. Dans le domaine 9, les types de visées sont similaires au domaine 2. Le comportement des changements de fraction de sol éclairé, de sol à l'ombre, et de végétation est décrit dans ces dix cas. L'algorithme, qui permet de calculer la proportion de composantes dans les visées individuelles pour chaque domaine défini, est présenté en annexe. Dans cette annexe, $b = atg\left(\frac{L-a}{h}\right)$; $C_v, C_{s_e},$

C_{s_o} sont les fractions de végétation, de sol éclairé et sol à l'ombre qui composent respectivement l'image; a et a' sont les deux angles définissant les limites du champ, $q = a' - a$. Dans les cas 1, 2 and 3, $a' > a > 0$; dans les cas 4, 5 et 6, $a' > 0 > a$; dans les cas 7, 8, 9 et 10, $0 > a' > a$. La description arithmétique du modèle se trouve dans l'annexe A.

Dans cette étude on a considéré uniquement les visées dans le plan vertical perpendiculaire aux rangs, où les variations sont les plus fortes, comme l'expliquent

Jackson et al. (1979) et Kimes (1983a). Les caractéristiques des changements de fraction de composante pour toutes les directions de visée peuvent être dérivées des seules conditions de visée dans le plan vertical perpendiculaire aux rangs.

5.3 Prédications du modèle et discussion

5.3.1 Calcul des erreurs pour les visées au nadir

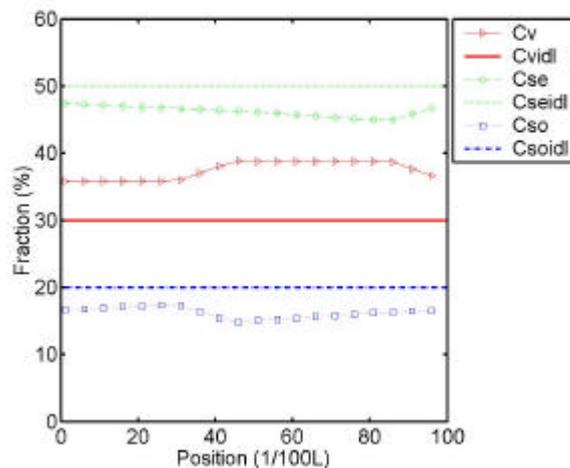


Figure 5.4 Comportement comparé des fractions de composantes en fonction de la taille de l'échantillonnage, pour une visée au nadir. L'instrument est supposé placé à 10 fois la distance inter-rangs avec un FOV de 28°. La surface visée correspondante est égale à 5 rangs.

La fraction d'une composante d'un couvert est la fraction d'angle solide pour cette composante dans la direction de l'instrument de mesure et varie en fonction de la direction de visée de l'instrument. Dans le cas idéal le champ de visée doit être infiniment petit pour que les signaux observés proviennent de la direction de visée et non de directions plus ou moins différentes. Cela est valable pour des mesures satellitaires, non pour les mesures depuis le sol dans lesquelles un champ de visée assez large doit être employé pour avoir une surface visée suffisante.

La figure 5.4 montre les écarts sur les fractions provoqués par les effets de champ en fonction de la position de l'échantillon quand la caméra se déplace d'une distance égale à la distance inter-rangs. Dans le calcul, le rapport de la hauteur H_C de la caméra à la distance inter-rangs (H_C/L) est égal à 10, le champ est de 28°, le nombre m de rangs à l'intérieur du champ est égal à 5, le rapport de la hauteur de la végétation à la distance inter-rangs (b/L) est 0.6, le rapport de la largeur des rangs de végétation à la distance inter-rangs (a/L) est 0.3, le rapport de la largeur de l'ombre à la distance inter-rangs (c/L) est de 0.2. La fraction de sol éclairé est de 0.5. Dans des conditions idéales (le champ de visée étant très petit), les fractions de végétation, de sol éclairé et de sol à l'ombre sont respectivement de 0.3, 0.5, 0.2. Dans la figure 5.6, C_V est la fraction de

végétation réelle, C_{vidl} est la fraction de végétation idéale, C_{Se} est la fraction de sol éclairé réelle, C_{Seidl} est la fraction de sol éclairé idéale, C_{So} est la fraction de sol à l'ombre réelle et C_{Soidl} est la même fraction pour des conditions idéales.

L'erreur sur les fractions de composante visées varie avec le déplacement de la caméra. Comparée aux conditions idéales, la végétation est toujours surestimée, le sol est sous-estimé. Cette erreur est la répercussion d'effets angulaires pour chaque élément visé. Si la caméra est à faible hauteur au-dessus de la végétation, une grande partie des parties basses est cachée par les parties hautes de la végétation. Ainsi comme le montre la figure 5.4, la végétation cache une partie du sol. On notera aussi que dans les directions proches de la direction anti-spéculaire, une grande partie du sol à l'ombre est occultée, tandis qu'en visant dans les directions proches de la direction spéculaire, c'est au contraire le sol éclairé qui est caché.

On utilise l'écart maximum sur la fraction de composante végétale par rapport au cas de la visée idéale, comme indicateur de l'erreur due à la géométrie de la mesure et à la structure du couvert. Ainsi cet écart est de 10% dans cet exemple ($H_c/L=10$, $m=5$, $a/L=0.3$, $b/L=0.6$, $c/L=0.2$).

La figure 5.5 montre l'erreur sur la fraction végétale en fonction de la hauteur de la caméra et de la taille de la surface d'échantillonnage. Pour ce calcul, le rapport de la hauteur de la caméra à la distance inter-rangs (H_c/L) varie de 5 à 30, et le nombre de rangs visés m varie de 1 à 8. Quand la hauteur de la caméra est égale à 30 fois la distance inter-rangs et le nombre de rangs visés est égal à un, le champ atteint sa valeur minimum de 2°. Quand la hauteur de la caméra est 5 fois la distance inter-rangs L et que la visée contient 8 rangs, le champ atteint sa valeur maximum soit 77°. Pendant la simulation, le rapport de la hauteur de la culture à la distance inter-rangs (h/L) est de 0.6, le rapport de largeur ($a/L=0.3$) est de 0.3, la fraction de sol à l'ombre (c/L) est de 0.2 et la fraction de sol éclairé est de 0.5.

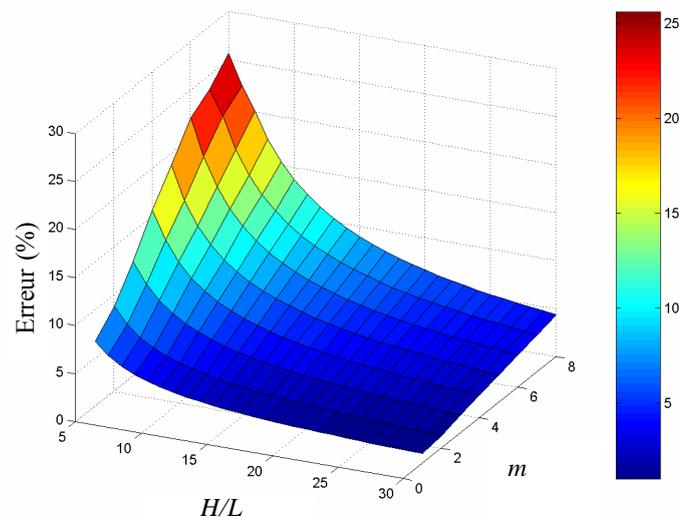


Figure 5.5 Erreur sur la fraction végétale en fonction de la hauteur de la caméra et

de la surface échantillonnée.

L'erreur sur la fraction des composantes présente une large gamme de variation due aux changements de hauteur de la caméra et de la surface échantillonnée. L'erreur sur la fraction du couvert atteint sa valeur minimum de 1% pour un champ minimum de 2° , avec un échantillon de taille égale à la distance inter-rangs, et atteint sa valeur maximum de 26% pour un champ de visée maximum de 77° , avec un échantillon de taille égale à 8 fois la distance inter-rangs. L'erreur croît avec l'augmentation de taille de l'échantillon et la diminution de la hauteur à laquelle est placée la caméra.

La figure 5.5 montre aussi qu'un même champ de visée peut provoquer différentes erreurs, avec des rapports H_C/L différents. En supposant que la distance inter-rangs est de 1 mètre, si on regarde de 30 m de hauteur un couvert de 8 m de large, le FOV est de 15° , l'erreur sur la fraction de couvert est inférieure à 4.5%. En regardant d'une hauteur de 5 m un échantillon au sol d'un mètre, le FOV est de 11° et l'erreur atteint 6.8%.

Dans tous les cas la fraction de végétation est surestimée et les fractions de sol éclairé et à l'ombre sont sous-estimées. Dans la simulation on observe aussi que les variations de chaque fraction de composante diminuent quand le nombre de rangs augmente.

5.3.2 Influence de l'angle de visée et effets de compensation pour les visées obliques

La figure 5.6 montre des visées obliques selon un angle de 15° par rapport au nadir dans les directions anti-spéculaire (a) et spéculaire (b). Dans ces simulations, le rapport H_C/L de la hauteur de la caméra à la distance inter-rangs est de 10, le nombre de rangs m contenus dans chaque visée de l'échantillon est de 5, le champ correspondant est de 26.2° . La géométrie du couvert est identique à celle décrite par la figure 5.5.

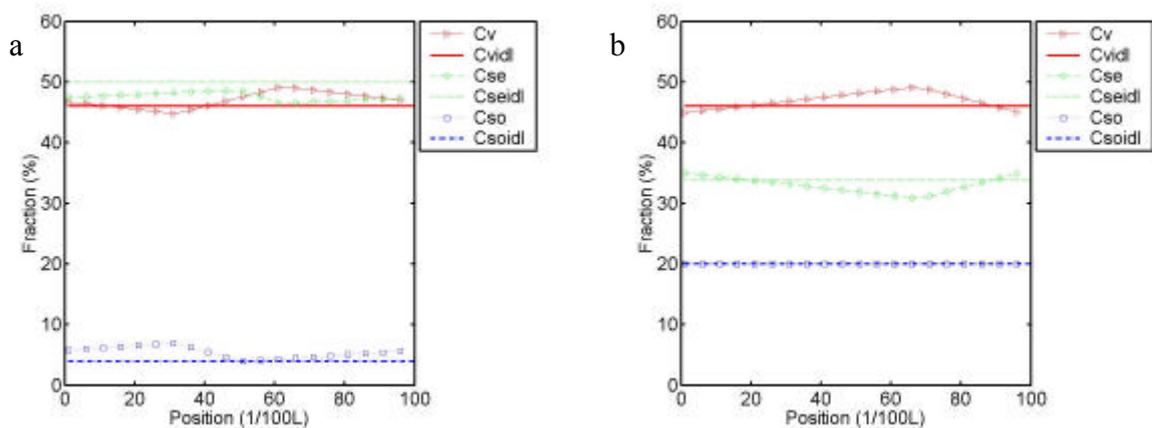


Figure 5.6 Visées obliques selon un angle de 15° , dans les directions anti-spéculaire (a) et spéculaire (b).

Dans la direction anti-spéculaire, les fractions idéales de végétation, de sol à l'ombre et de sol éclairé sont respectivement de 46%, 4% et 50%. Dans la direction spéculaire, on

obtient les valeurs correspondantes de 46%, 20% et 34%. Dans les deux cas, la fraction de la végétation passe de 30% d'une visée au nadir idéal en 46%. Le sol éclairé ou à l'ombre est masqué par rapport à une visée au nadir.

Nous pouvons noter que les erreurs sur les fractions des composantes sont nettement plus faibles en visée oblique (figure 5.6) qu'en visée au nadir (figure 5.4). Avec les visées obliques un effet de compensation pour chaque composante est observé dans les analyses. Le champ est divisé en deux par la direction médiane qui définit l'angle de visée idéal α_v : la partie supérieure ($> \alpha_v$) et la partie inférieure ($< \alpha_v$). Avec l'angle zénithal le plus grand, une plus grande fraction du sol est masquée par la végétation par comparaison avec les conditions idéales de visée, ce qui conduit à une sous-estimation de la fraction de sol et à une surestimation de la fraction végétale. Avec l'angle zénithal le plus petit, une plus grande fraction de sol apparaît dans l'image par comparaison avec les conditions idéales de visée, ce qui conduit à surestimer le sol et sous-estimer la végétation. Ces deux effets se compensent et influencent la forme des courbes de fraction de composante.

Dans ces deux cas (15° anti-spéculaire et spéculaire), les deux visées ont le même effet sur la fraction de végétation. A cause de la symétrie de la structure du couvert, les courbes de fraction végétale ont la même forme (figure 5.6).

Au contraire la direction de visée – spéculaire ou anti-spéculaire - a une grande influence sur les valeurs des fractions de sol éclairé et à l'ombre. Dans la direction antispéculaire, la plus grande partie du sol à l'ombre est masquée par la végétation. Avec le déplacement de la caméra, la variation de la fraction de sol à l'ombre est relativement importante. La fraction de sol éclairé varie au contraire dans une gamme étroite parce que la végétation masque peu le sol éclair. Dans la direction spéculaire, une partie du sol éclairé est masquée par la végétation. La fraction de sol à l'ombre ne varie pratiquement pas pendant le déplacement de la caméra.

La figure 5.7 présente l'erreur sur la fraction de végétation en fonction de l'angle de visée et de la surface échantillonnée. L'angle de visée varie de 0° à 40°: à l'intérieur de cette gamme la scène n'est pas entièrement couverte de végétation. L'échantillon contient entre un et huit rangs. La structure du couvert et la géométrie de visée est la même que celle des figures 5.5 et 5.6.

Sur la figure 5.7a, les effets de compensation démontrent clairement que la taille de l'échantillon a un effet maximum sur les erreurs pour une visée au nadir. Dans une certaine gamme de taille des échantillons les erreurs varient peu pour un angle de visée donné. Pour une inclinaison de la visée de 5°, l'erreur avec un échantillon de trois rangs est voisine de celle pour un échantillon d'un rang. Pour une visée oblique de 15°, l'erreur calculée pour un échantillon de six rangs est seulement de 0.3% supérieure à celle d'un échantillon d'un rang. Lorsque l'on fait varier l'angle de visée zénithal, l'erreur maximale apparaît pour les visées au nadir. Pour des échantillons de grande taille, l'erreur diminue rapidement lorsque l'angle de visée augmente. Quand l'angle de visée devient assez grand, seule la végétation peut être vue, l'erreur sur la fraction de végétation décroît alors. La courbe de la figure 5.7.b montre le comportement d'un échantillon de 10 rangs, et indique qu'au-delà d'un angle de visée de 30° l'erreur

décroît. Cette observation révèle clairement le fait qu'il existe un angle de visée optimal pour chaque taille d'échantillon. Un grand échantillon ne conduit pas à une augmentation rapide de l'erreur. Les résultats indiquent que les variations de l'angle de visée ont un faible effet sur les erreurs, sauf dans le cas d'une visée au nadir ou proche du nadir. On peut choisir une taille d'échantillon et effectuer des mesures dans une grande gamme d'angles de visée si on évite les visées proches de la verticale.

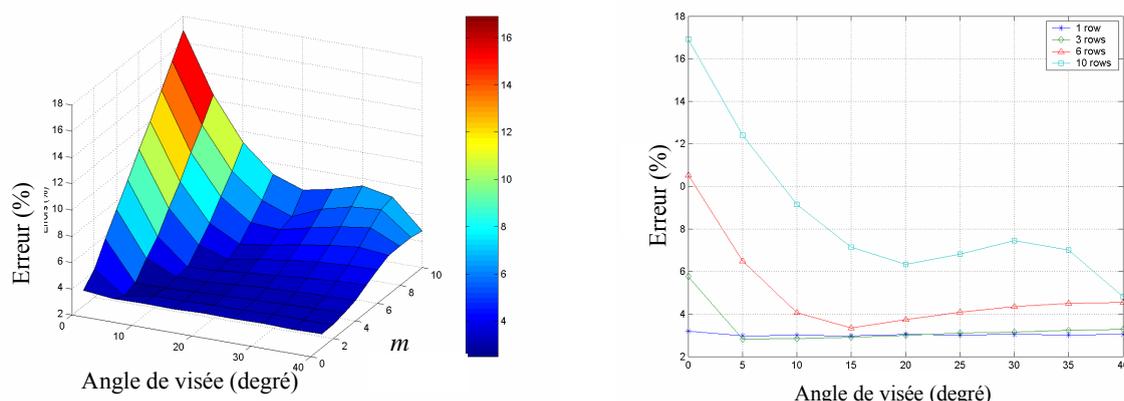


Figure 5.7 Erreur sur la fraction végétale en fonction de l'angle de visée et de la surface de l'échantillon (a); variation de l'erreur avec l'angle de visée (b).

5.3.3 Influence de l'angle de visée pour la composante de sol éclairé

Pour les mesures de terrain, les variations de la fraction du sol éclairée ont une influence importante sur la TB composite mesurée parce qu'il existe une grande différence de température entre la TB de cette composante et celles des autres composantes du couvert. La figure 5.8 montre les variations de l'erreur sur la fraction de sol éclairé selon l'angle de visée et la taille de l'échantillon. La structure du couvert et la géométrie de visée sont les mêmes que ceux décrits par les figures 5.5, 5.6 et 5.7, à ceci près que l'angle de visée varie ici de -40° à $+40^\circ$. Les valeurs positives de l'angle zénithal de visée correspondent à la direction anti-spéculaire, les valeurs négatives à la direction spéculaire.

Pour un même échantillon, l'erreur varie avec l'angle de visée. Les visées de type spéculaire apportent de plus petites erreurs. Un premier pic apparaît pour les visées au nadir avec des erreurs maximales. Pour des visées anti-spéculaires proches de la verticale, la végétation cache seulement la fraction de sol à l'ombre. Il n'y a pas ou peu d'influence des effets angulaires à l'intérieur du champ sur le calcul de la fraction de sol éclairé. On observe une erreur nulle pour de petits échantillons et un angle de visée voisin de $+10^\circ$. Avec l'augmentation de l'angle de visée, on observe un second pic d'erreur lorsque la végétation commence à cacher le sol éclairé ($+18.4^\circ$). Pour un même angle de visée une petite taille d'échantillonnage produit une erreur plus faible. Dans cet exemple, l'erreur croît rapidement quand la taille de l'échantillon dépasse trois fois la distance inter-rangs.

Le calcul de l'erreur sur les fractions de sol éclairé et de végétation indique que cette erreur augmente avec la taille des échantillons. Une taille unitaire en distance inter-rangs est optimale pour extraire les fractions de composante du couvert et pour analyser les erreurs causées par la géométrie de la visée et la méthode d'échantillonnage. Les effets de la taille de l'échantillon sont sensibles pour les visées proches du nadir mais peu variables pour les visées obliques. En sachant qu'une grande taille de l'échantillon permet de réduire les effets de l'hétérogénéité spatiale, nous pouvons ainsi utiliser une stratégie d'échantillonnage de taille variable en fonction de l'angle de visée : de faible taille au nadir pour prendre en compte les forts effets de champ, et de plus grande taille pour les visées obliques pour minimiser les hétérogénéités spatiales.

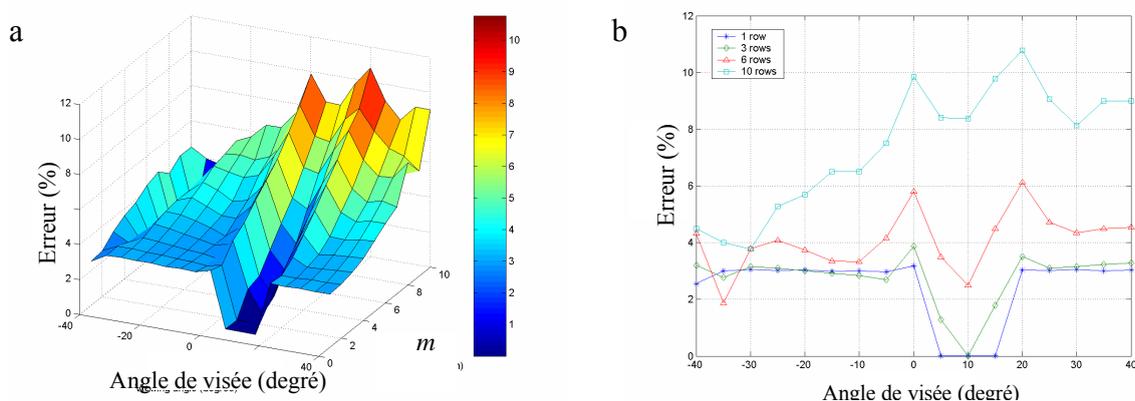


Figure 5.8 Variation de l'erreur sur la fraction de sol éclairé en fonction de l'angle de visée et de la taille de l'échantillon (a); erreur en fonction de l'angle de visée (b).

5.4 Validation du modèle de champ

5.4.1 Validation

Le modèle de simulation décrit les effets du champ sur l'extraction des TBD de cultures plantées en rangs. Il prédit qu'une erreur inévitable est induite dans la mesure, due aux effets du champ, principalement causée par la limitation de la hauteur à laquelle est située le capteur et par la structure en rangs de la culture. Les erreurs augmentent avec l'élargissement du champ. Pour les visées au nadir, la fraction de végétation est toujours surestimée, indépendamment de la position du capteur, et les fractions de sol sont sous-estimées. Pour les visées obliques, les fractions des composantes de la végétation fluctuent autour de leur valeur idéale, en fonction des changements de position du capteur. Le modèle prédit aussi que les erreurs peuvent être limitées pour de petits échantillons en visée oblique à cause des effets de compensation.

La figure 5.9 montre la TB résultante du couvert mesurée à différentes hauteurs, en fonction de l'heure locale, le 24 juin 1999. T_{20} et T_2 sont les TB calculées à partir d'images au nadir quand la caméra thermique est respectivement à 20 m et à 2 m au-dessus du couvert (soit 2.8 m au-dessus du sol). Les côtés du carré d'échantillonnage

sont égaux à la distance inter-rangs (0.8 mètre), ce qui correspond à un champ de 2.3° à 20 mètres. Pour les autres mesures la caméra est placée à 2.8 mètres du sol et son champ est de 16° . La position de l'échantillon est sélectionnée au hasard. T est la TB résultante du couvert calculée à partir des fractions de composante du couvert et de la TB moyenne de chaque composante. Il faut noter qu'il y a un délai de 5 minutes entre la mesure à 20 mètres et la mesure à 2.8 mètres.

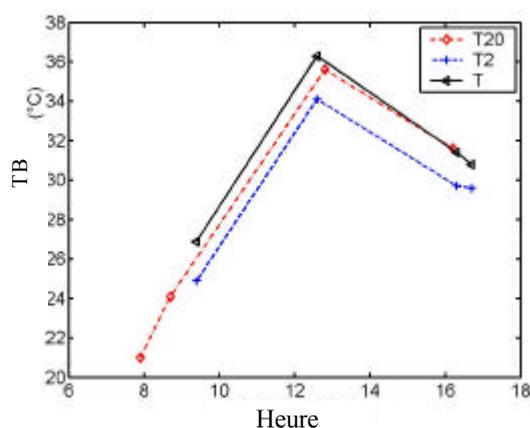


Figure 5.9 TB résultante calculée pour différentes hauteurs de mesure en fonction de l'heure, le 24 juin 1999.

T est utilisée comme référence pour la comparaison de T_2 et T_{20} . Pendant la mesure des fractions de composantes pour le calcul de T , la caméra visible est placée à 20 mètres au-dessus du sol, l'échantillon est un carré de côté égal à la distance inter-rangs, il est situé au nadir de la caméra, et ses quatre coins au milieu des rangs de maïs.

Autour de midi, T atteint un maximum de 36°C . La température est plus basse le matin et en fin d'après-midi. T_2 est toujours plus basse que T_{20} et T . Ces deux dernières températures ont des valeurs proches par rapport à T_2 . Pendant la mesure de midi, la différence entre T et T_2 atteint 2°C , alors que la différence entre T et T_{20} est seulement de 0.4°C . Dans l'après-midi, ces différences ne sont plus que de 1.5°C et 0.1°C pour T_2 et T_{20} respectivement.

En accord avec les prédictions, l'écart entre T_2 et T_{20} vient de l'erreur d'évaluation des fractions des composantes. Les images prises par la caméra à faible hauteur surestiment la fraction de végétation. Quand la caméra est à 20 mètres au-dessus du sol, les images montrent une faible surestimation de la végétation. Si la végétation a une TB plus basse, la TB résultante calculée à partir de ces images est un peu plus basse que celle calculée en utilisant une image idéale qui est capturée à partir d'une distance infinie. Quand la caméra s'approche à 2.8 mètres du sol, les erreurs sur les fractions des composantes s'accroissent, et la TB résultante est beaucoup plus faible que celle calculée avec des fractions idéales et plus faible aussi que T_{20} .

La figure 5.10 compose T_{20} et T_2 à différentes dates et heures par rapport à T . Les données utilisées pour calculer T_{20} , T_2 et T viennent des mesures effectuées du 4 juin au 6 août 1997. La sélection des aires d'échantillonnage est la même que celle décrite pour la figure 5.9. T_{20} et T sont très bien corrélées, avec un coefficient R^2 de 0.96, et un écart-type de 0.83°C . La pente de la droite de régression est de 0.97, avec une ordonnée à l'origine de 0.38°C . T_2 et T présentent aussi une bonne corrélation, mais avec une plus grande dispersion. Les paramètres statistiques R^2 , écart-type, pente et ordonnée à l'origine deviennent respectivement : 0.82, 1.71°C , 0.96, -0.1°C . De la même manière, comme nous l'avons sur la figure 5.9, T_2 est inférieure à T_{20} et T en général, et montre une plus large dispersion des valeurs comme prévu par le modèle de simulation.

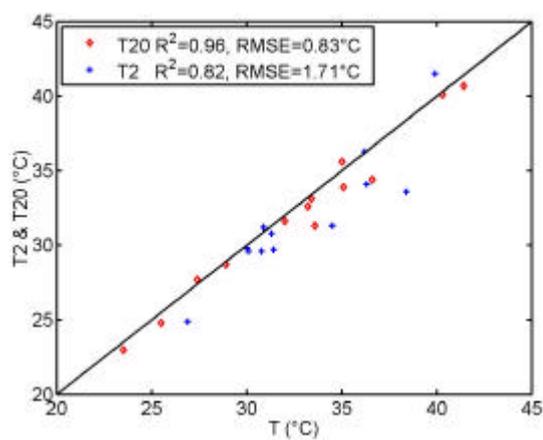


Figure 5.10 T_{20} et T_2 en fonction de T à différentes dates et heures de mesure entre le 4 juin et le 6 août.

La figure 5.11 montre les TB résultantes du couvert obtenues en utilisant différentes tailles d'échantillonnage. La hauteur de la caméra reste constante à 20 mètres, l'angle de visée est de 15° . La taille de l'échantillon est d'une, trois, cinq, et huit fois la distance inter-rangs soit 0.8, 2.4, 4.0 et 6.4 mètres. Les champs correspondants sont de 2.1° , 6.4° , 10.6° et 17.0° . Les températures correspondantes sont T_1 , T_3 , T_5 et T_8 . On met T_3 en abscisse, et T_1 , T_5 et T_8 en ordonnées. Les données pour le calcul viennent des mesures effectuées du 4 juin au 6 août.

Les points sur le graphique montrent une corrélation très élevée sur tout le jeu de données. En accord avec les prédictions du modèle de simulation, la différence entre les températures résultantes calculées à partir des échantillons de différentes tailles est très petite à cause des effets de compensation dans les visées obliques. Quand la caméra est à une hauteur de 20 mètres, les variations de taille de l'échantillon n'ont pas d'effet sur l'obtention des TB résultantes du couvert.

Si on compare les figures 5.10 et 5.11, les visées verticales d'une hauteur de 2.8 mètres des échantillons de 0.8 mètre de côté, correspondant à un champ de 16.3° , la TB résultante de cet échantillonnage est à peu près de 1.5°C plus basse que celle calculée à partir des visées prise à 20 mètres de hauteur. Pour les visées obliques d'un échantillon

de huit rangs de côté, le champ est de 17° quand la hauteur de la caméra est de 20 mètres et l'angle de visée de 15° . Les erreurs des TB résultantes sont faibles. L'angle de visée et la hauteur de la caméra ont un rôle important dans la mesure de la TB résultante du couvert.

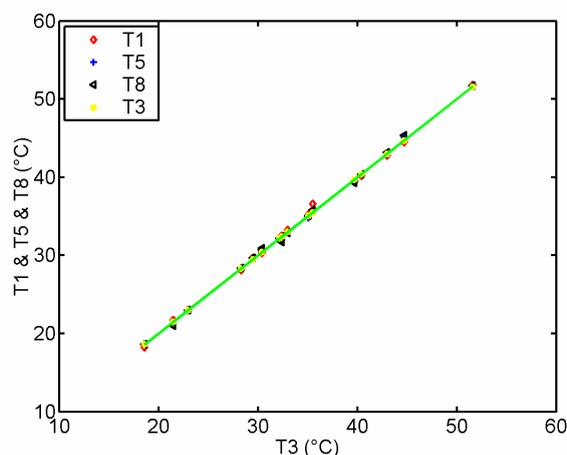


Figure 5.11 Comparaison des TB du couvert mesurées en utilisant différentes tailles d'échantillon. La caméra est à une hauteur de 20 mètres, l'angle de visée est de 15° .

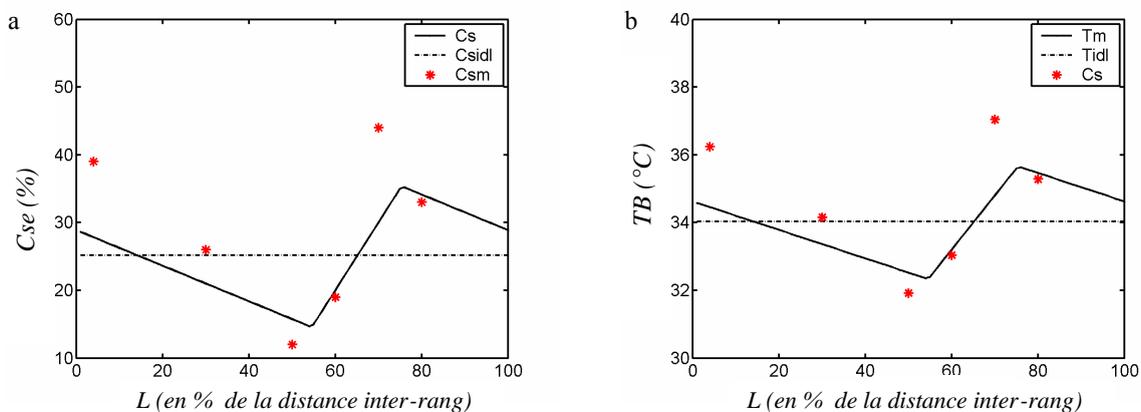


Figure 5.12 Comparaison des fractions de sol éclairé (a) et de TB (b) idéales (ligne pointillée), simulées (ligne continue) et mesurées (étoiles) en fonction de la position de la caméra

La figure 5.12 compare les fractions de sol éclairé (a) et la TB du couvert (b), mesurées et simulées, en fonction de la position de la caméra par rapport au rang (les 100 divisions de l'échelle correspondent à la distance inter-rangs L). Dans la figure 5.12a, C_{sm} , C_{sidl} et C_s sont les fractions de sol éclairé mesurées, idéales et simulées. Dans la figure 5.12b, T_m , T_{idl} et T_s sont les TB résultantes mesurées, idéales et simulées.

Les mesures ont été effectuées à 13h15 du 24 juin alors que l'angle solaire zénithal était de 21° et l'angle solaire azimutal de 202° . La hauteur du maïs était de 0.8 m, la largeur normalisée de 0.55 m, la largeur de l'ombre de 0.3 m (à partir de la racine au bord de l'ombre), et l'indice foliaire était de 1.73. Pour la mesure, la caméra était placée à 2 m au-dessus du maïs. Pour la simulation, la hauteur h est de 0.8 m, la largeur a est de 0.4 m, la largeur de l'ombre c est de 0.1m. La caméra est à 2.8 m au-dessus du sol, le champ est égal à la distance inter-rangs, les angles de visée zénithaux et azimutaux sont 15° et 90° (dans le plan perpendiculaire au rang). Les TB du sol éclairé, du sol à l'ombre et de la végétation sont respectivement de 44°C , 30°C et 27°C .

5.4.2 Application initiale dans les simulations de TBD

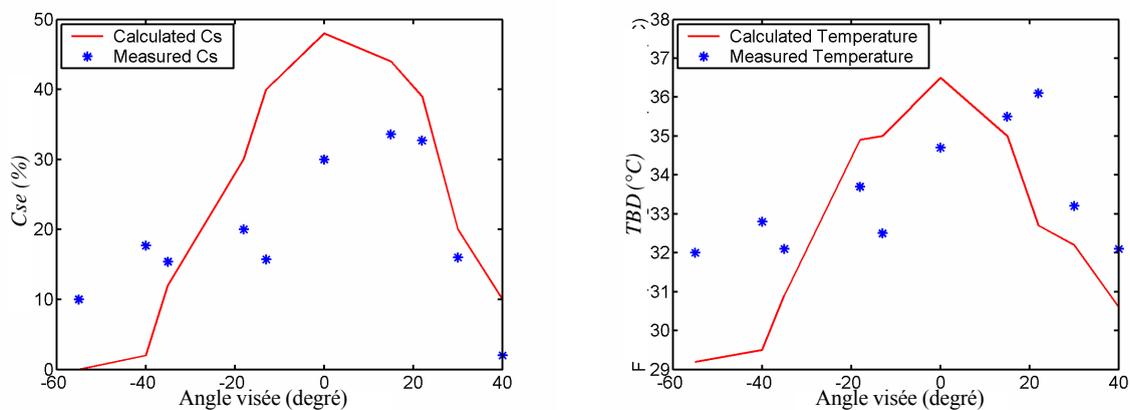


Figure 5.13 Comparaison entre la fraction de sol éclairé (a) et la TBD du couvert (b) simulées et mesurées en fonction de l'angle de visée dans le plan perpendiculaire au rang.

La figure 5.13 compare la fraction de sol éclairé (a) et la TB du couvert (b), simulées et mesurées, en fonction de l'angle de visée dans le plan perpendiculaire au rang. Les conditions de mesure et de simulation sont les mêmes que celles de la figure 5.12. Pour la simulation, les valeurs maximales des fractions de sol éclairé et de TB du couvert coïncident avec la visée au nadir. Il est facile de comprendre que la fraction de végétation a une valeur minimale pour la visée au nadir, ce qui correspond à un maximum de TB. Pour les mesures, la valeur maximale de la fraction de sol éclairé et de la TB résultante apparaît vers 20° , ce qui correspond à la direction anti-spéculaire.

Ces erreurs montrent la limitation du modèle de simulation de champ dans la description des TBD. La structure réelle du couvert est plus complexe qu'une série de barres identiques parallèles et régulièrement espacées. Les trous dans la végétation font que les composantes du couvert ont une distribution différente.

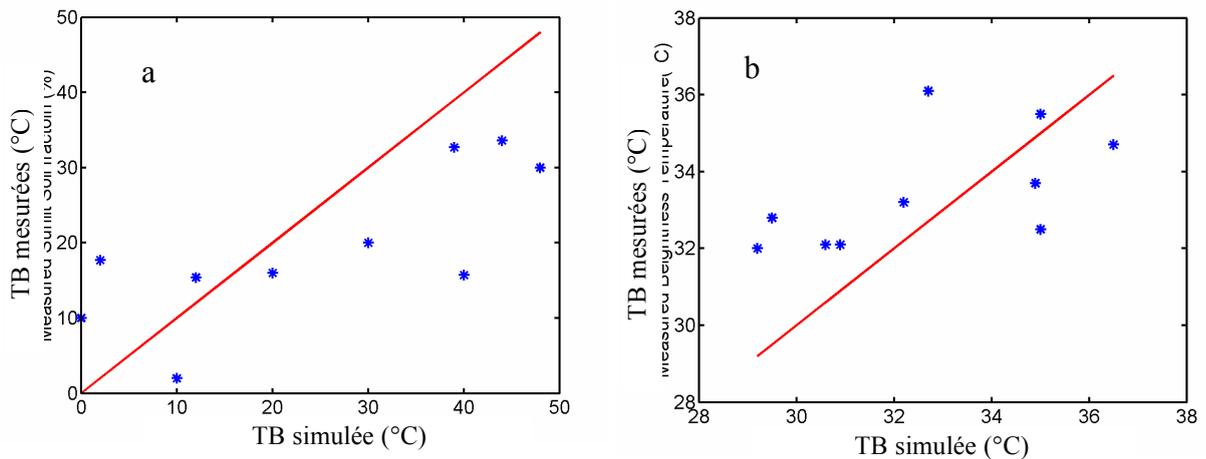


Figure 5.14 Fraction de sol éclairé (a), TB du couvert (b); valeurs mesurées en fonction de valeurs simulées

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle modifié de culture en rangs est proposé pour évaluer l'influence de la géométrie de la mesure sur la TB résultante du couvert. Le modèle calcule les écarts des fractions de sol éclairé, de sol à l'ombre et de végétation par rapport aux valeurs d'une visée idéale, et les utilise comme indicateurs des erreurs causées par les variations de la taille de l'échantillon, la grandeur du champ et la position de la caméra ainsi que par les variations de la direction de visée de cette dernière.

Malgré ces simplifications, le modèle démontre bien les erreurs systématiques causées par la hauteur de la caméra et révèle un effet de compensation pour les visées obliques. Avec l'augmentation de la taille de l'échantillon, les erreurs sur le calcul des fractions de composantes augmentent, la fraction de végétation est toujours surestimée, les fractions de sol éclairé et à l'ombre sont sous-estimées.

Pour les visées au nadir, la fraction de végétation est toujours surestimée, les composantes du sol sous-estimées. Cependant, pour les visées obliques, les erreurs sont limitées, du fait des effets de compensation à l'intérieur du champ. Ces effets angulaires réduisent efficacement les erreurs d'estimation des fractions des composantes, ce qui conduit à prévoir des protocoles d'échantillonnage plus sophistiqués pour les mesures du couvert. En définitive la meilleure méthode pour réduire les erreurs est de placer le capteur assez haut comme mentionné avant.

Le modèle de champ a été testé et préalablement appliqué à la simulation des TBD du couvert. Les résultats montrent que le modèle met bien en évidence les effets de champ. Ces prédictions sont aussi validées par les mesures. Cependant, on observe des erreurs notables quand le modèle est appliqué à la simulation de TBD du couvert. La simplification de la structure géométrique du couvert est une des principales causes d'erreur.

Chapitre 6

Génération du diagramme polaire de TBD et bilan d'erreurs

6.1 Introduction

L'acquisition de la TBD d'une cible par caméra IRT comporte deux étapes: la mesure et l'échantillonnage. Les différentes approches expérimentales ont montré que les effets temporels sont importants mais peuvent être minimisés en comparant les parties communes des images IRT acquises à des instants différents. En ce qui concerne l'échantillonnage, les méthodes pour extraire de la mesure les caractéristiques directionnelles du couvert ont été étudiées par de nombreux auteurs (Kimes 1983, Myneni et al., 1988, Qin et al., 1995, Lagouarde et al., 1995, 1999, Sandmeier 2000, Walthall et al., 2000). L'échantillonnage dépend de différents facteurs : la structure géométrique de la cible, les caractéristiques directionnelles du rayonnement émis par le couvert, les changements environnementaux et la géométrie de la mesure. Il existe différentes méthodes d'échantillonnage selon le protocole d'acquisition. Cependant il n'existe pas d'approche précise pour l'extraction de la TBD à partir de mesures réalisées depuis le sol sur des cultures en rangs.

La méthode d'échantillonnage comporte le choix de deux paramètres : la taille de l'échantillon et l'intervalle d'échantillonnage. Sandmeier (2000) détermine la BRDF d'un couvert en utilisant une caméra de champ de 2° montée sur un goniomètre permettant un échantillonnage angulaire de pas de 7.5° sur la visée. Lagouarde et al. ont appliqué un échantillonnage en utilisant un carré de 1° de côté sur une image acquise par une caméra aéroportée pour extraire la TBD du couvert. Ils ont ensuite utilisé un filtrage par fenêtre glissante de 3×3 pixels pour lisser les résultats.

Pour évaluer les erreurs de mesure au sol, Gu et al. (1992) ont mis en évidence différents types d'erreurs caractéristiques des instruments et des variations spectrales, spatiales et angulaires de la cible. Jacob (1999) et Lagouarde et al. (1999) ont étudié les erreurs aléatoires provoquées par la caméra IRT et par le système de mesure, comme cela est décrit au chapitre 2.

Dans ce chapitre, on présente non seulement le protocole de mesure, mais aussi une nouvelle méthode d'échantillonnage pour extraire la TBD de la parcelle de maïs à partir d'images IRT acquises in situ. Pour mettre en place cette nouvelle méthode, on étudiera l'ensemble des facteurs influant sur la mesure: changements environnementaux, géométrie de la mesure, réalisation de la mesure, caractéristiques de l'instrument,

caractéristiques spectrales et géométriques de la TBD des cibles. On décrira ensuite le type de représentation graphique choisi pour la TBD. Enfin, un exemple d'acquisition de la TBD du couvert sera étudié pour illustrer les facteurs d'erreur mentionnés ci-dessus.

6.2 Présentation de la méthodologie d'acquisition de la TBD

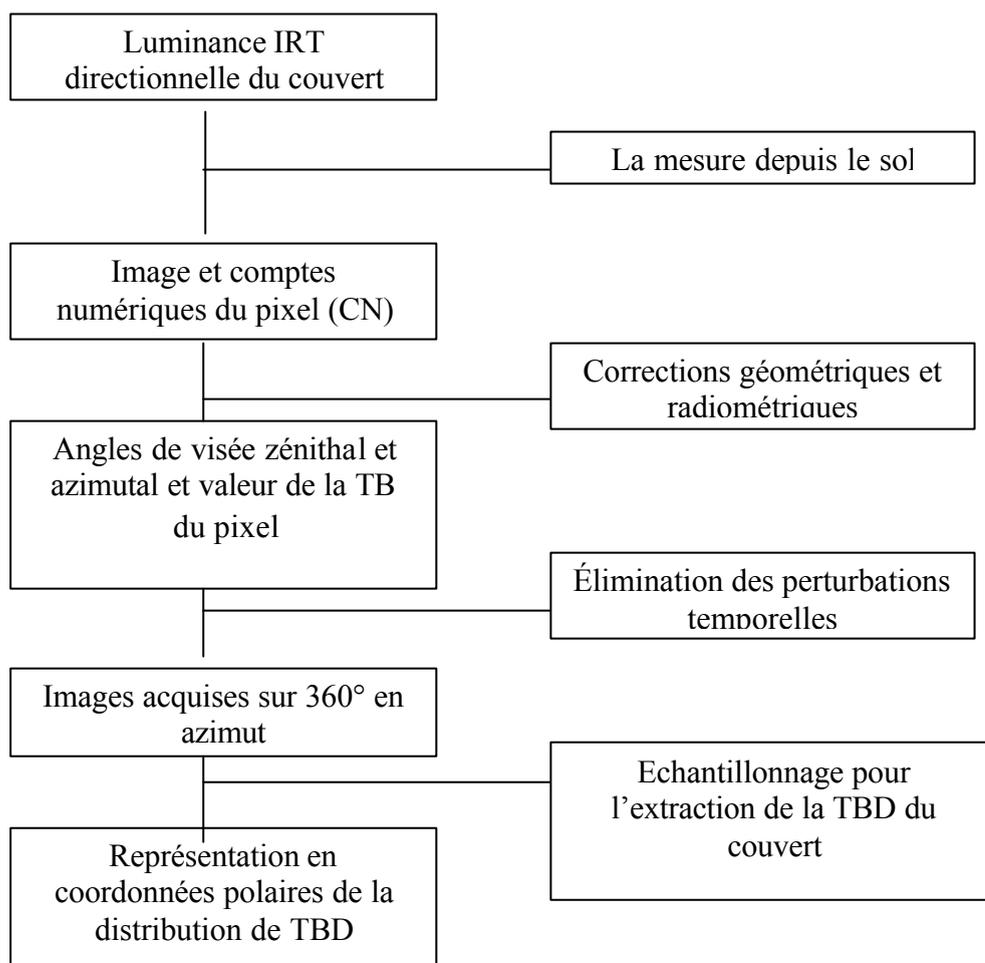


Figure 6.1 Méthodologie pour la détermination de la TBD d'une culture de maïs en rangs

L'organigramme 6.1 présente la méthodologie pour l'acquisition de la TBD d'un couvert. Dans le chapitre 2, on a présenté les instruments utilisés et le système de mesure. Dans le chapitre 3, les corrections géométriques et radiométriques des images IRT ont été étudiées. Dans les chapitres 4 et 5 les erreurs dues à la mesure et aux traitements des données ont été mises en évidence. Dans ce chapitre nous étudions à travers un exemple de mesure réelle, la méthode d'échantillonnage et la méthode d'estimation des erreurs.

6.3 Détermination de la TBD

6.3.1 Réalisation de la mesure

Comme cela a été illustré au chapitre 2, la caméra mesure la luminance IRT du couvert au nadir, puis pour un même angle zénithal de visée de 45° dans les quatre directions azimutales (0° , 90° , 180° , 270°). Chaque visée dure environ 20 secondes. La fréquence de mesure est d'une image par seconde. Environ vingt images sont donc acquises par direction de visée. La TB moyenne sur les 20 images est calculée et sera utilisée pour minimiser les effets dus aux fluctuations rapides et améliorer ainsi la précision de la mesure. Chaque image acquise pour l'une des visées obliques recouvre une partie d'image acquise au nadir. Dans la partie commune aux deux images, les pixels sont vus dans la même direction de visée, aussi la différence entre leurs valeurs est entièrement fonction des changements temporels du couvert entre des instants différents d'acquisition.

6.3.2 Méthode d'échantillonnage pour l'extraction de la TBD

Le choix de la taille de l'échantillon pour l'extraction de la TBD à partir des images IRT acquises par la caméra dépend des divers facteurs présentés dans les chapitres précédents. Pour minimiser les influences des fluctuations micro-météorologiques et de l'hétérogénéité spatiale à petite échelle du rayonnement de la surface, un grand échantillon de largeur égale à un nombre entier de distances inter-rangs sera choisi. Cependant l'effet du champ et les caractéristiques de la TBD de la cible limitent cette méthode de sélection.

La simulation de l'effet de champ a été réalisée avec les paramètres suivants : la hauteur de la camera H_C est de 20 m, la distance inter-rangs L est de 0.8 m, la hauteur de la végétation h est de 0.8 m, la largeur de la végétation a est de 0.4 m. Les échantillons sont de 1, 5 et 9 rangs. Les champs au nadir correspondant sont respectivement 2° , 11° , 20° . Les champs pour un angle de visée de 30° sont respectivement de 1.7° , 8.6° et 15° (figure 6.2).

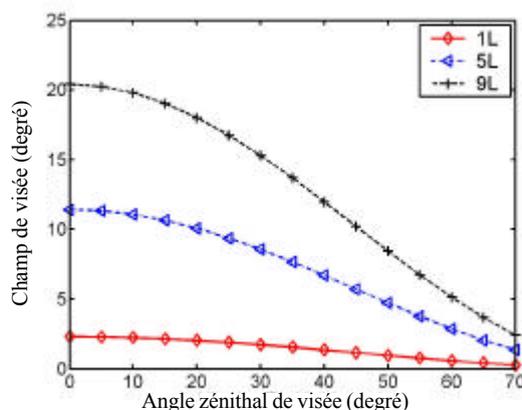


Figure 6.2 Evolution du champ en fonction de la taille de l'échantillon.

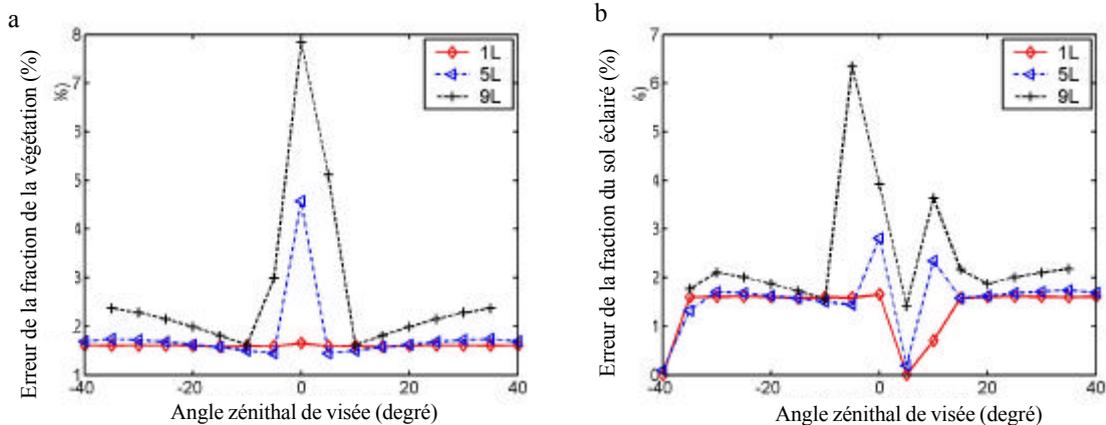


Figure 6.3 Simulation des erreurs dues à l'effet de champ sur les fractions de végétation (a) et de sol éclairé (b).

Le modèle de champ prévoit que la fraction de végétation est toujours surestimée par la mesure. L'erreur augmente avec la taille de l'échantillon et est fonction de l'angle de visée. L'erreur maximale est obtenue pour une visée au nadir. En s'éloignant du nadir, les erreurs sont beaucoup plus faibles grâce à des effets compensatoires.

La figure 6.3 représente l'erreur simulée des fractions de végétation et de sol éclairé, produite par l'effet de champ. Sur la figure 6.3a, les erreurs sont inférieures à 2% pour l'ensemble des angles zénithaux d'un échantillon d'un rang. Pour des échantillons de 5 et 9 rangs, acquis à des angles zénithaux supérieurs à 10°, l'erreur reste inférieure à 2.5%. Pour une visée au nadir ou proche du nadir, les erreurs augmentent rapidement avec la taille de l'échantillon, l'erreur maximale de 8% est atteinte pour un échantillon de 9 rangs. Pour l'ensemble des tailles d'échantillon, l'erreur est toujours plus grande que 1.5%. Sur la figure 6.3b, on observe à nouveau que des échantillons de petite taille entraînent de plus faibles erreurs. Avec l'échantillon d'un rang, l'erreur est encore inférieure à 2%. Il existe deux directions de visée pour lesquelles les erreurs sont proches de zéro. Dans un cas on se trouve en condition de visée rasante, pour laquelle l'ensemble du couvert est vu par la caméra. L'autre cas correspond à une visée selon un faible angle d'incidence pour lequel le sol à l'ombre est masqué par la végétation dans la direction antispéculaire. Par contre, une erreur maximale est observée dans la direction spéculaire parce que la végétation masque la fraction de sol éclairé. Pour des échantillons de 5 et 9 rangs les erreurs associées sont respectivement inférieures à 3% et à 7%.

Qin et al (1995) ont caractérisé le hot spot pour un couvert aléatoire. La largeur moyenne du hot spot est de 5°, et la valeur minimale de 2°. Les conditions de notre mesure caractérisée par un champ de 5° et une caméra placée à une hauteur de 20 m permettent de couvrir un échantillon de dimension 1.7 m par visée au nadir. Cette taille d'échantillon ne permet d'éviter ni l'influence de l'hétérogénéité géométrique du couvert ni celle des changements environnementaux sur les valeurs de la TBD. Pour un

échantillon plus grand que le hot spot (1.7m), un effet de lissage sur la mesure de hot spot est inévitable ce qui ne permet pas de le détecter.

Le hot spot est situé sur la position de l'ombre de la caméra, et de dimension comparable (0.7m). L'ombre modifie la forme du hot spot en abaissant la valeur de sa TB. Aussi pour une tache inférieure à 5° et pour ces conditions de mesure, il est difficile d'obtenir une valeur précise de la TB du hot spot du couvert. Pour faire cette mesure, on choisira un échantillon de grande taille.

Notre échantillon est choisi de la façon suivante :

- pour une visée au nadir ($\theta = 0^\circ$), on choisit un échantillon de 3 rangs ce qui donne une erreur due à l'effet de champ inférieure à 3%.
- pour une visée proche du nadir ($2^\circ < \theta < 20^\circ$), on choisit un échantillon de taille moyenne: dimension 5 rangs ce qui donne une erreur due à l'effet de champ inférieure à 3%.
- pour une visée éloignée du nadir ($\theta > 20^\circ$), on choisit un échantillon ayant un champ de 10° ce qui donne une erreur due à l'effet de champ inférieure à 3%. Contrairement aux visées au nadir ou proches du nadir, la taille de l'échantillon ne s'exprime pas comme un nombre entier de fois la distance inter-rangs car un grand nombre de rangs est alors vu par le capteur.

Pour le choix de l'intervalle angulaire d'échantillonnage, la méthode d'acquisition en bande a été utilisée : les images sont découpées en bandes perpendiculaires à la direction du rang. La largeur des bandes correspond à la taille des échantillons. Aussi la distance entre deux bandes varie comme la taille de l'échantillon. Dans une même bande les échantillons acquis à des angles de visées différents sont de tailles différentes. Deux échantillons successifs se recouvrent donc, la longueur du recouvrement est égale à $1/3$ de la dimension de l'échantillon. Le recouvrement des surfaces des échantillons successifs explique que certains pixels seront utilisés deux fois pour les calculs de TBD.

Au cours du traitement des données, certains défauts affectent l'image et doivent être éliminés : chemin pratiqué dans le couvert, ombres du capteur et de la grue, structures métalliques présentes dans le couvert, effets anthropiques. L'identification de ces défauts s'est fait visuellement et leur élimination s'est fait manuellement. Après l'élimination de ces défauts, les données manquantes sont interpolées la méthode le plus proche voisin.

Par ailleurs, après avoir éliminé les effets temporels durant l'étape de traitement des données, il reste encore des différences de température dans les parties communes des images. Cette différence est inévitable et explique que l'on peut avoir deux valeurs différentes de TBD pour des acquisitions dans une même direction. On remplacera ces valeurs par leur moyenne.

Enfin pour les valeurs azimutales du graphe polaire où il n'y a pas eu d'acquisition de données, on réalise une interpolation (cubique) à partir des données acquises aux azimuts voisins.

6.3.3 Représentation polaire de la TBD

La TBD du couvert peut être représentée en coordonnées polaires. Le nord est défini comme la direction de référence, d'azimut 0° . Dans le sens horaire, les azimuts pour l'est, le sud et l'ouest sont respectivement 90° , 180° , 270° . Au midi solaire, l'azimut solaire est de 180° . Chaque point du graphique polaire représente la valeur de TB directionnelle du couvert.

6.4 Analyse d'un exemple de mesure et de traitement des données

6.4.1 Détermination et représentation de la TBD

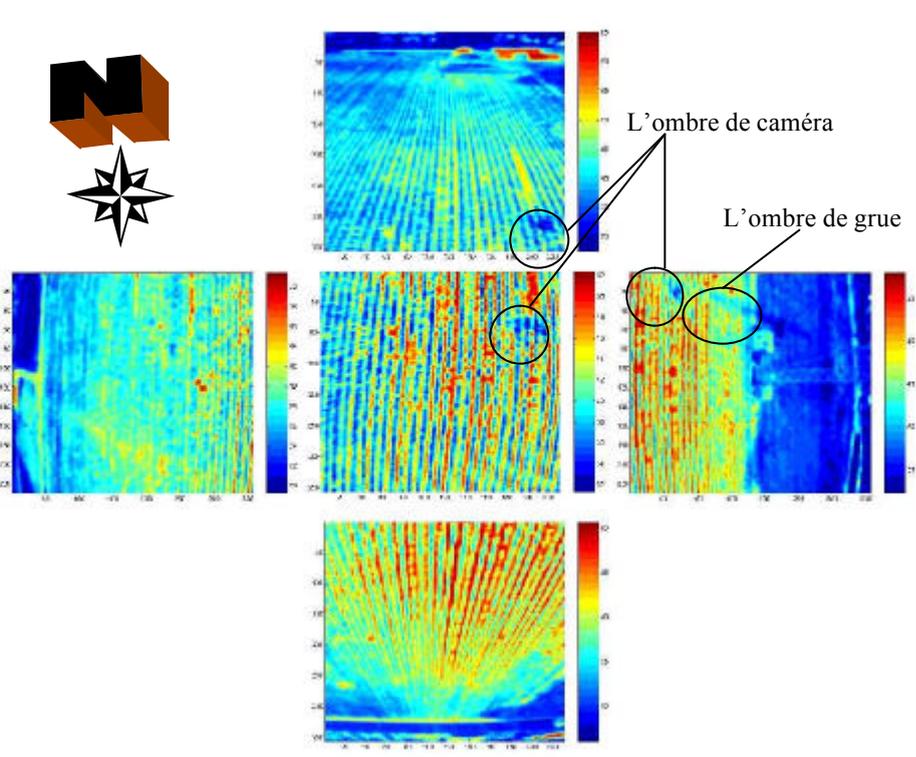


Figure 6.4 Images de TBD d'un couvert en rangs acquises en échantillonnant les directions azimutales sur 360° (après corrections géométrique et radiométrique).

La figure 6.4 montre cinq images acquises par la caméra IRT à 13h10 , le 24 juin 1999, pour un angle zénithal solaire de 25.6° , et un angle azimutal solaire de 222.6° . Les images ont été étalonnées. On dispose de la configuration géométrique d'acquisition de chaque pixel de l'image (angles de visée azimutal et zénithal) et de sa valeur de TBD. L'image acquise au nadir est l'image du centre de la figure. Les autres images sont acquises pour un angle de 45° par rapport au nadir: l'image du haut est l'image acquise dans la direction azimutale nord, puis en se déplaçant dans le sens horaire les images de droite, du bas et de gauche sont respectivement les images acquises dans les directions azimutales Est, Sud et Ouest. Lorsque la caméra vise vers l'Ouest, son azimut de visée

est proche de 90° alors que dans la direction Est, son azimut de visée est proche de 270° .

Ces images mettent bien en évidence la structure en rangs du couvert. Les bandes chaudes de sol éclairé (en rouge) et les bandes froides de végétation (en bleu) se succèdent périodiquement. La mesure des TB des composantes du couvert : le sol éclairé, le sol à l'ombre et la végétation sont effectuées 40 minutes avant le début de la mesure et sont respectivement: 44°C , 30°C et 27°C . On remarque qu'en conditions de visée perpendiculaire aux rangs du couvert (images de gauche et de droite), la fraction de sol chaud décroît lorsque l'angle de visée augmente: les images sont alors lissées et les valeurs de TBD sont plus basses.

Pour les images acquises au nadir et dans les directions azimutales nord et ouest, on distingue bien l'ombre du bras de la grue et de la plate-forme par des TB plus basses que pour les surfaces environnantes. L'ombre de la grue a une largeur de 1m et une longueur de 24 m, et elle occupe 30° du domaine zénithal de visée dans les images. Le sommet de l'ombre de la caméra couvre la région de hot spot.

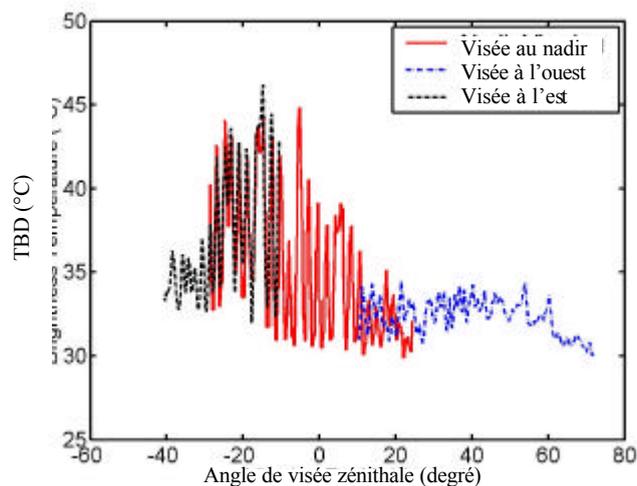


Figure 6.5 Profils de TBD le long du plan perpendiculaire à la direction du rang, extraits de trois images IRT.

La figure 6.5 montre les profils de TBD acquis dans le plan perpendiculaire à la direction des rangs, extraits des trois images (centrale, gauche et droite). Pour ces profils, l'intervalle de l'angle de visée est $\pm 30^\circ$ pour l'image centrale; pour l'image de gauche (visée Est) l'angle zénithal est inférieur à -10° et pour l'image de droite (visée ouest) l'angle zénithal est supérieur à $+10^\circ$. Il y donc a des recouvrements d'environ 20° entre l'image acquise au nadir et chacune des images acquises en visées Est et Ouest. Ce recouvrement peut alors être utilisé pour corriger les effets de changement temporel de la TB du couvert.

La figure 6.6 montre la différence temporelle de TBD dans les parties communes des images (vues selon les mêmes directions de visée). L'image acquise au nadir est prise

comme référence et les autres images sont comparées avec elle. Dans ce graphique, 6 images correspondant à différentes directions de visée sont utilisées (nadir, Nord, Sud, Ouest, Est, Sud-Est).. Une seule ne présente pas de différence de température, les autres présentent des différences de TBD de valeurs inférieures ou égales à 1.2°C . Les images acquises en visée Ouest et Est donnent respectivement des différences de température de 0.4°C et 0.8°C .

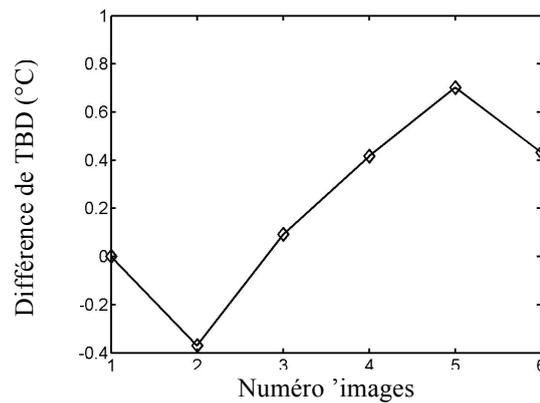


Figure 6.6 Différence temporelle de TBD sur les parties communes (ayant une même géométrie de visée) des images.

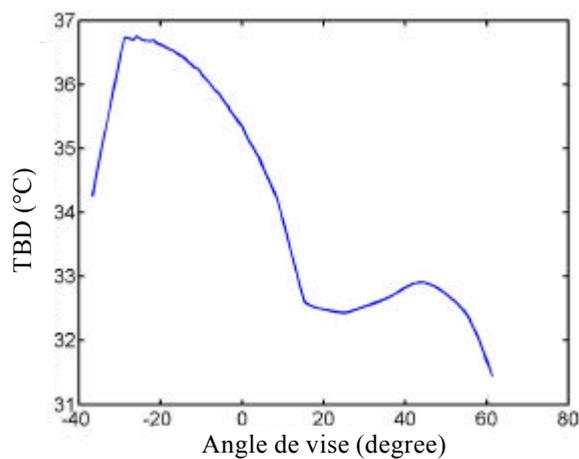


Figure 6.7 TBD dans le plan perpendiculaire à la direction des rangs.

La figure 6.7 montre la TBD du couvert dans le plan perpendiculaire à la direction des rangs. Les trois images de l'Ouest, de l'Est et du nadir ont été utilisées pour l'élimination des effets temporels. L'échantillonnage peut être réalisé ensuite selon le plan perpendiculaire aux rangs.

La figure 6.8 est la représentation polaire de la TBD du couvert de maïs acquise à 13h10, le 24 juin 1999. L'image présente quelques défauts: elle ne montre pas le lissage attendu et certaines anomalies apparaissent. L'hétérogénéité de luminance du couvert, les anomalies du couvert et les erreurs de mesure n'ont pu être éliminées complètement. Leur influence peut seulement être minimisée. Dans certaines images, la flèche de la grue explique une grande partie de ces erreurs: son ombre couvre de grandes surfaces qui doivent être éliminées, entraînant ainsi une perte des données correspondantes.

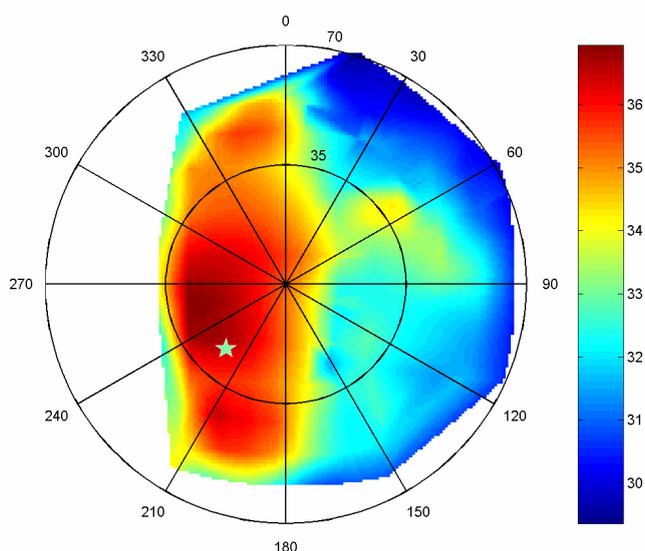


Figure 6.8 Polaire de la TBD du couvert de maïs, acquise à 13h10 du 24 juin 1999.

Pour étudier les changements de la TBD du couvert de maïs, on a extrait du graphique 6.8 les profils de TBD du couvert le long du plan principal solaire (SPP) et le long du plan perpendiculaire (V-SPP). Ces deux profils sont représentés sur la figure 6.9.

La figure 6.10 donne une représentation différente de la TBD du couvert, en 3D. Le plan horizontal comporte les iso-contours de TBD et l'axe des Z donne les valeurs de la TBD. Cette image illustre bien les variations de la TBD avec la direction de visée. Elle permet de mettre en évidence notamment les températures maximales locales. Elle donne une représentation quantitative de la TBD, ce que ne permet pas le diagramme polaire qui doit faire appel aux couleurs pour cette représentation. Cependant, en comparaison avec la représentation plane en coordonnées polaires de la figure 6.8, les caractéristiques de la TBD dans l'ensemble des directions sont moins bien mises en évidence sur le graphique 3D à cause de la géométrie de projection. Lors de l'étude de la TBD d'une culture en rangs, la représentation en coordonnées polaires planes permet de mieux mettre en évidence la bande (figure 6.8) de hot spot. Aussi dans la suite de l'étude, on représentera la TBD par de tels graphes 2D en coordonnées polaires.

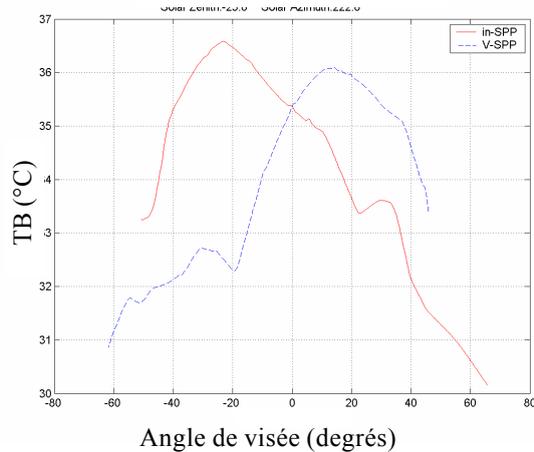


Figure 6.9 Profils de TBD dans le plan principal solaire (in-SPP) et dans le plan perpendiculaire (V-SPP).

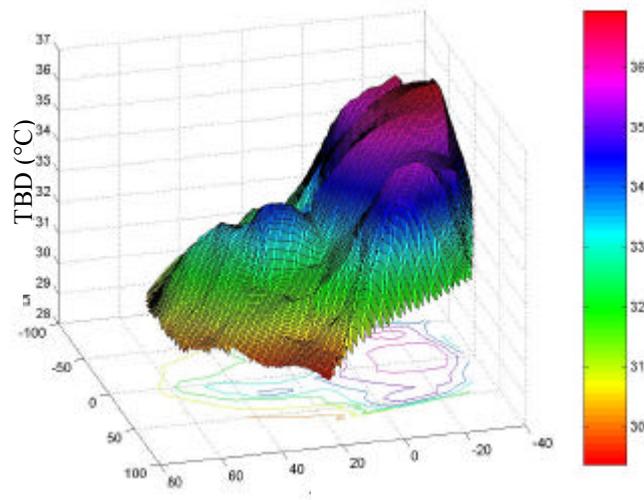


Figure 6.10 Représentation 3-D de la TBD du couvert

6.4.2 Analyse des erreurs

Comme cela a été montré au chapitre 4, les erreurs dues à ces mesures dépendent de trois types de facteurs: les caractéristiques de l'ensemble caméra-grue, le protocole de mesure, le traitement des données et l'hétérogénéité de surface:

Après corrections géométrique et radiométrique des images thermiques, la distribution de TB est obtenue pour une mesure (tirage unique) avec un écart-type (s) de 0.5°C pour un intervalle de confiance à 95% (Jacob 1999). Dans le cas de nos mesures, la caméra vise une même surface pendant une durée de 20s et en tire 20 images. La précision de la

mesure de TB résultant de la prise en compte de ces 20 images ($\frac{2s}{\sqrt{n}}$ avec $n = 20$) est de 0.23°C environ. La précision de la position des pixels des images est de 0.1°C. Cette erreur peut être négligée devant les dimensions du champ.

De plus les mesures de TBD sont réalisées avec une haute fréquence de prise d'images pendant un temps de mesure de l'ordre de quelques minutes. Les perturbations de la mesure par les changements temporels (haute et basse fréquence) de TBD du couvert sont inévitables. Le bruit haute fréquence est minimisé par une fonction interne de la caméra moyennant les mesures sur une durée de mesure de 20 s. Les variations temporelles de TBD introduites par la durée de mesure sont éliminées par la méthode présentée sur la figure 6.6. Pour un échantillon de 5 rangs, les erreurs sont de 0.1°C pour les conditions de mesure données par la figure 6.6.

L'erreur de mesure de la TBD due à l'hétérogénéité de la luminance du couvert est causée principalement par deux facteurs: les variations de structure du couvert (hauteur des plants de maïs, etc...) et les changements micro-météorologiques. Comme nous sommes intéressé plutôt aux propriétés directionnelles du couvert, nous prenons la différence de TBD entre la visée au nadir et une visée à 30° d'angle zénithal comme critère d'homogénéité. En effet, même si la parcelle est hétérogène spatialement en TBD absolue, la parcelle peut être considéré comme homogène si à chaque position locale, la différence en TBD entre les différentes visées reste inchangée. Pour les mesures réalisées à 13h42 le 24 juin pendant une durée de mesure de 240 s et pour une taille d'échantillon de 3 rangs, l'écart-type de la différence de TB entre une visée au nadir et une visée à 30° d'angle zénithal est de 0.6°C pour les surfaces parallèles aux rails de la grue. Cette erreur due à l'hétérogénéité de surface diminue avec la taille de l'échantillon: pour des échantillons de dimension 3, 5, 9 rangs, les erreurs associées correspondant à un intervalle de confiance à 95% sont respectivement: 1.2°C, 0.8°C et 0.6°C.

Table 6.1 Erreurs sur la mesure de la TBD

Type d'erreur	Valeur de cette erreur (°C) pour un intervalle de confiance à 95%
Erreurs aléatoires	
Echantillonnage de l'instrument	±0.22
Réalisation de la mesure	±0.1
Hétérogénéité de surface	±0.8
Erreur due au système de mesure	
Effet de champ (échantillon à 3 rangs)	±0.5

Les erreurs dues aux performances de l'instrument, à l'hétérogénéité du couvert et au système de mesure sont des erreurs aléatoires. Il existe d'autres types d'erreur: celles du dispositif de mesure fonction de l'effet conjoint de la géométrie de mesure et de la structure en rangs du maïs. Pour la mesure réalisée à 13h10 le 24 juin 1999, la caméra étant à 20 m de haut et pour un échantillon de 5 rangs au minimum, les erreurs

commises sur l'estimation des différentes fractions des composantes du couvert sont inférieures à 3% ce qui correspond à une différence maximale de température de 0.5°C.

Les erreurs sur la mesure de la TBD du couvert pour la mesure réalisée à 13h10 le 24 juin 1999, sont résumées dans le tableau 6.1. Les principales sources d'erreur sont l'hétérogénéité spatiale du couvert et l'effet du champ. Pour cette expérience, l'erreur de mesure est très faible devant la variation maximale de la TBD due à la géométrie de visée, et peut donc être négligée. Cependant ce n'est pas toujours le cas, et pour d'autres mesures de TBD il faudra tenir compte des erreurs de mesure.

6.5 Conclusion

La nouvelle méthode d'échantillonnage pour la détermination de la TBD du couvert à partir d'images IRT, présentée dans cette étude diffère des méthodes existantes comme les méthodes à champ constant ou à taille d'échantillon constant. Cette méthode repose sur l'analyse de l'influence des facteurs suivants: les changements environnementaux, la géométrie de mesure, les conditions de mesure, les caractéristiques de l'instrument. Les caractéristiques de l'échantillonnage sont les suivantes : pour une visée au nadir ($\theta < 2^\circ$) la taille de l'échantillon est de 3 rangs avec une erreur due à l'effet du rang inférieure à 3%; pour une visée proche du nadir ($2^\circ < \theta < 20^\circ$), la taille de l'échantillon est de 5 rangs avec une erreur due à l'effet de rang inférieure à 3%; pour une visée éloignée du nadir ($\theta > 20^\circ$), la taille de l'échantillon à un champ de 10° avec une erreur due à l'effet de champ inférieure à 3%. La taille de l'échantillon augmente avec l'angle de visée. On s'est plus particulièrement intéressé aux méthodologies permettant d'analyser les influences des différents facteurs sur la mesure ainsi que sur la représentation graphique des caractéristiques de ces facteurs.

Nous avons présenté un cas d'acquisition de la TBD du couvert en conditions réelles en utilisant le système de mesure caméra-grue. Pour la mesure faite à 13h10 du 24 juin 1999, quatre types d'erreurs ont été mises en évidence et estimées: les erreurs dues aux caractéristiques de l'instrument, les erreurs dues aux conditions de mesure, les erreurs provenant de l'hétérogénéité spatiale du couvert et les effets du champ de visée. Les résultats montrent que l'influence de l'hétérogénéité spatiale du couvert est la principale source d'imprécision de la mesure et donc de la détermination de la TBD. Les erreurs sont aussi fonction de la durée de la mesure, de l'angle de visée et de la taille de l'échantillon. L'utilisation de cette nouvelle méthode d'échantillonnage entraîne une erreur totale aléatoire maximale de 1.6°C. Toutes ces erreurs ont des valeurs variables et sont fonction des conditions de mesures qui diffèrent d'une expérience à l'autre.

Chapitre 7

Variations de la distribution de la TBD

7.1 Introduction

Plusieurs auteurs ont montré que la TB et ses variations directionnelles dépendent de la géométrie capteur-cible-Soleil, et des effets complexes de la structure du couvert, couplés à divers paramètres agronomiques (Kimes et al. 1981, Prévot et al. 1995, Lagouarde et al. 1995, Kustas, et al. 1999). Friedl et al. (1994) ont évalué la relation entre la TB de la parcelle et l'index de végétation (NDVI) au-dessus d'une prairie de grandes herbes. Ils ont trouvé une corrélation négative persistante résultant de la fraction de trous de la végétation et de la température du sol. Lagouarde et al. (1995) ont observé la variation de la TBD sur plusieurs types de couvert et ont conclu qu'il existait une structure de hot spot thermique, et que la forme du profil le long du plan principal était dominée par l'âge des arbres pour une surface forestière.

Dans ce chapitre, nous présenterons les variations de TBD de la parcelle en fonction de la direction du Soleil, et du cycle de croissance de la plante. L'objectif de cette étude est de clarifier les raisons essentielles des variations de structure directionnelle du rayonnement thermique d'une parcelle de maïs. Cette information devrait être utile pour l'amélioration des modèles de TBD.

7.2 Caractéristiques de la TBD de la parcelle

7.2.1 Mesure à des instants différents le même jour

La figure 7.1 montre les changements temporels de la distribution de TBD de la parcelle de maïs le 24 juin 1999 (JJ1 75). Les profils dans le plan principal solaire (SPP) et le plan perpendiculaire (V-SPP) sont également présentés. La hauteur du couvert était de 0.8 m, l'indice de végétation de 1.73. La vitesse moyenne du vent à la hauteur d'un mètre au-dessus du couvert était de 0.8 m/s. Les valeurs instantanées maximale et minimale étaient de 2.6 m/s et zéro respectivement. La parcelle avait été irriguée deux jours avant mais la surface du sol était déjà sèche, tandis que l'humidité du sol à 5 centimètres de profondeur était de 0.20 g/cm³.

Le tableau 7.1 montre les angles zénithaux et azimutaux solaires lors des mesures de TBD présentés sur la figure 7.1. Dans tous les diagrammes polaires de la figure, des valeurs élevées de TBD apparaissent suivant la direction de visée anti-spéculaire, alors

que l'amplitude des variations angulaires de TB change considérablement en fonction de l'heure de mesure.

Tableau 7.1 Angles zénithaux et azimutaux solaires lors des mesures de TBD

Heure	7:56	8:29	13:10	13:55	15:33	16:02
θ_s (degrés)	52	46	26	33	49	54
φ_s (degrés)	93	99	222	241	264	269

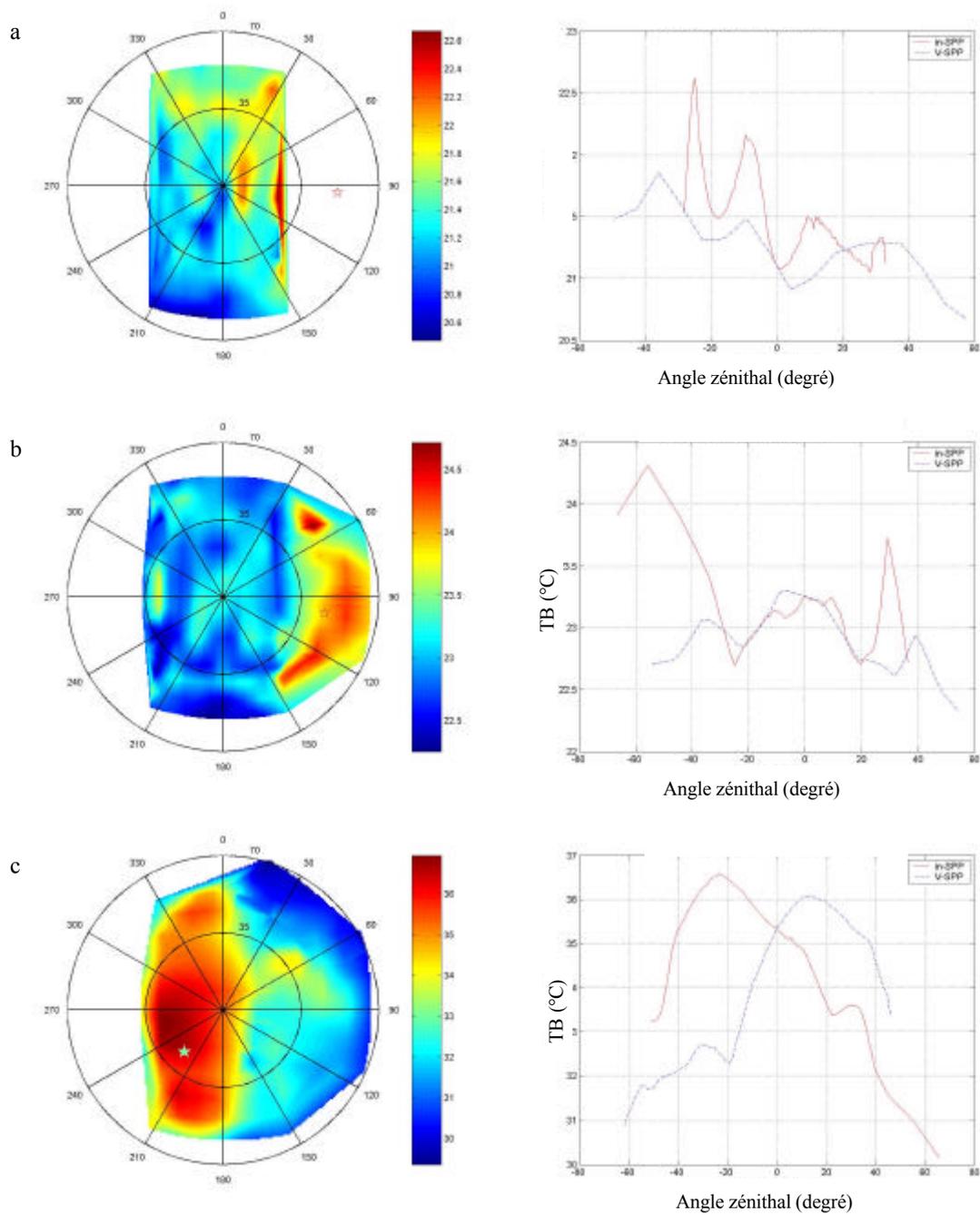
Dans la figure 7.1, nous pouvons constater que le matin à 8 heures, l'amplitude de la variation directionnelle de la TBD est de seulement 2°C. Le profil présente des pics de 1°C seulement. A ce moment, le soleil se trouvait à l'Est et éclairait le couvert dans la direction perpendiculaire aux rangs. A cause de la faible hauteur du soleil, les rayons du soleil étaient interceptés totalement par la partie supérieure du couvert (les feuilles) et les sols restent totalement à l'ombre. Dans cette situation, la température des sols à l'ombre était proche de celle de l'air du fait que le rayonnement reçu par ceux-ci est faible; Comme le couvert considéré était en état d'alimentation hydrique normal, la température des plantes était également proche de celle de l'air grâce au processus de la transpiration de la plante. Bien que le changement de direction de visée résulte d'une modification de la proportion relative du sol et de la végétation, la TBD résultante reste relativement stable. Une heure plus tard, les TB des composantes de la parcelle n'ont pas changé. L'amplitude de la variation directionnelle de la TBD est toujours de 2°C..

En début d'après-midi, la TBD de la parcelle a atteint son maximum diurne. La partie du sol éclairée par le rayonnement solaire direct possède alors la température la plus élevée de la parcelle. Cette température a augmenté bien plus rapidement que celles de la végétation et du sol à l'ombre, et joue un rôle dominant dans les variations de la structure directionnelle de la TBD. Une bande chaude dans la carte polaire apparaît dans la direction du rang et au côté du soleil.

À 16 heures, la géométrie du Soleil était similaire à celle du matin à 8 heures : le rayonnement solaire direct perpendiculaire aux rangs et la hauteur du soleil était basse. Du fait que les sols étaient pratiquement de nouveau ombragés par les plantes, l'écart en température entre les sols et les plantes diminuent. C'est la raison pour laquelle l'amplitude de la variation directionnelle de la TBD a diminué de 3°C.

Pour les observations à des instants différents au cours de la même journée, les changements de TBD dépendent en grande partie des changements de TB des composantes. L'importance de la position solaire a été discutée par de nombreux auteurs (Kimes et al. 1981, Prévot et al. 1995, Lagouarde et al. 2000, Kustas, et al. etc. 1999). La position du Soleil détermine les fractions de sol éclairé et à l'ombre aussi bien que les différences de TB des composantes. Son déplacement cause la redistribution des fractions des composantes dans la parcelle. En outre, la position du soleil a un fort impact sur la valeur de la TB de chaque composante de la parcelle (fonction également de quelques autres paramètres). La teneur en eau dans la couche superficielle du sol joue un rôle essentiel par le biais de l'évapotranspiration et de la conduction de chaleur dans le sol, qui entraînent des changements de la température du sol. Avec une forte humidité du sol, les changements de température de surface sont limités et retardés par la capacité calorifique élevée du sol et par l'effet de l'évaporation. Pour un sol sec,

l'inertie thermique du sol et la capacité calorifique diminuent, ce qui provoque une augmentation de la température de surface.



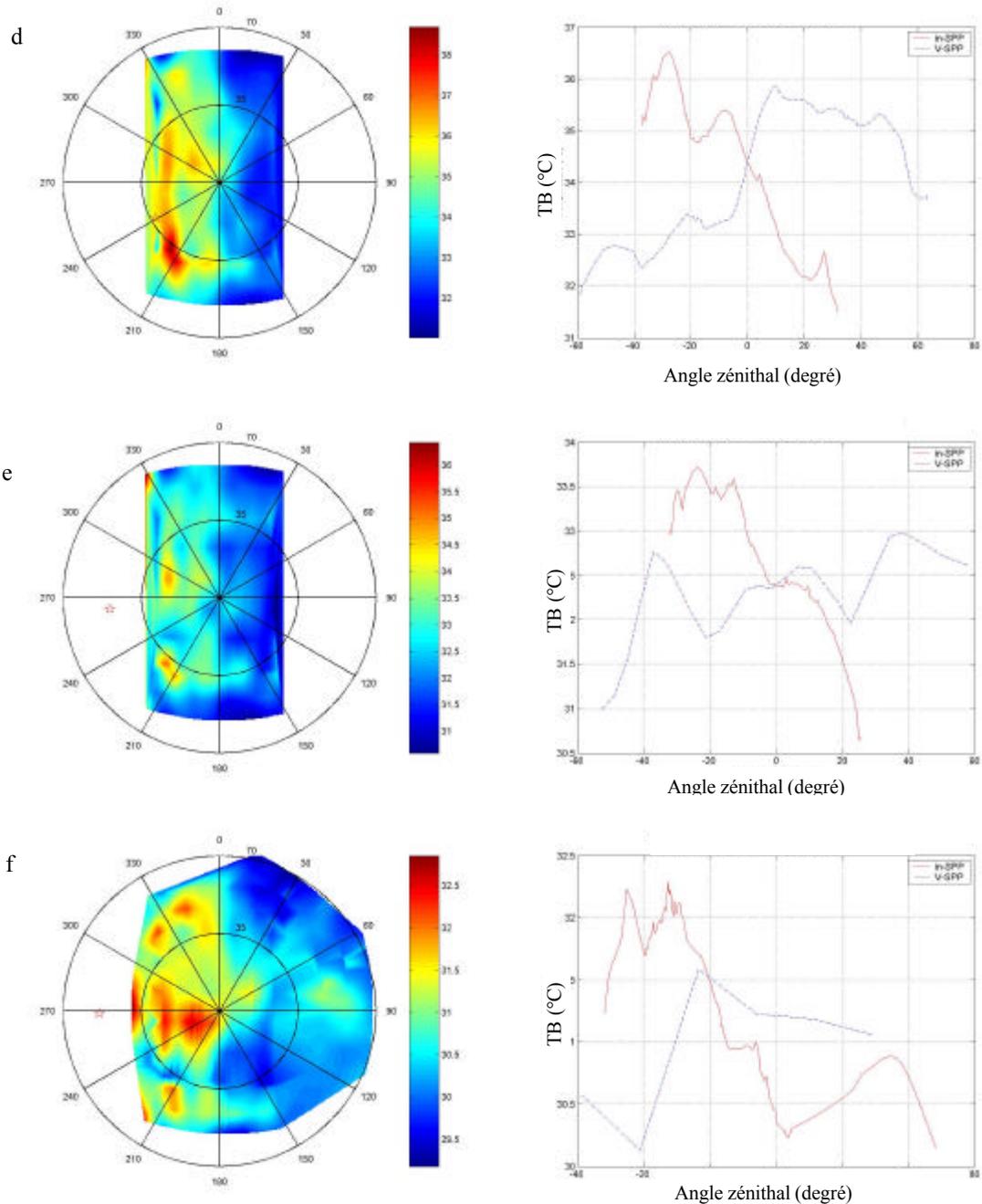


Figure 7.1 Diagrammes des variations de la TBD et profils correspondants dans le plan principal solaire et dans le plan perpendiculaire au cours de la journée du 24 juin 1999.

La figure 7.2 montre les évolutions temporelles de la TB des composantes de la parcelle le 24 juin 1999. Ces évolutions sont bien corrélées avec la loi de l'évolution de la température de l'air et du rayonnement solaire avec des valeurs maximums vers le midi.

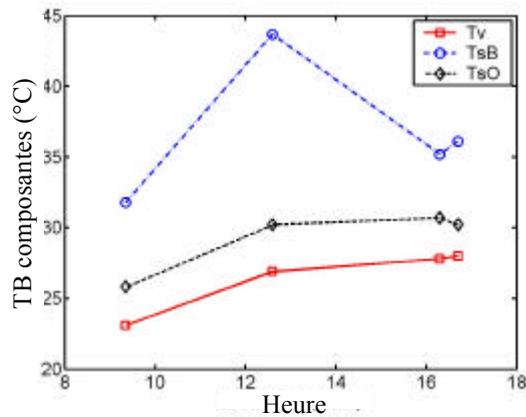


Figure 7.2 Le changement temporel de la TB des composantes de la parcelle le 24 juin 1999.

7.2.2 Mesures à des dates différentes

La figure 7.3 présente des diagrammes polaires de la TBD de la parcelle et ses variations dans les plans solaires principal et perpendiculaire. Les mesures ont été prises à des jours différents tôt dans l'après-midi, entre le 16 Juin et le 20 Juillet. Outre les diagrammes de la figure 7.1, on a fait trois autres séries d'observations à des heures similaires au cours de la période de croissance végétale. Dans ces observations, la vitesse de vent est faible avec une valeur moyenne maximale de moins de 2.1m/s, et une valeur instantanée maximale moins de 4.9 m/s. Le ciel est clair, l'influence des nuages est très faible et a été négligée. Le tableau 7.2 montre les paramètres des mesures de TBD tôt dans l'après-midi pendant la période de croissance de la végétation. Dans ce tableau, θ_s et ϕ_s sont respectivement les angles zénithal et azimutal solaires, l'humidité du sol est mesurée à la profondeur de 0.05 m.

Tableau 7.2 Paramètres de la parcelle de maïs et heures de mesure

Dates / JJ	Heure	θ_s (°)	ϕ_s (°)	Hauteur du maïs (m)	LAI	Irrigation (jour avant)	Humidité (m ³ /m ³)
16 juin/167	13h20	28	229	0.5	0.75	6	0.14
24 juin/175	13h55	33	241	0.8	1.73	2	0.20
9 juillet/190	14h23	36	245	1.5	3.89	1	0.12
20 juillet/201	14h50	42	251	1.7	4.6	1	0.18

Dans tous les diagrammes, une région chaude apparaît. Cependant, on constate que sa forme et les profils dans le plan principal solaire et le plan perpendiculaire changent avec la quantité de biomasse présente.

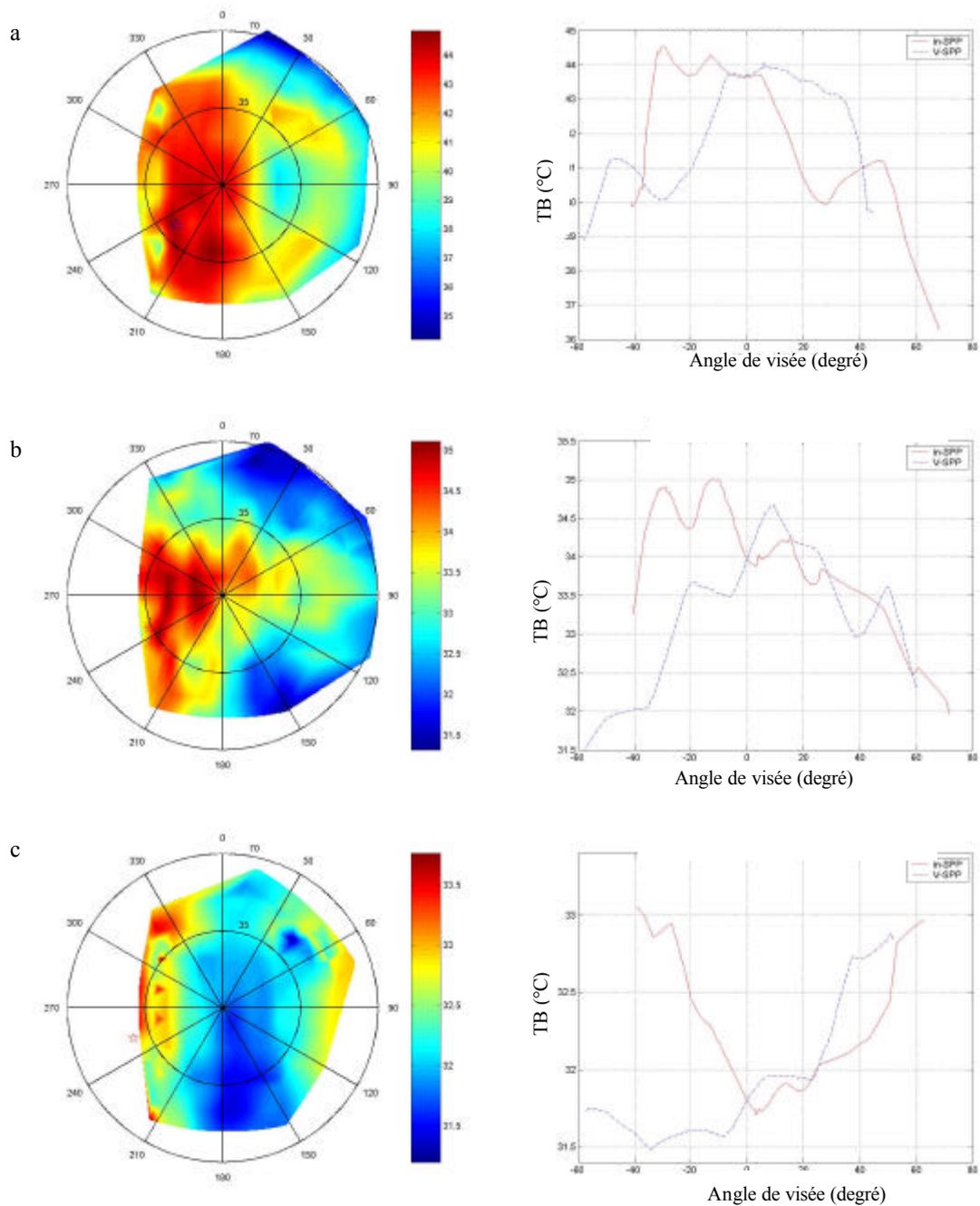


Figure 7.3 Graphes de la TBD de la parcelle et leurs variations dans les plans solaire principal et perpendiculaire (V-SPP) pour les trois journées JJ 167, JJ 190, JJ 201.

Une large bande de zone chaude est visible sur le diagramme polaire du 16 Juin, qui correspond à une faible fraction de la composante végétale et à une faible hauteur de maïs. La bande se situe le long de la direction des rangs, la zone la plus chaude dans la bande est autour de la position du Soleil. La plus grande partie du sol est éclairée directement par le Soleil. Le sol sec s'échauffe rapidement et atteint une température bien supérieure à la végétation. La fraction de la composante végétale est faible dans le

cas d'une visée au nadir ou pour un petit angle proche du nadir, ce qui entraîne que la bande chaude est très large. Pour un grand angle, la fraction végétale augmente rapidement, ce qui provoque une diminution de la température de surface de la parcelle, la limite étant la température de la composante végétale. L'amplitude des différences de TBD atteint 8°C, ce qui est la valeur maximale observée sur les quatre diagrammes. Ce phénomène est tout à fait comparable aux observations de Lagouarde (2000), qui conclue à la réduction de la taille du hot spot thermique avec l'âge des arbres. Par rapport aux profils de TBD du 16 Juin, une bande chaude plus étroite apparaît dans les profils du 24 Juin, la hauteur du maïs étant alors de 0.83 m et l'indice foliaire de 1.73.

Un autre effet de la croissance du maïs sur la variation de TBD est visible sur la TB des composantes. Avec l'augmentation de la hauteur et de la largeur du maïs, la fraction du sol éclairé diminue, et la période pendant laquelle le sol est éclairé par le rayonnement solaire direct est raccourcie, ce qui entraîne une diminution de TB du sol éclairé.

Dans le diagramme polaire issu des mesures du 9 Juillet, la bande chaude est moins évidente. Elle s'est transformée en une zone chaude de forme arrondie. La zone la plus chaude est autour de la position solaire. Ce phénomène est dû aux changements de structure géométrique du couvert. Avec l'augmentation de la biomasse, la structure en bandes de la parcelle tend à disparaître. Alors, les propriétés de la parcelle se rapprochent de celles d'une surface homogène, qui correspond aux caractéristiques de TBD décrites par le diagramme.

La figure 7.3c montre une TBD comportant une biomasse plus importante, le champ étant alors presque entièrement recouvert par les feuilles de maïs. Contrairement au cas de faible biomasse (le diagramme 7.3a), la TBD est plus faible au nadir, elle est associée à une bande froide apparaissant dans le diagramme polaire. Dans cette mesure, la TB du sol est inférieure à celle des feuilles, au cours de l'après-midi.

Nous pouvons constater que l'amplitude de la TBD s'atténue avec l'augmentation de la densité de la végétation (augmentation de l'indice foliaire). Ceci peut être expliqué par deux phénomènes: (1) dans un couvert végétal dense, la différence entre les températures des composantes est plus faible; (2) l'effet de rang et la variation directionnelle de la fréquence de trous sont plus faibles pour un couvert dense.

La figure 7.4 présente trois diagrammes polaires de la TBD au cours de la matinée, pour trois dates de mesures (tableau 7.3). Nous pouvons observer une bande chaude dans le sens du rang et autour de la direction du Soleil pour les mesures du 16 juin, tout à fait similaire à ce que montrent les autres mesures de la même période (figure 7.1 du 24 juin). Pour les mesures du 20 juillet et du 6 août, une structure "concave" apparaît clairement dans les cartes de TBD. La TBD au nadir est la plus froide. On peut noter également que l'amplitude de variation directionnelle est faible (environ 2°C). La structure directionnelle "convexe" évolue vers une structure concave du fait de l'inversion de l'ordre des températures entre le sol et la végétation.

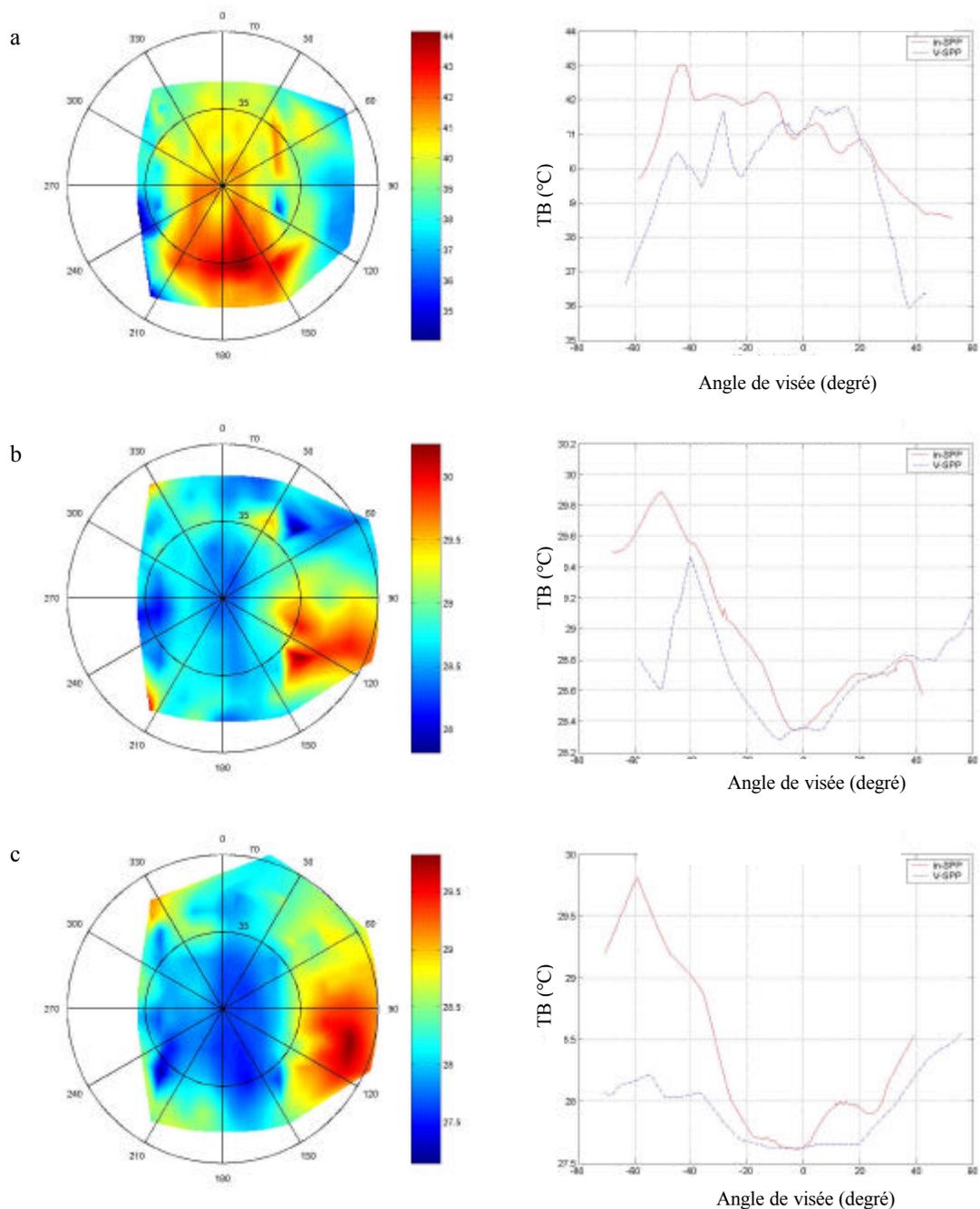


Figure 7.4 Diagrammes polaires de la TBD du matin et profils correspondants dans le plan principal solaire et le plan perpendiculaire, pour trois dates différentes (16 juin, 20 juillet, 6 août 1999)

La figure 7.4 met également en évidence l'effet du hot spot thermique. Pour les trois dates, le maximum de TBD se trouve toujours autour de la direction du Soleil. Ce phénomène est lié au fait que tous les éléments du sol vus dans cette direction sont

éclairés et plus chauds. Dans les autres directions, une partie des surfaces à l'ombre (donc plus froides) est observable, d'où une diminution de la TBD.

Tableaux 7.3 Paramètres relatifs aux mesures de la figure 7.3

Date/Jour julien	Heure locale	θ_s (°)	φ_s (°)
16 juin / 167	10h56	24	146
20 juillet / 201	9h49	36	120
6 août / 218	8h39	50	106

θ_s : angle zénithal solaire; φ_s : angle azimutal solaire

7.3 Conclusion

Le dispositif de mesures multidirectionnelles caméra IRT – grue, que nous avons utilisé a permis d'acquérir la TBD du couvert de maïs à différentes dates et pour différentes conditions durant toute la période de la croissance. Les résultats montrent une grande dynamique de la variation directionnelle de la TBD, à la fois au cours de la journée et pendant le cycle de croissance. La comparaison des mesures nous a permis de montrer l'effet des différents facteurs affectant la variation directionnelle du couvert.

L'amplitude de la variation de TBD observée sur le couvert de maïs est comprise entre 2°C et 8°C. Elle est généralement faible le matin, et forte autour du midi solaire. Cette amplitude est faible au début et à la fin du cycle de croissance, et au contraire relativement forte au milieu de cette période.

La forme de la variation directionnelle dans une représentation polaire est bien marquée par une bande chaude ou froide dans la direction du rang. La zone la plus chaude se trouve toujours du côté du soleil, mais le maximum ne se trouve pas dans la direction anti-spéculaire.

Au début et au milieu du cycle de croissance, le couvert n'est pas dense, la TBD est plus élevée en visée verticale qu'en visée oblique (courbe convexe). Cela signifie que le sol est plus chaud que la végétation. A la fin du cycle (couvert dense), la variation directionnelle devient concave, parce que le sol est caché du Soleil par les feuilles et devient plus froid que ces dernières.

La variation directionnelle de la TBD est déterminée par deux facteurs: (1) la variation de la proportion des composantes constituant le couvert, dépendant de la structure du couvert et de la position du Soleil; (2) la différence de températures entre les composantes, dépendant de leur bilan d'énergie individuel. Cette différence de température est évidemment affectée par les propriétés physiques des composantes et par l'environnement (humidité, résistance aérodynamique, rayonnement, température de l'air, etc..)

Dans le chapitre 8, nous allons essayer de développer un modèle pour décrire la variabilité directionnelle de la TBD d'un couvert en rangs, en prenant en compte les effets spécifiques des rangs.

Troisième Partie

Modélisation de la TBD d'un couvert de maïs – développement d'un modèle de transfert radiatif géométrique optique - GORT

Chapitre 8

Modélisation de la variation directionnelle de la TBD d'un couvert de maïs en rangs

8.1 Introduction

La TBD d'une parcelle agricole est une caractéristique importante puisqu'elle permet d'estimer le bilan énergétique du couvert. Elle permet en outre de normaliser l'information radiométrique mesurable par télédétection sur les couverts végétaux. La TBD véhicule des informations sur les propriétés architecturales des cultures et peut être utilisée pour en estimer les paramètres clef pour leur suivi biophysique et phénologique..

L'amplitude de la variation directionnelle de la TBD d'une parcelle de maïs dépend fortement de son architecture et de la géométrie de mesure. Lagouarde et al. (2000), à l'issue d'une expérience menée dans le Sud-Ouest de la France pendant les étés 1995 et 1996, mettent en évidence l'existence d'effets directionnels tels que les différences entre observations verticales et obliques atteignent 4K. Cet effet se produit lorsque le capteur est dans la direction anti-spéculaire: les parties visibles de la scène sont éclairées sans qu'aucune ombre ne soit apparente; lorsque la direction d'observation s'écarte de la direction anti-spéculaire, des effets d'ombre se manifestent, ce qui conduit à une TB inférieure dans cette direction. Notre expérience montre aussi que la TBD d'une parcelle varie fortement en fonction de la date et de l'heure, et que la valeur maximale de la TBD apparaît dans la direction anti-spéculaire. En outre, la structure en rangs des cultures de maïs joue également un rôle important dans la forme de la TBD.

L'étude des variations directionnelles de la TBD des cultures de maïs a une longue histoire. Deux méthodes de recherches basées l'une sur la théorie de transfert radiatif (Prévoit et al., 1985, François et al., 1997) et l'autre sur la structure géométrique de la zone d'étude (Jackson et al., 1979, Kimes et al., 1982), sont largement répandues pour décrire les variations directionnelles de telles cultures dans les bandes thermiques. La première méthode ne prend pas en compte les effets de rangs. La deuxième méthode permet de décrire une culture en rangs. Jackson a adopté le concept de réflectance bidirectionnelle géo-optique qui s'appuie sur les variations directionnelles de réflectance spectrale des couverts. Il considère que le couvert est séparé en quatre composantes constitutives (sol éclairé et à l'ombre et végétation éclairée et à l'ombre) et que la TB dépend de la géométrie Soleil-cible-caméra. En revanche, l'effet de hot spot et l'influence des trous dans le couvert sont négligés, les rangs étant modélisés comme des barres opaques.

Au cours de ces dernières années, de nombreux modèles de réflectance bidirectionnelle ont été développés. Selon la classification de Qin et al. (1995) basée sur leur domaine d'applicabilité et leurs bases physiques, les modèles se divisent en quatre groupes (voir Chapitre 1).

Dans ce chapitre, nous développons un modèle tridimensionnel hybride inspiré des travaux de Jackson et al. (1979), Kimes et al. (1982), et Kuusk (1985), sur la théorie du transfert radiatif. Selon la définition de Qin, ce modèle appartient au deuxième groupe. Il combine l'analyse statistique de la fraction de trous du couvert et l'optique géométrique pour décrire les variations directionnelles de la TB du maïs. Enfin, nous présenterons le détail des calculs et une analyse détaillée de la sensibilité du modèle.

8.2 Développement d'un nouveau modèle hybride géo-optique de transfert radiatif (GORT) pour la simulation de la TBD de maïs en rangs

8.2.1 Description géométrique d'un couvert en rangs et du transfert radiatif simplifié dans le couvert

Description géométrique

Un modèle tridimensionnel est développé ici à partir d'un modèle 2D géométrique simplifié (Jackson et al. 1979, Kimes et al. 1982), conçu spécifiquement pour les cultures en rangs. Dans cette recherche, les rangs sont encore considérés comme des barres de section rectangulaire; cependant, le milieu végétal à travers lequel se propage le rayonnement n'est plus considéré comme opaque, mais poreux du fait de la présence de trous. Ainsi le sol sous-jacent peut être plus ou moins visible à travers le couvert végétal, en fonction de la fraction de trous calculable par la théorie du transfert radiatif, en fonction des directions d'observation. Afin de simplifier la modélisation de la TBD, nous supposons les feuilles de maïs plates, horizontales et distribuées aléatoirement. Par ailleurs, la barre de végétation n'est pas directement au contact du sol, mais à une certaine hauteur au-dessus du plan défini par le sol (Ganis, 1997). La base des tiges est négligée, ainsi que les petites feuilles sénescents situées sous des feuilles plus grandes.

La figure 8.1 est une représentation schématique du modèle: les rangs sont réduits à des barres solides étendues parsemées de trous, au-dessus du plan horizontal formé par le sol. La figure ne montre que la structure en coupe dans le plan perpendiculaire à la direction des rangs.

Ici, H est la distance entre le sommet du couvert et le sol; h est la hauteur de la base des tiges, distance entre le bas du couvert et le sol; b est la hauteur de la barre végétale, égale à $(H-h)$; L est la distance inter-rangs.

Les projections des directions du capteur et du Soleil sur le plan perpendiculaire à la direction des rangs sont définies par les angles \mathbf{a}_v et \mathbf{a}_s , respectivement. Dans ce plan, l'inclinaison solaire est comprise entre 0° et 90° , alors que les directions d'observation varient entre -90° et 90° .

$$tg\mathbf{a} = tg\mathbf{q} \sin \mathbf{j} \quad (8.1)$$

où \mathbf{q}, \mathbf{j} sont respectivement les angles zénithal et azimutal du rayonnement.

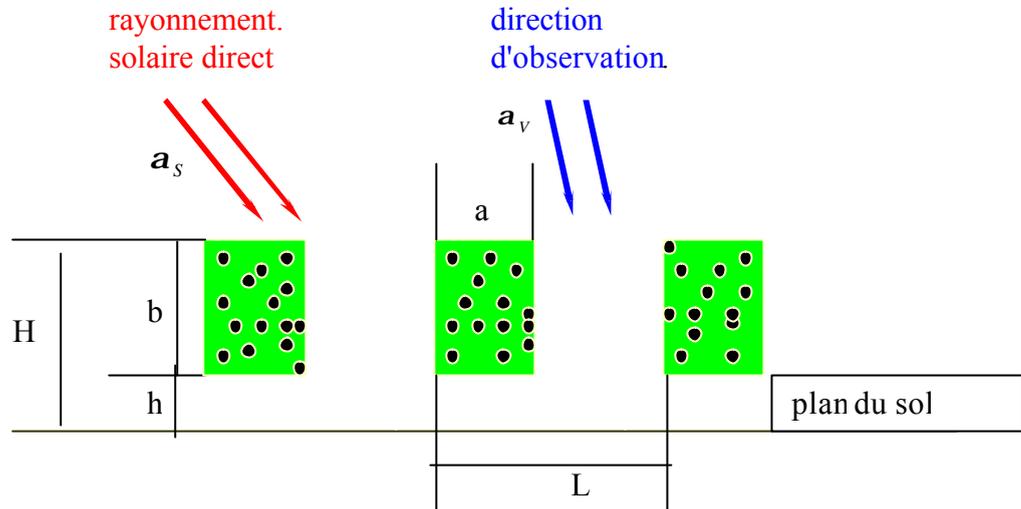


Figure 8.1 Schéma de la géométrie Soleil-couvert-captteur et définition des variables.

Transfert radiatif dans le couvert et choix de trois composantes

Trois composantes – au lieu des quatre habituellement utilisées – sont prises en compte pour décrire le couvert de maïs : le sol éclairé, le sol à l'ombre et la végétation. Par rapport à la définition de quatre composantes, une TB unique est assignée à la végétation, au lieu de deux pour les parties éclairées et à l'ombre. La TBD est calculée à partir de la TB des différentes composantes et de leurs fractions directionnelles:

$$T^4 = T_v^4 C_v + T_{se}^4 C_{se} + T_{so}^4 C_{so} \quad (8.2)$$

où T est la température directionnelle composite, même la TBD dans la recherche; T_v , T_{so} et T_{se} sont les TB moyennes de la végétation, de sol à l'ombre et de sol éclairé respectivement; C_v , C_{so} et C_{se} sont les fractions relatives de la végétation, du sol à l'ombre et du sol éclairé respectivement .

8.2.2 Calcul de la fraction des trois composantes

Dans les modèles GORT-BRDF décrivant les variations bidirectionnelles de la réflectance de couverts végétaux discontinus, les recherches concernent l'estimation des proportions *et des signatures spectrales* des quatre composantes du couvert. Le poids de chacune est fonction de la distribution spatiale de densité de biomasse, qui associe la position, la taille et la forme des plantes. La distribution spatiale des couverts

discontinus est habituellement déterminée statistiquement, ce qui conduit à effectuer le calcul de la densité par différents modèles statistiques. Ainsi la distribution du chemin optique dépend seulement de la géométrie d'éclairement et d'observation, et non de la position réelle des cibles.

A la différence de la plupart des modèles GORT-BRDF pour des cibles distribuées aléatoirement (forêts par exemple), notre modèle ne nécessite pas de prendre en compte l'analyse de la distribution spatiale ni l'effet des diffusions multiples. Comme la structure en rangs des cultures de maïs est régulière, la distribution de biomasse peut être calculée directement en utilisant cette structure en rangs, plutôt que par l'analyse statistique de la distribution des longueurs de chemin optique, qui dépendent de la position des cibles. Nous pouvons calculer l'effet directionnel de chaque type de surface à partir de la géométrie d'illumination et d'observation, de l'architecture du maïs et de la position des faisceaux lumineux atteignant le sol.

Les fractions des composantes peuvent être calculées en évaluant leur surface projetée au sol. Dans le modèle 2D, la fraction d'une composante est le rapport entre sa longueur projetée au sol et la distance inter-rangs (L). D'autre part, il suffit de ne considérer qu'un seul rang pour l'analyse (figure 8.2). De même que sur la figure 8.1, \mathbf{a}_s et \mathbf{a}_v sont les projections des angles d'illumination et d'observation sur le plan perpendiculaire à la direction du rang. Nous définissons un paramètre décrivant la présence ou l'absence de signal au sol, de valeur 1 pour la partie sombre du sol, et 0 pour sa partie éclairée. La partie (a) de la figure 8.2 décrit la fraction de sol éclairé pour le rayonnement solaire direct. Si \mathbf{a}_s est supérieur à $tg^{-1}(L-a)/b$. Aucune partie de sol éclairé n'est visible et la valeur du paramètre précédent a la valeur constante 1. De la même manière, nous pouvons définir un second paramètre pour la direction de visée. La partie (b) de la figure 8.2 décrit la fraction de sol observable selon la direction de visée faisant l'angle \mathbf{a}_v avec le nadir. On pose que la partie du sol vue directement correspond à la valeur 0, tandis que celle qui ne peut être observée qu'à travers la végétation (grâce aux trous) vaut 1.

Si la lumière du soleil pénètre dans les rangs du couvert sous une incidence oblique différente de la direction anti-spéculaire, la juxtaposition des deux paramètres précédents détermine au maximum quatre possibilités lorsque l'angle zénithal solaire est assez petit. Les valeurs des paramètres d'éclairement et d'observation associées dans cet ordre sont 00, 01, 10, 11, ce qui conduit bien à la définition de quatre cas qu'on peut renuméroter 1, 2, 3 et 4. Le cas 1 (relatif à 00) correspond à l'observation de sol éclairé, le cas 3 à l'observation de sol à l'ombre, et les cas 2 et 4 à l'observation de la végétation.

Le cas 1 correspond au sol éclairé, vu directement par le capteur (le rayonnement incident et celui se propageant dans la direction d'observation n'interagissent avec aucun élément végétal). Ainsi dans ce cas, les fractions de sol à l'ombre et de végétation sont nulles, et la fraction de sol éclairé est 1. Soit f_l la fraction relative à ce cas (rapportée à la distance inter-rangs). Si l'angle de visée par rapport au nadir ou si l'angle zénithal solaire, sont assez grands, le sol sera entièrement masqué par le couvert et cette fraction disparaîtra.

Le cas 2 correspond au sol éclairé vu par le capteur à travers le couvert végétal. La scène observée est donc composée uniquement de végétation et de sol éclairé. La fraction de sol éclairé est le produit de f_2 fois la fraction de sol vue à travers la végétation G_{2V} . Ainsi la fraction de couvert est $f_2(I - G_{2V})$. La fraction de sol à l'ombre est nulle. Dans le cas où l'angle de visée est inférieur à l'angle zénithal solaire, le cas 2 correspond à des surfaces situées sous la végétation. Sinon, il peut également correspondre à d'autres endroits tels que la partie de sol nu.

Les cas 3 et 4 correspondent aux situations pour lesquelles le rayonnement solaire interagit avec le couvert. Dans le cas 3, le capteur vise le sol (parties à l'ombre et éclairée) directement. La fraction de sol éclairé est le produit du segment f_3 par le taux de pénétration du rayonnement solaire G_{3S} ; la fraction de sol à l'ombre est $f_3(I - G_{3S})$ et la fraction de végétation est nulle. Dans le cas 4, la lumière dans les directions d'observation et de visée passe à travers la couche du couvert, et les trois types de surface - végétation, sol éclairé, sol à l'ombre - sont vus dans la géométrie d'observation. La fraction de couvert est $f_4(I - G_{4V})$; la fraction de sol éclairé est $f_4 G_{4V} G_{4S} Ht$; la fraction de sol à l'ombre est $f_4 G_{4V} G_{4S} (I - Ht)$. G_{4V} est la fraction de trous dans la direction d'observation, Ht est le facteur de hot spot qui dépend de l'architecture du couvert, et des positions respectives du Soleil et du capteur. Comme pour les autres cas, la taille et la position du hot spot dépendent également des directions d'éclairement et de visée.

En combinant les trois composantes dans chacun des quatre cas, les fractions de sol éclairé (C_{se}), de sol à l'ombre (C_{so}) et de végétation (C_v) peuvent être réécrites comme suit :

$$C_{se} = f_1 + f_2 G_{2V} + f_3 G_{3S} + f_4 G_{4V} G_{4S} Ht \quad (8.3)$$

$$C_{so} = f_3(I - G_{3S}) + f_4 G_{4V} G_{4S} (I - Ht) \quad (8.4)$$

$$C_v = f_2(I - G_{2V}) + f_4 (I - G_{4V}) \quad (8.5)$$

On remarquera que toutes les variables dépendent de la position x dans la direction perpendiculaire au rang, d'où la nécessité d'intégrer ces relations sur l'ensemble des positions. Si le couvert est opaque (pénétration nulle du rayonnement solaire direct et du rayonnement infrarouge thermique observé à travers la végétation), les trois fractions composantes se simplifient:

$$C_{se} = f_1 \quad (8.6)$$

$$C_{so} = f_3 \quad (8.7)$$

$$C_v = f_2 + f_4 \quad (8.8)$$

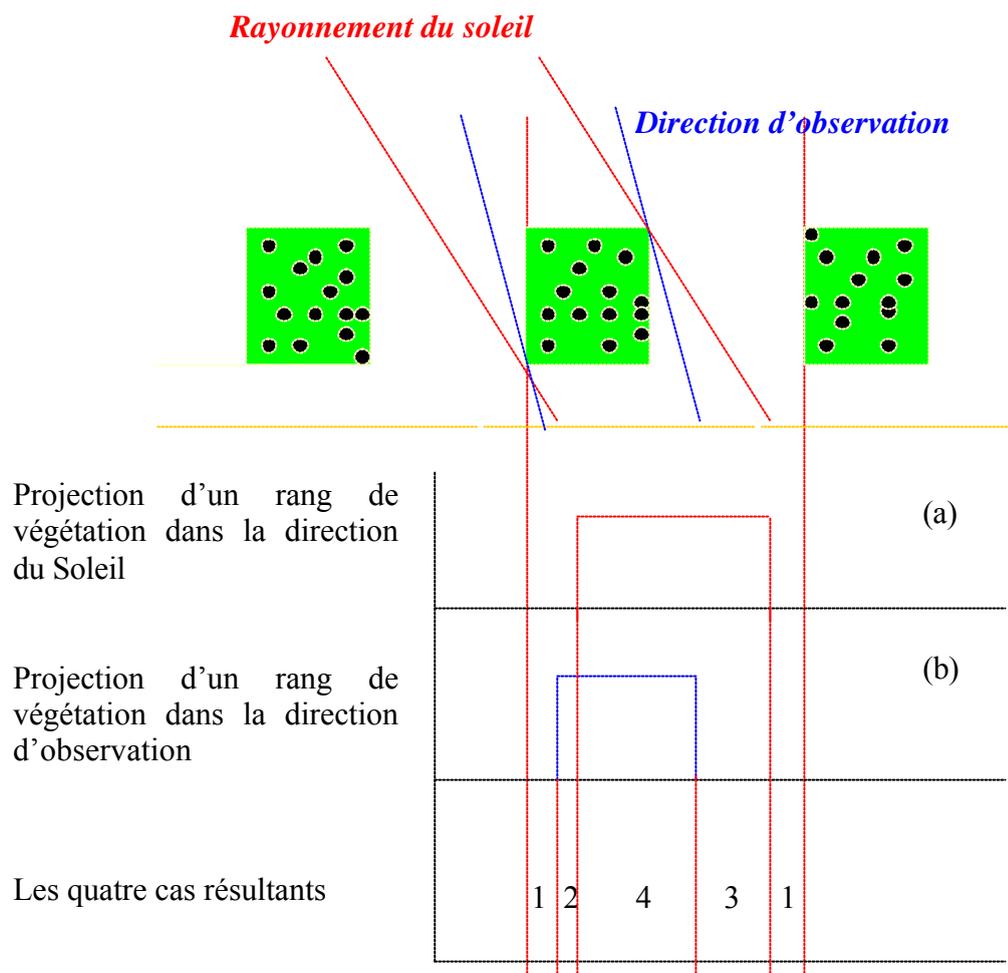


Figure 8.2 Localisation des quatre cas définis pour le calcul des fractions des trois composantes du couvert

Le calcul de chaque fraction dépend de la structure en rangs du couvert, et des géométries d'observation et d'éclairement. La même analyse peut être reprise pour d'autres conditions où le nombre de cas est inférieur à quatre ou bien lorsque la localisation des quatre cas est différente. Comme cela a été fait précédemment, les fractions peuvent être calculées sur la distance inter-rangs L . La trace au sol du coin inférieur gauche d'un rang est choisie comme point origine ($x=0$), le point extrémité étant la trace au sol du coin inférieur gauche du rang suivant ($x=L$).

8.2.3 Fraction de trous pour des couverts en rangs

La fraction de trous est la probabilité pour qu'un photon incident traverse directement le couvert végétal sans être intercepté par une feuille, une branche ou une tige. Sa valeur est liée à l'indice de surface foliaire LAI et au coefficient d'extinction $k(\mathbf{q})$ pour une couche homogène du couvert (Nilson 1971):

$$P(\mathbf{q}) = e^{-k(\mathbf{q})LAI} \quad (8.9)$$

où $k(\mathbf{q})$ dépend de la distribution de densité du couvert et de son architecture.

Li et al. (1988) ont étendu le modèle aux couverts discontinus en considérant seulement les trous comme une fonction de la longueur de chemin optique l :

$$P(l, \mathbf{q}) = e^{-IG(\mathbf{q})D_v} = e^{-\mathbf{t}(\mathbf{q})l} \quad (8.10)$$

où $G(\mathbf{q})$ est le facteur de projection de surface foliaire pour la direction \mathbf{q} ; D_v est la densité volumique de surface foliaire et s'exprime en m^{-1} ; $\mathbf{t}(\mathbf{q}) = G(\mathbf{q})D_v$ est la densité de feuillage projetée dans la direction \mathbf{q} , et correspond au coefficient d'atténuation.

Dans le modèle décrivant les probabilités de trous d'une culture en rangs, les variations azimutales de distribution de densité de feuillage produites par la structure en rangs, doivent être considérées. Soit le modèle :

$$P(\vec{\mathbf{t}}, \vec{l}) = e^{-\vec{\mathbf{t}} \cdot \vec{l}} \quad (8.11)$$

où le vecteur \vec{l} caractérise le chemin et $\vec{\mathbf{t}}$ est le paramètre d'atténuation. La flèche en haut des symboles indique qu'il s'agit des variables directionnelles. De la même manière que la définition de Nilson, $\vec{\mathbf{t}}$ dépend de la direction d'éclairement, de la densité du couvert et des architectures telles que la distribution spatiale des feuilles et la distribution d'inclinaison foliaire.

Dans le cas de couverts discontinus, la fonction de trous P dans la direction d'observation est affectée par la position du rayon incident. La longueur du chemin lumineux dépend de la position de ce dernier; le paramètre d'atténuation dépend de l'ensemble des caractéristiques optiques le long du chemin:

$$P(\vec{\mathbf{t}}, \vec{l}) = e^{-\int_0^s \vec{\mathbf{t}} \cdot d\vec{r}} \quad (8.12)$$

où

$$\vec{l} = \vec{l}(x, y) = \int_0^s d\vec{r} \quad (8.13)$$

$$\vec{\mathbf{t}} = \vec{\mathbf{t}}(x, y, z). \quad (8.14)$$

x et y sont les coordonnées de la trace au sol du rayonnement incident; z , la coordonnée verticale de la lumière passant à travers le couvert, est fonction de x et de y .

Nous calculons la longueur de chemin l' , projection de l sur le plan perpendiculaire à la direction des rangs (figure 8.3). La surface foliaire est supposée uniformément distribuée dans le couvert. Ainsi, le paramètre d'atténuation est traité comme une constante, et la fonction de trous s'exprime par:

$$P(x, \mathbf{q}, \mathbf{j}) = e^{-t l(x, \mathbf{q}, \mathbf{j})} \quad (8.15)$$

où x est la coordonnée dans la direction horizontale perpendiculaire au rang et \mathbf{q}, \mathbf{j} sont respectivement les angles zénithal et azimutal de la lumière incidente. Ainsi, le calcul de la fraction de trous revient au calcul d'une longueur de chemin lumineux.

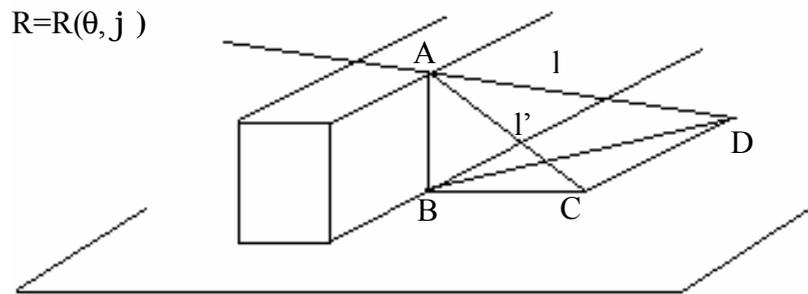


Figure 8.3 Schéma d'un rayon incident $R(\theta, \varphi)$ à un rang du couvert.

La figure 8.3 est une représentation schématique de la lumière incidente qui atteint un rang du couvert. Le point de contact A est situé au coin supérieur droit de la barre végétale. La lumière atteint le sol en D, ici entre deux rangs adjacents. Le point C est la projection de D sur le plan perpendiculaire à la direction du rang. Les angles zénithal et azimutal du faisceau incident AD sont \mathbf{q} et \mathbf{j} . La coordonnée x du point C est $(a+X)$, où a est la largeur de la barre et $X=BC$ peut être calculée à partir de $BAC=a$ et de la hauteur b de la barre par:

$$X = BC = b \operatorname{tg} a = b \operatorname{tg} \mathbf{q} \sin \mathbf{j} \quad (8.16)$$

Nous pouvons obtenir la longueur de chemin l pour n'importe quelle direction en fonction de sa projection l' sur le plan (ABC). La relation entre l et l' est:

$$l = \frac{l' \cos a}{\cos \mathbf{q}} \quad (8.17)$$

En combinant les formulations précédentes, la longueur l pour n'importe quelle position x peut être directement dérivée de X , \mathbf{q} et \mathbf{j} . En translatant le rayon incident R de gauche à droite sur la distance du rang, nous observons les changements de longueur de chemin.

Si $X \leq L - a$, la lumière ne peut pénétrer qu'un rang du couvert.

Si $X \geq a$

$$x \in [0, a], \quad l' = \frac{x}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.18)$$

$$x \in (a, X] \quad l' = \frac{a}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.19)$$

$$x \in (X, X + a] \quad l' = \frac{X + a - x}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.20)$$

$$x \in (X + a, L] \quad l' = 0 \quad (8.21)$$

Si $X < a$

$$x \in [0, X], \quad l' = \frac{x}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.22)$$

$$x \in (X, a] \quad l' = \frac{b}{\cos \mathbf{a}} \quad (8.23)$$

$$x \in (a, X + a] \quad l' = \frac{X + a - x}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.24)$$

$$x \in (X + a, L] \quad l' = 0 \quad (8.25)$$

Si $X > L - a$, la lumière peut pénétrer plusieurs rangs du couvert,

Si $X \in [kL - a, kL]$, $k=1, 2, 3, \dots$,

le bord du faisceau lumineux atteint en premier la végétation lorsqu'il arrive à la couche située à la hauteur H.

Si $kL - X \geq L - a$

$$x \in [0, a - (kL - X)], \quad l' = \frac{b}{\cos \mathbf{a}} - \frac{L - a}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.26)$$

$$x \in (a - (kL - X), a - (kL - X) + L - a] \quad (8.27)$$

$$l' = \frac{b}{\cos \mathbf{a}} - \frac{L - (kL - X) - x}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.28)$$

$$x \in (a - (kL - X) + L - a, a] \quad l' = \frac{b}{\cos \mathbf{a}} \quad (8.29)$$

$$x \in (a, L] \quad l' = \frac{b}{\cos \mathbf{a}} - \frac{x - a}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.30)$$

Si $kL - X < L - a$

$$x \in [0, a - (kL - X)], \quad l' = \frac{b}{\cos \mathbf{a}} - \frac{L - a}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.31)$$

$$x \in (a - (kL - X), a] \quad l' = \frac{b}{\cos \mathbf{a}} - \frac{L - (kL - X) - x}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.32)$$

$$x \in (a, L - (kL - X)] \quad l' = \frac{b}{\cos \mathbf{a}} - \frac{L - (kL - X) - a}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.33)$$

$$x \in (L - (kL - X), L] \quad l' = \frac{b}{\cos \mathbf{a}} - \frac{x - a}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.34)$$

Si $X \in [(k-1)L, kL-a)$, $k=1, 2, 3, \dots$,

le bord du faisceau lumineux atteint en premier la partie adjacente lorsqu'il arrive à la couche située à la hauteur H

Si $X - (k-1)L \geq a$

$$x \in [0, a], \quad l' = \frac{b}{\cos \mathbf{a}} - \frac{X - (k-1)L - x - a}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.35)$$

$$x \in (a, X - kL] \quad l' = \frac{b}{\cos \mathbf{a}} - \frac{X - (K-1)L - 2a}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.36)$$

$$x \in (X - kL, X - kL + a] \quad l' = \frac{b}{\cos \mathbf{a}} - \frac{L + x - 2a}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.37)$$

$$x \in (X - kL + a, L] \quad l' = \frac{b}{\cos \mathbf{a}} - \frac{L - X - kL - a}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.38)$$

Si $X - (k-1)L < a$

$$x \in [0, X - (k-1)L], \quad l' = \frac{b}{\cos \mathbf{a}} - \frac{X - (k-1)L - x - a}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.39)$$

$$x \in (X - (k-1)L, a] \quad l' = \frac{b}{\cos \mathbf{a}} - \frac{L - a}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.40)$$

$$x \in (a, X - (k-1)L + a] \quad l' = \frac{b}{\cos \mathbf{a}} - \frac{L + x - 2a}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.41)$$

$$x \in (X - (k-1)L + a, L] \quad l' = \frac{b}{\cos \mathbf{a}} - \frac{X - kL - a}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.42)$$

Pour éliminer les parties entre les rangs, l' est modifié comme suit :

$$l' = l' - \frac{(L-a)(k-1)}{\sin \mathbf{a}} \quad (8.43)$$

8.2.4 Calcul du facteur de hot spot Ht

Le modèle exponentiel de Kuusk (1985) a été utilisé dans notre étude pour décrire l'effet de hot spot pour une culture en rangs. La fonction exponentielle de hot spot de Kuusk pour les couverts horizontalement homogènes est (1.22):

$$Ht = \exp\left(tl_s \frac{1 - \exp(-kl_{sv})}{kl_{sv}} \sqrt{\frac{l_v}{l_s}}\right)$$

où l_s et l_v sont respectivement les longueurs de chemin à l'intérieur du couvert pour le rayonnement dans la direction anti-spéculaire et dans la direction d'observation; $k = \frac{1}{s}$,

où s est la dimension linéaire caractéristique des éléments foliaires; l_{sv} est la valeur déduite les longueurs de chemin dans les directions l_s et l_v , donnée par l'équation (1.23):

$$l_{sv} = |\vec{l}_v - \vec{l}_s| = \sqrt{l_v^2 + l_s^2 - 2l_v l_s \cos \mathbf{x}}$$

où $\cos \mathbf{x}$ est défini par l'équation (1.24):

$$\cos \mathbf{x} = \cos \mathbf{q}_s \cos \mathbf{q}_v + \sin \mathbf{q}_s \sin \mathbf{q}_v \cos(\mathbf{j}_v - \mathbf{j}_s)$$

où $\mathbf{q}_s, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v, \mathbf{j}_s$ sont respectivement les angles zénithaux et azimutaux du Soleil et de l'observation.

Dans le modèle de Kuusk, la valeur du hot spot dépend de la longueur de chemin de la lumière incidente, multipliée par un paramètre effectif calculé à partir de la dimension des feuilles et de la corrélation entre les longueurs de chemin dans les directions d'éclairage et d'observation. Les feuilles sont orientées horizontalement et supposées de dimensions beaucoup plus petites que la longueur de chemin dans le couvert.

8.3 Prédiction du modèle

Dans le modèle GORT, un rang du couvert est représenté par une barre dont les propriétés optiques sont constantes (paramètre d'atténuation constant). Les surfaces sont classées en trois composantes dont les proportions sont fonction des paramètres décrivant la structure du couvert et les géométries d'éclairage et d'observation. Chaque composante a une TB unique. Les paramètres d'entrée sont classés en quatre groupes:

- 1) directions d'éclairage et d'observation;
- 2) paramètres de la géométrie du couvert: distance inter-rangs L ; hauteur H et largeur a de rang, hauteur de base des tiges h ; paramètre k de la dimension des éléments foliaires, paramètre d'atténuation t ;
- 3) température de brillance de chaque composante: T_{Se}, T_{So} et T_V .

8.3.1 Longueur de chemin et fonction de hot spot

La figure 8.4 montre les variations de la longueur de chemin optique en fonction de la position au sol de l'intersection du rayon et le plan perpendiculaire aux rangs x pour des différentes positions d'observation. L'azimut de la direction du rang est de $0^\circ/180^\circ$ (direction N-S), la hauteur de barre b $1.2L$, la largeur de barre $0.6L$, la longueur de chemin est également exprimée en unité de L .

La figure 8.4a montre les résultats pour 4 angles zénithaux d'observation avec un azimut constant de 30° ; La courbe rouge correspond à l'observation au nadir. La valeur de la longueur de chemin le long de la direction verticale est d'abord égale à $1.2L$, qui est la hauteur du barre b . Ensuite, le faisceau atteint directement le sol sans traverser le couvert (abscisse supérieure à $0.6L$, longueur de chemin nulle). Pour un angle zénithal d'observation de 20° , le faisceau ne traverse qu'un seul rang, la valeur de la longueur de chemin augmente de 0 à $1.3L$, reste à cette valeur et diminue à 0. Une valeur de la

longueur de chemin comprise entre 0 et $1.3L$ correspond à une situation où le faisceau traverse au moins l'un des deux parois verticales délimitant le rang. La fraction de sol visible diminue rapidement avec l'augmentation de l'angle zénithal d'observation. Le sol n'est pas totalement masqué par le couvert. Le faisceau traverse au moins un rang et la valeur minimale de la longueur de chemin est supérieure à zéro. Par exemple, la valeur minimale de la courbe correspondant à une observation pour $q_v = 80^\circ$ est $3.7L$. L'ensemble du couvert est observé (le sol n'est pas visible) et au moins trois rangs sont traversés.

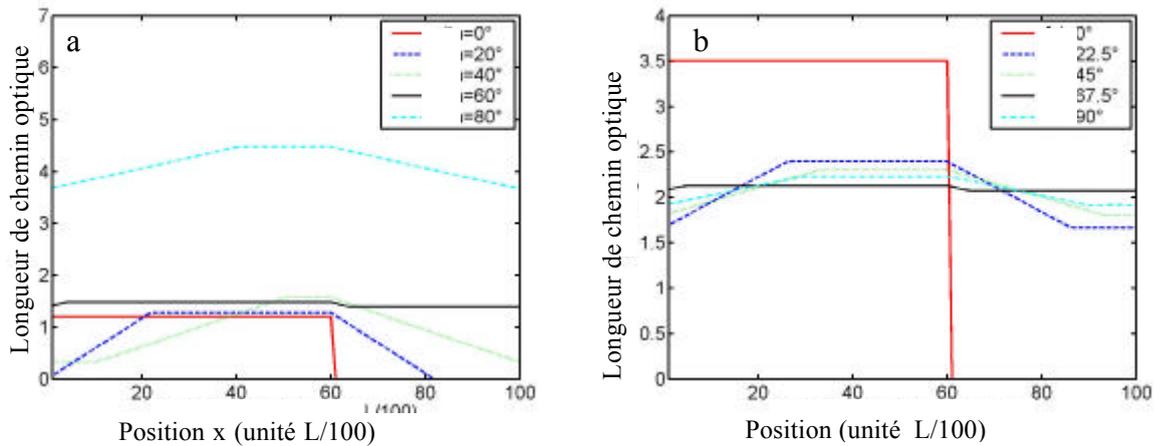


Figure 8.4 Variations de la longueur de chemin selon la position au sol de l'intersection du rayon et le plan perpendiculaire aux rangs x et la direction d'observation. Sur le graphe de gauche, les observations sont faites à différents angles zénithaux avec un azimut constant de 30° ; sur le graphe de droite, les observations sont faites à différents angles azimutaux avec un angle zénithal constant de 70° .

La figure 8.4b montre la variation de la longueur de chemin avec l'azimut de la direction d'observation, pour un angle zénithal constant de 70° . La courbe rouge qui affiche la valeur maximale correspond à l'observation le long de la distance inter-rangs, pour un azimut nul. Le sol peut être vu directement pour une longueur de chemin nul, alors que le faisceau passant à travers la barre a une longueur de chemin de $3.5L$. Pour les autres courbes de la figure, les longueurs de chemin varient tout en restant proches de 2.

Soit la longueur moyenne de chemin \bar{P} :

$$\bar{P} = \frac{\int_0^L p(x) dx}{L} \quad (8.44)$$

où $p(x)$ est la longueur de chemin relatif à la position x .

Les valeurs moyennes des longueurs de chemin de la figure 8.4b sont toutes égales à 2.1. Ceci signifie qu'elles ne dépendent pas de l'azimut d'observation, mais seulement de l'angle zénithal.

La figure 8.5 montre la variation angulaire de la longueur moyenne de chemin \bar{P} . La géométrie de la culture en rangs est la même que celle décrite à la figure 8.4. Comme mentionné précédemment, la longueur moyenne de chemin reste constante pour différents angles azimutaux de visée, elle augmente selon l'angle zénithal d'observation.

La fonction de hot spot utilisé ici se base sur l'hypothèse que la cible est une couche homogène dont la densité de biomasse est bien distribuée. Ainsi, le résultat de la simulation ne dépend que de la géométrie Soleil-cible-caméra, des longueurs de chemin des rayons incidents et de visée et des propriétés d'atténuation du couvert.

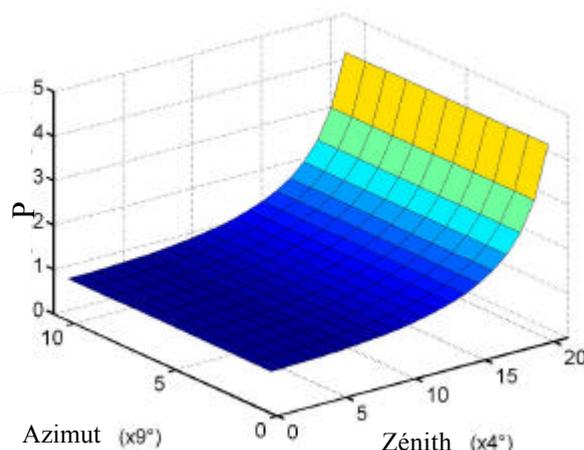


Figure 8.5 Variation en fonction des angles zénithaux et azimutaux de la longueur moyenne de chemin \bar{P} .

La figure 8.6a présente l'influence de la taille des feuilles sur la forme du hot spot. Le paramètre k correspondant à l'inverse de la taille des feuilles. Ainsi, une valeur de k égale à 3 m^{-1} correspond une taille de feuilles de 0.33 m. Les résultats montrent que de fortes valeurs de k conduisent à des pics de hot spot plus étroits. Une distribution aléatoire de petites feuilles produit un grand nombre de petits trous. La distribution statistique de la taille des trous a en fait une valeur moyenne plus petite, ce qui mène à des pics de hot spot plus étroits (Chen et al. 1997).

La figure 8.6b est une représentation polaire de la distribution tridimensionnelle du hot spot. La position solaire relative (q et j) est de 30° en zénith et 30° en azimut, l'épaisseur du couvert est de 1.1 m, la valeur du paramètre d'atténuation est 1.5, la taille des feuilles est 0.2 m. Cette courbe sera plus amplement discutée dans la partie suivante.

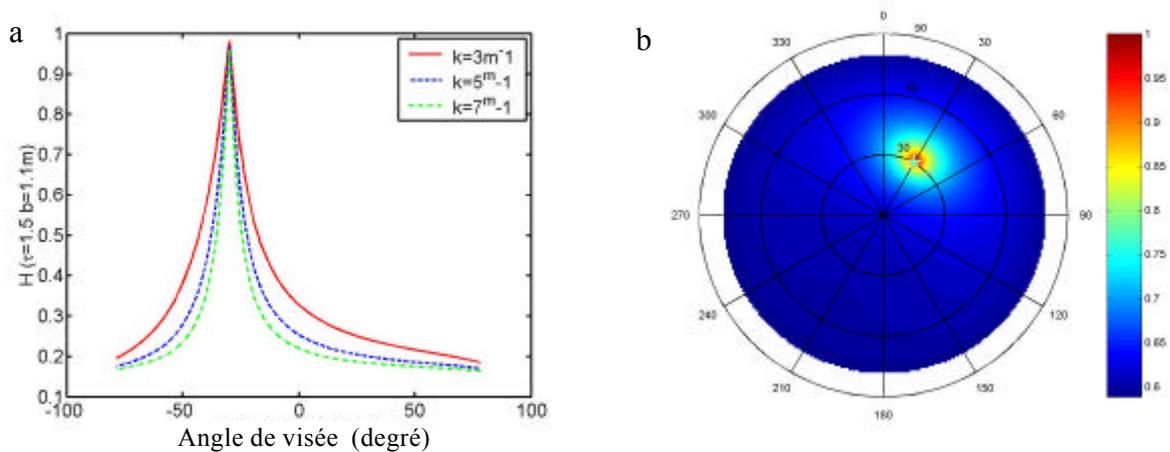


figure 8.6 Variation du hot spot avec le paramètre d'atténuation, la taille des feuilles et l'épaisseur du couvert végétal.

8.3.2 Variation directionnelle de la distribution des trois composantes

Le tableau 8.1 donne les valeurs des paramètres d'entrée utilisés dans la simulation du modèle.

Tableau 8.1 Valeurs des paramètres d'entrée du modèle GORT.

q_s (°)	j_s (°)	T_{se} (°C)	T_{so} (°C)	T_v (°C)	H (m)	h (m)	A (m)	L (m)	k (m ⁻¹)	t
30	30	45	33	27	1.4	0.3	0.6	1.0	5	1.5

La figure 8.7 montre la distribution pondérée des trois composantes du couvert de maïs: sol éclairé (a, b), sol à l'ombre (c, d) et végétation (e, f). Les diagrammes de gauche sont des représentations polaires tridimensionnelles; les figures de droite sont des profils dans le plan principal solaire (traits pleins) et le plan vertical normal au plan principal solaire (tirets).

Les figures mettent clairement en évidence les effets de hot spot thermique et de la direction des rangs. La fraction de sol éclairé est maximale dans la direction anti-spéculaire. D'autre part, c'est selon la direction des rangs que l'on observe la plus grande fraction de sol éclairé, même pour des visées fortement obliques. Pour les autres directions azimutales, la fraction de sol éclairé est nulle pour de forts angles zénithaux de visée. Au contraire, la valeur du pic pour la fraction de sol à l'ombre apparaît dans la direction de diffusion avant. Dans la direction de diffusion arrière, sa valeur est nulle car tout le sol visible dans cette direction est éclairé. De même que pour la distribution de

sol éclairé, la fraction de sol à l'ombre est élevée le long de la direction des rangs, même pour de forts angles zénithaux d'observation, et est nulle dans d'autres directions. L'asymétrie de la distribution directionnelle de la fraction de sol éclairé que l'on observe habituellement pour un couvert homogène (cas d'une forêt par exemple), n'apparaît pas ici à cause de la structure en rangs.

Cet effet peut également être observé pour la fraction de végétation. Les faibles valeurs de la fraction de végétation se trouvent le long de la direction des rangs. La valeur minimale apparaît au nadir : cette géométrie coïncide avec la plus grande fraction de trous. Avec l'augmentation de l'angle zénithal d'observation, la fraction de végétation augmente régulièrement pour tous les azimuts, sauf dans la direction du rang.

La figure 8.8a montre le diagramme polaire de la variation de TBD du couvert. La figure 8.8b présente les profils de TBD dans le plan principal solaire (traits pleins) et le plan vertical perpendiculaire (tirets).

Avec l'hypothèse $T_{se} > T_{so} > T_v$, le hot spot thermique se situe dans la direction anti-spéculaire pour lesquels seuls le sol éclairé et la végétation sont observables. La température diminue lentement à partir de cette configuration. De même que pour la distribution directionnelle de la fraction de sol éclairé, une température directionnelle élevée est obtenue le long de la direction des rangs même pour des observations fortement obliques, puis la température composite diminue jusqu'à la température de végétation pour de forts angles zénithaux, lorsque la proportion de trous est nulle. Dans la figure 8.8b correspondant aux profils, nous observons que la valeur de TBD est maximale dans le plan principal, selon la direction anti-spéculaire (droite verte).

La bande chaude sur le diagramme polaire a une forme de noyau en raison de la structure géométrique en rangs de la cible. La température pour une visée au nadir est très élevée; elle n'est inférieure à la température dans la direction anti-spéculaire que d'environ 1.5°C. La distribution directionnelle de la température est affectée par la direction du Soleil et la structure en rangs.

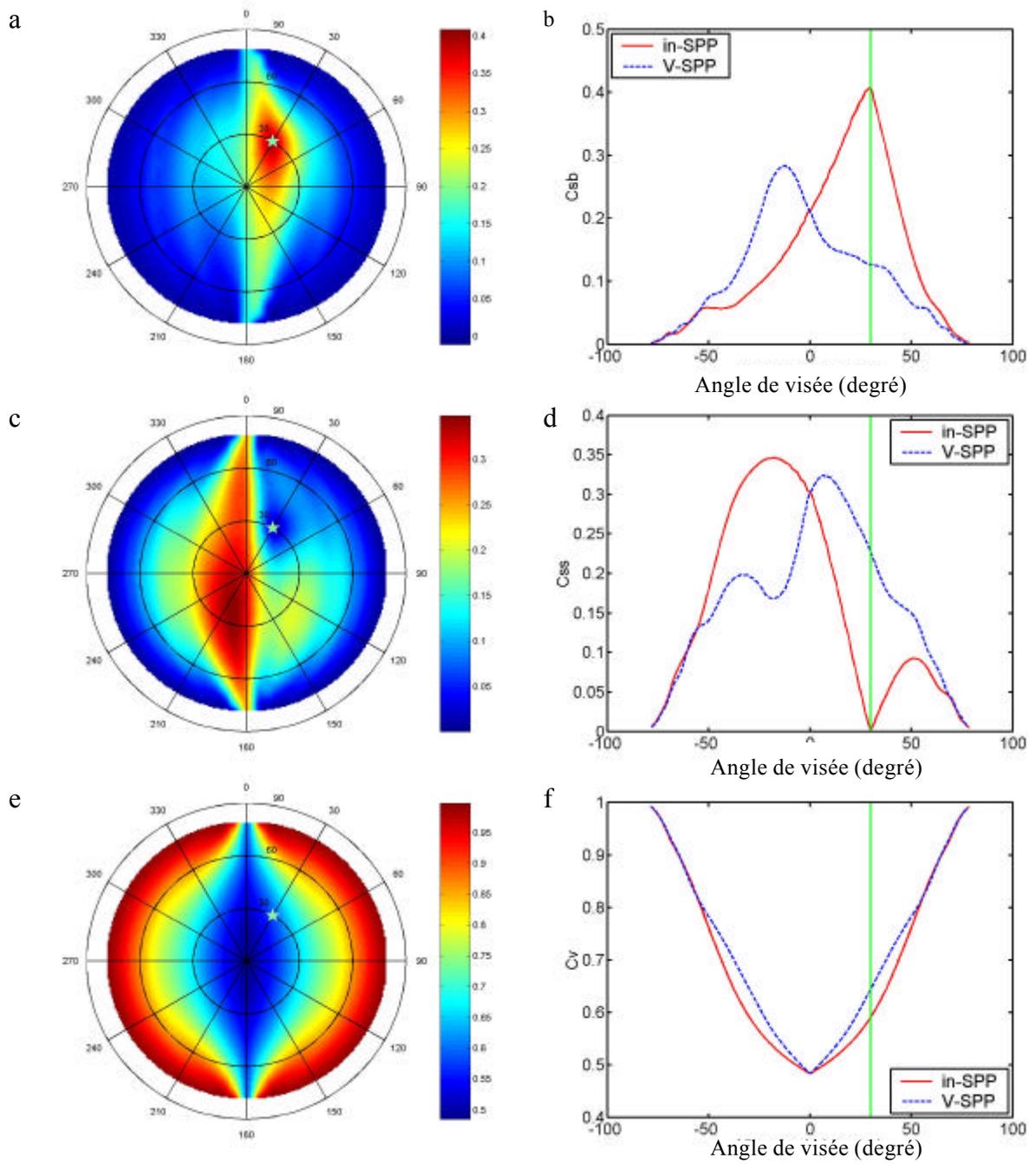


figure 8.7 Distributions pondérées des fractions des trois composantes du couvert: sol éclairé (a, b), sol à l'ombre (c, d) et végétation (e, f).

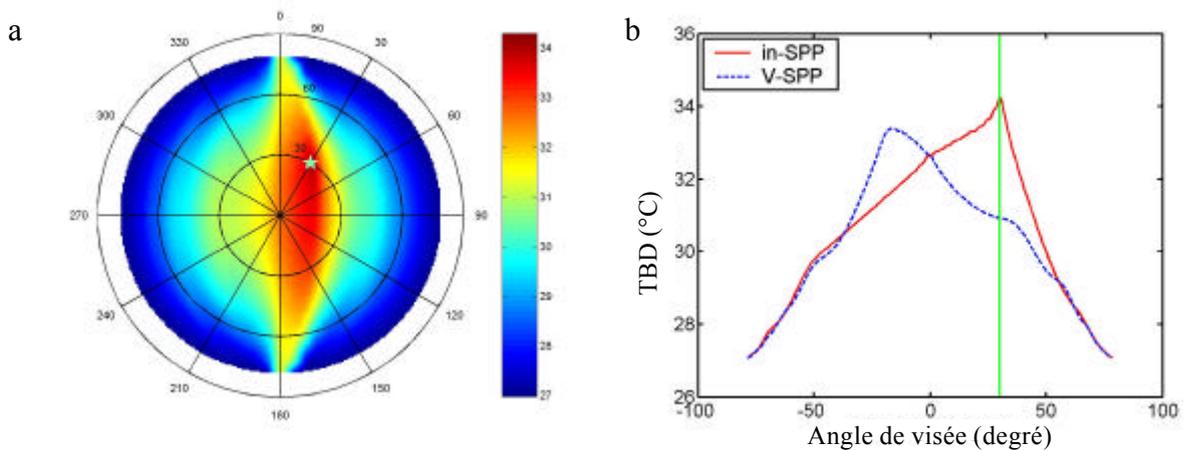


figure 8.8 Diagramme polaire (a) et profils (b) de la variation directionnelle de la TBD de la parcelle.

8.3.3 Analyse de sensibilité des paramètres

D'après les prévisions du modèle, les distributions des trois composantes du couvert et la TBD sont dominées par la structure en rangs du maïs. La figure 8.9 illustre l'effet de la largeur normalisée sur la distribution de la TB. Les rapports entre les largeurs normalisées a et la distance inter-rangs L sont respectivement de 0.1, 0.4, 0.7 et 0.95 (figure 8.9a, b, c, d); les valeurs des autres paramètres sont identiques à celles du tableau 8.1. Les figures de gauche correspondent aux diagrammes polaires de TBD, celles de droite correspondent aux profils dans les plans principal solaire (traits pleins) et le plan vertical perpendiculaire (tirets).

Pour de faibles valeurs de a (figures 8.9a et 8.9b), on peut trouver une région chaude plus large ainsi qu'une plus forte asymétrie vis-à-vis de la direction des rangs. Les valeurs de TBD dans cette direction et dans la direction anti-spéculaire sont proches. Pour de faibles largeurs de rang, le nombre et la taille des trous sont plus élevés; ainsi le modèle prédit un pic de hot spot plus large et une valeur moyenne de TBD plus importante quelque soit la géométrie d'observation. En même temps, l'augmentation de la fraction de sol se traduit par un accroissement de la proportion de sol éclairé. Des observations séparées d'une faible différence angulaire correspondent à des valeurs de TBD proches; l'effet de rang est limité. Au contraire, avec une forte valeur de largeur a ou pour des couverts très développés (Figures 8.9g et 8.9h), la région chaude se limite à une petite tache autour de la direction anti-spéculaire et le diagramme polaire est asymétrique autour du plan principal: l'effet de structure de rang disparaît. Dans cette condition, la TBD est beaucoup plus élevée dans la direction du hot spot que dans n'importe quelle autre direction, ce qui montre qu'une telle couche végétale homogène peut avoir un effet de hot spot plus grand. Pour un couvert en rangs, l'effet de rang est susceptible de masquer l'effet de hot spot. Nous observons une plus faible amplitude et une plus faible largeur de hot spot qu'un couvert homogène.

La figure 8.10 montre l'effet du paramètre d'atténuation du couvert sur la distribution de la TB. Les coefficients d'extinction sont 0.2 (a, b), 3 (c, d), 10 (e, f) respectivement; les valeurs des autres paramètres sont données dans le tableau 8.1.

De faibles valeurs du paramètre d'atténuation conduisent à un hot spot large et de faible amplitude. Les températures de cette région - incluant les observations autour de la direction anti-spéculaire - ont des valeurs semblables. Elles diminuent rapidement pour des visées fortement obliques. Un faible paramètre d'atténuation laisse une plus grande quantité de lumière passer à travers le couvert. Le modèle produit un pic de hot spot plus large et plus important en amplitude quelque soit la géométrie d'observation. Enfin, pour un faible paramètre d'atténuation, l'augmentation de la fraction de sol accompagne celle de la fraction de sol éclairé et l'effet de rang est quasi inexistant.

Si la valeur du paramètre d'atténuation est très grande, le couvert devient presque opaque (figure 8.10e et 8.10f). L'effet de hot spot disparaît et la forme en bande de la région chaude résultant de la structure en rangs devient prépondérante. Des valeurs élevées du paramètre d'atténuation diminuent fortement la taille et la quantité de trous; la proportion de sol sous-jacent visible diminue. Bien que le pic de hot spot soit étroit, l'influence de l'effet de hot spot est affaiblie, la distribution reflète l'influence de la structure en rangs.

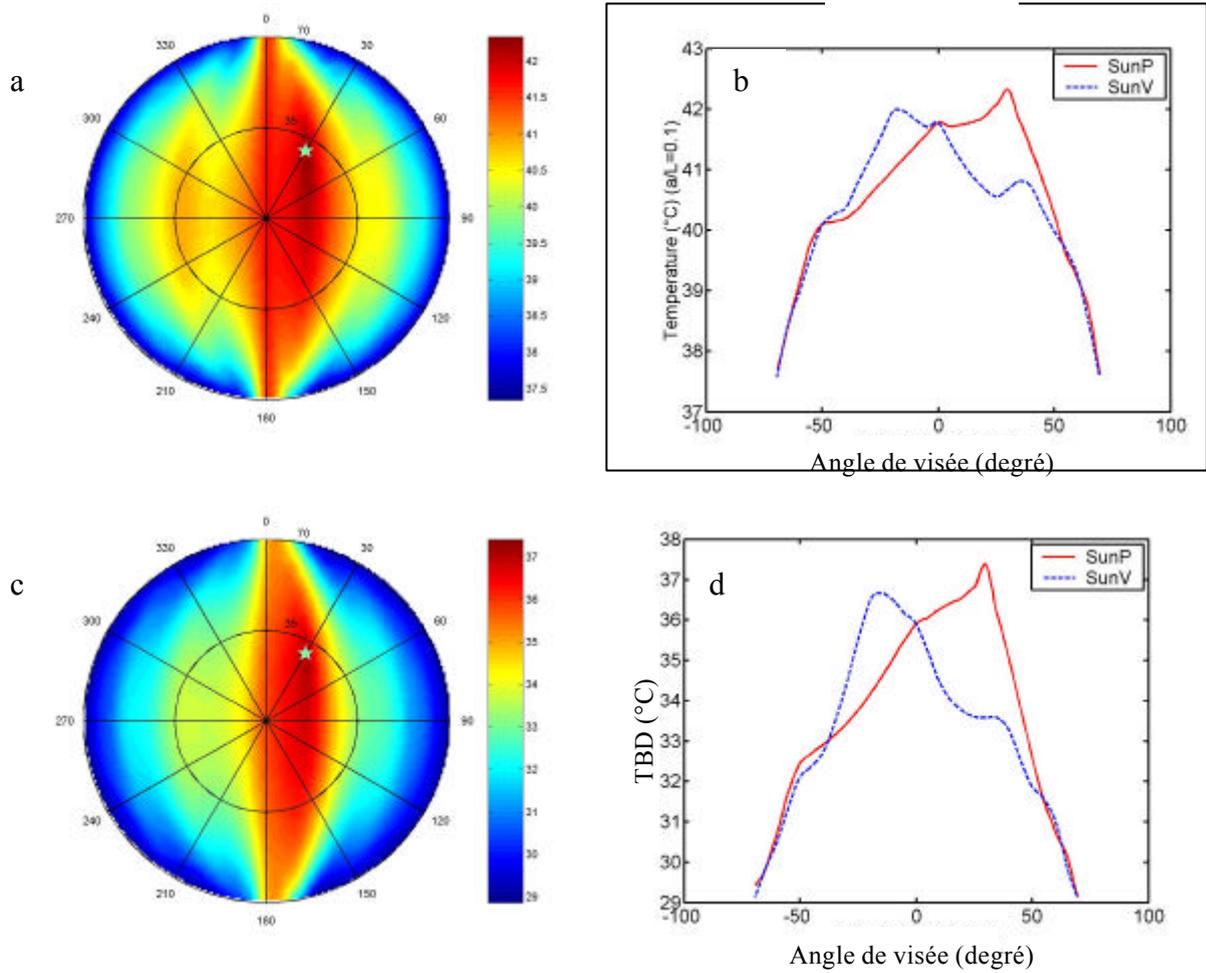


Figure 8.9 Effet de la largeur a sur la distribution de la TBD. Les rapports entre la largeur a et la distance inter-rangs L sont respectivement 0.1 (a, b), 0.4 (c, d).

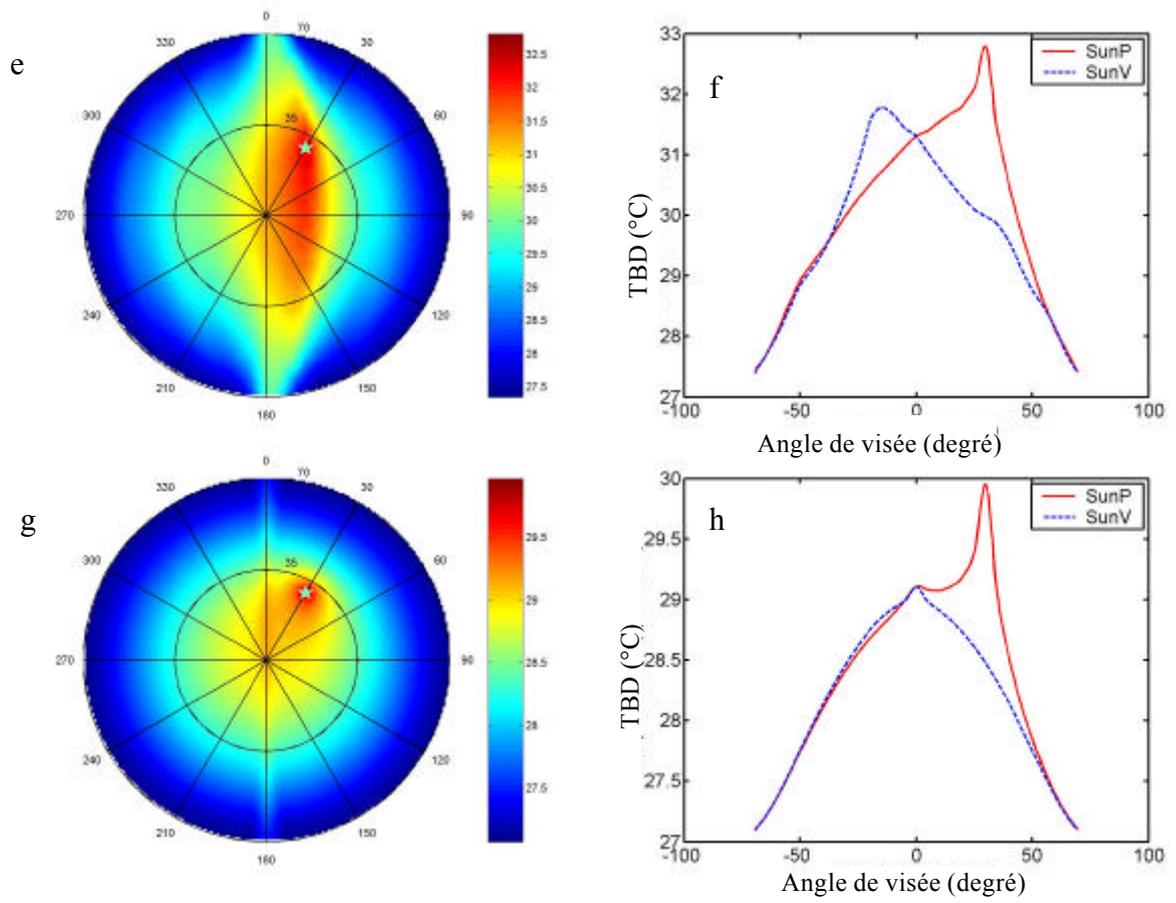


Figure 8.9 (suite) Effet de la largeur a sur la distribution de la TB. Les rapports entre la largeur a et la distance inter-rangs L sont respectivement égaux à 0.7 (e, f), 0.95 (g, h)

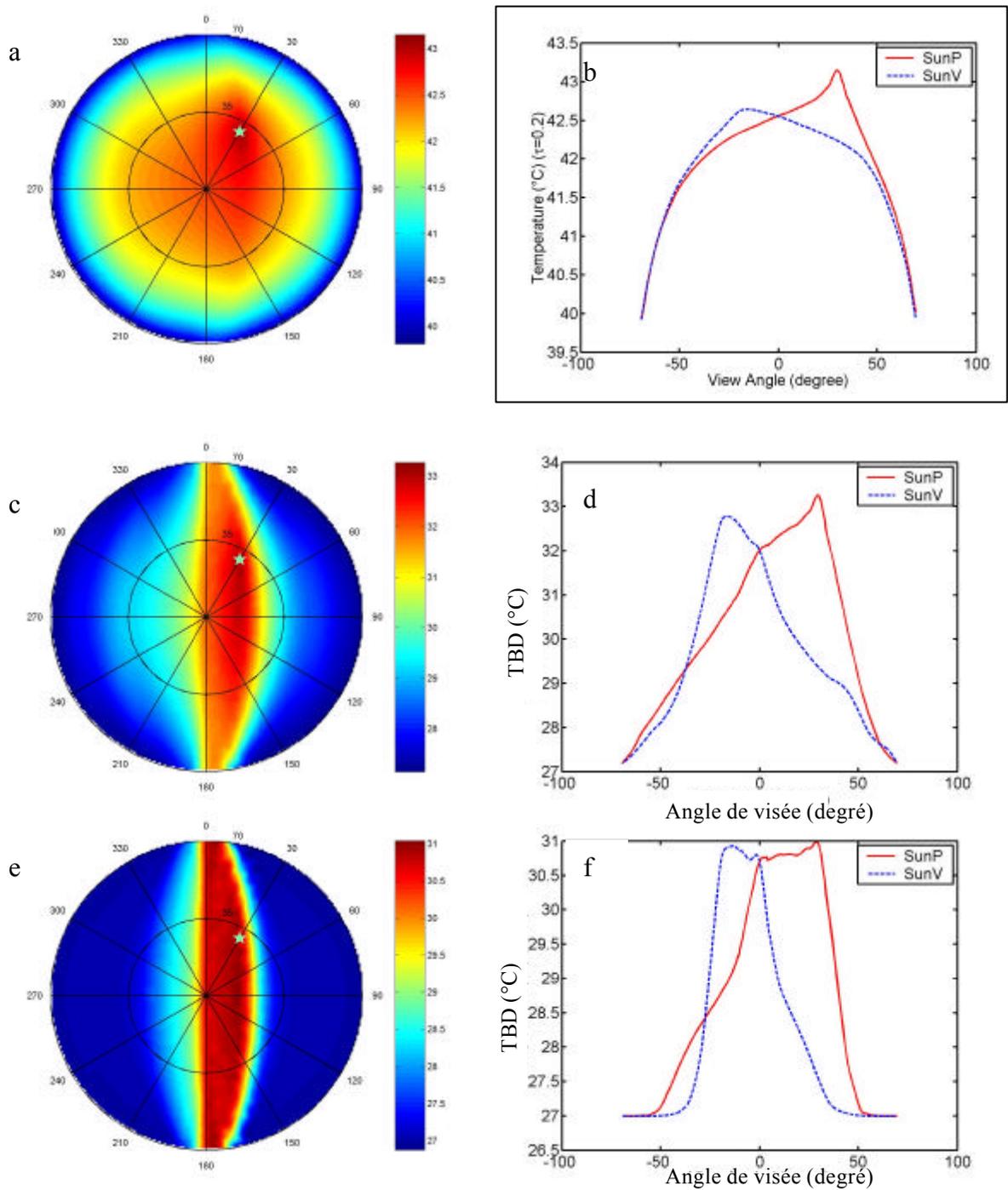


figure 8.10 Effet du coefficients d'atténuation du couvert sur la distribution de la TBD. Les coefficients d'atténuation sont respectivement égaux à 0.2 (a, b), 3 (c, d), 10 (e, f).

La figure 8.11 décrit la distribution des proportions des trois composantes et de la TBD pour des couverts opaques. La barre est opaque pour la simulation (il n'y a pas de trou) et les valeurs prises par les autres paramètres sont données dans le tableau 8.1.

Quand la barre végétale devient opaque, l'effet de rang domine, l'effet de hot spot devient relativement faible. Les structures dues à l'effet de rang des trois composantes de la scène et de la TBD sont plus étroites. La forme de la région chaude est néanmoins conservée. Dans les directions du nadir et anti-spéculaire, la TB composite est plus élevée que pour tout autre direction d'observation et elle atteint sa valeur maximale dans la direction anti-spéculaire. La figure 8.11b montre que la valeur maximale apparaît dans la direction anti-spéculaire, puis diminue lentement quand l'observation se rapproche du nadir. Ce phénomène est dû à la géostructure du couvert pour laquelle la hauteur de la base des tiges joue un rôle important.

Si la barre végétale n'est pas directement au contact du sol, une partie des surfaces sous-jacentes peuvent être éclairées et observées (bien que la barre soit opaque). Si nous observons le couvert éclairé par le Soleil, trois types de surfaces peuvent être vues. Elles le sont effectivement (le sol éclairé sous-jacent à la barre inclus) si la direction d'observation est proche de la direction antispéculaire. Pour une direction de visée proche du nadir, le sol éclairé sous la barre ne peut être observé. C'est la différence entre ces deux directions d'observation.

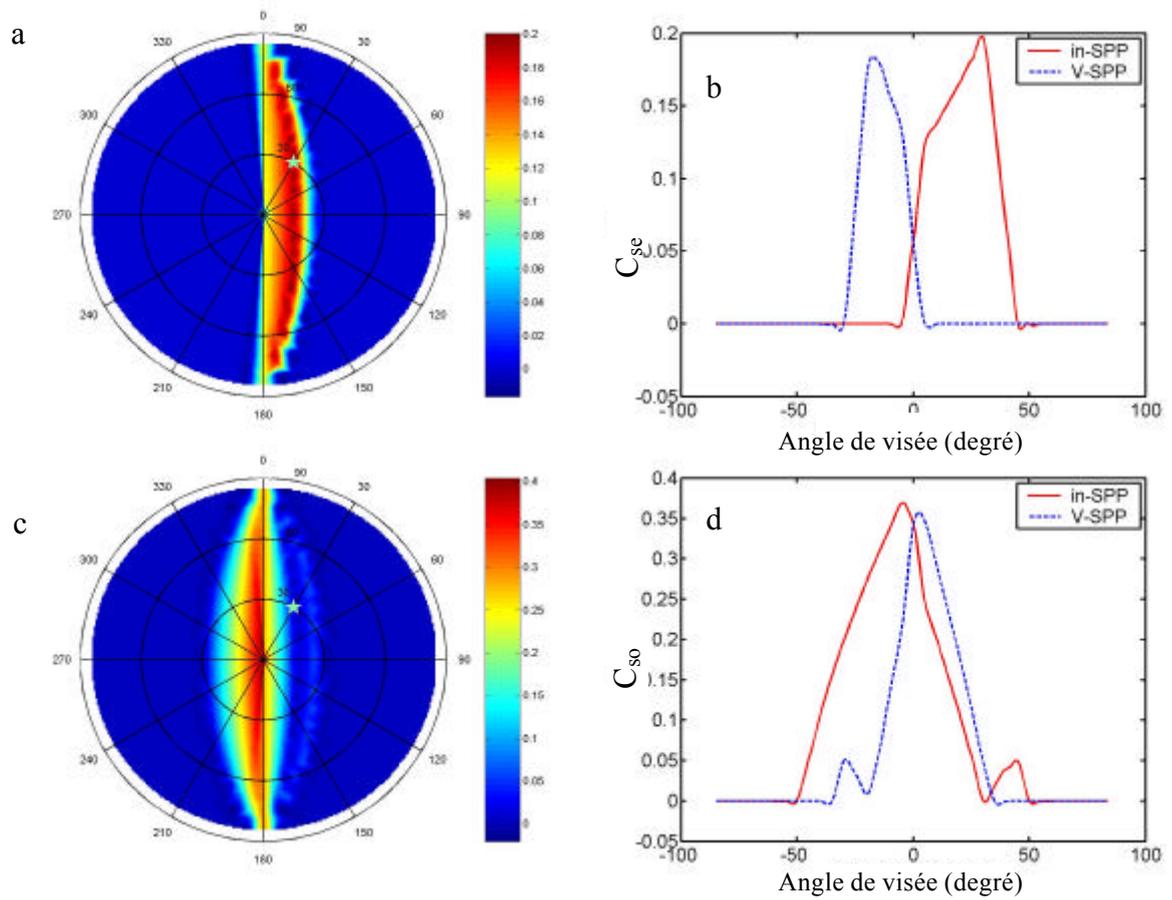


Figure 8.11 Distribution de la proportion des trois composantes du couvert et de la TBD en l'absence de trou: sol éclairé (a, b), sol à l'ombre (c, d)

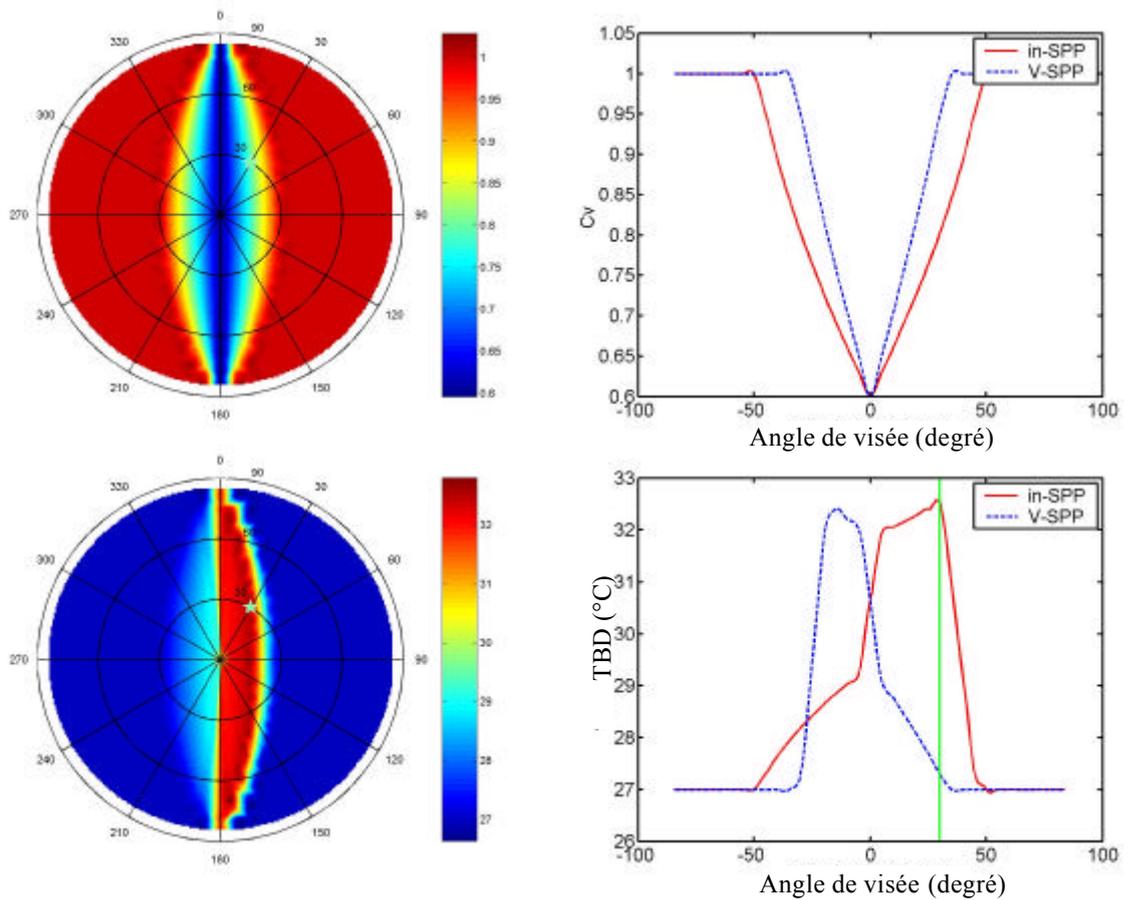


Figure 8.11 (suite) Distribution de la proportion des trois composantes du couvert et de la TBD en l'absence de trou: végétation (e, f), TBD (g, h).

La figure 8.12 décrit l'influence de la hauteur h sur la distribution directionnelle de la TB. Lorsque la barre touche le sol ($h=0$), une visée au nadir permet d'observer l'ensemble du sol éclairé et à l'ombre: la fraction de végétation est alors minimale, et la température composite est maximale (figures 8.12a et 8.12b). Quand la hauteur h n'est pas nulle, seule une observation dans la direction anti-spéculaire permet d'observer l'ensemble du sol éclairé. Si la valeur de h est grande, elle conduit à une TBD maximale dans la direction anti-spéculaire. Si elle est petite en revanche, ce n'est pas toujours le cas et on peut trouver la TBD maximale au nadir (figures 8.12d et 8.12e), ceci en raison de la proportion de végétation plus grande dans la direction anti-spéculaire qu'au nadir. La TB de la végétation étant la plus basse des trois composantes du couvert, la TBD peut donc ne pas atteindre un maximum dans la direction anti-spéculaire. Si la hauteur h est assez grande (figures 8.12e et 8.12f) la valeur maximale de la TBD apparaît dans la direction anti-spéculaire bien que le sol (éclairé ou à l'ombre) soit en partie masqué par la végétation.

La figure 8.13 montre l'influence des températures des composantes sur la TBD du couvert. Les températures de brillance du sol éclairé, du sol à l'ombre et de la végétation sont respectivement de 30°C, 25°C et 33°C. Les valeurs des autres paramètres sont données dans le tableau 8.1.

A l'inverse des diagrammes polaires et des profils présentés précédemment pour lesquels les TB des trois composantes étaient respectivement de 45.°C, 33.°C et 27.°C, la température minimale est obtenue au nadir. La distribution de TBD a cette fois l'allure de celle de la fraction de végétation, à l'exception de la région proche de la direction anti-spéculaire. Les changements importants de forme des profils (passage de forme concave à convexe) reflètent le fait que la température des composantes domine également la distribution de la TBD du couvert. En condition naturelle, les trois températures varient avec la date et l'heure. Ainsi, la forme de la distribution directionnelle peut être très diversifiée selon les conditions in situ.

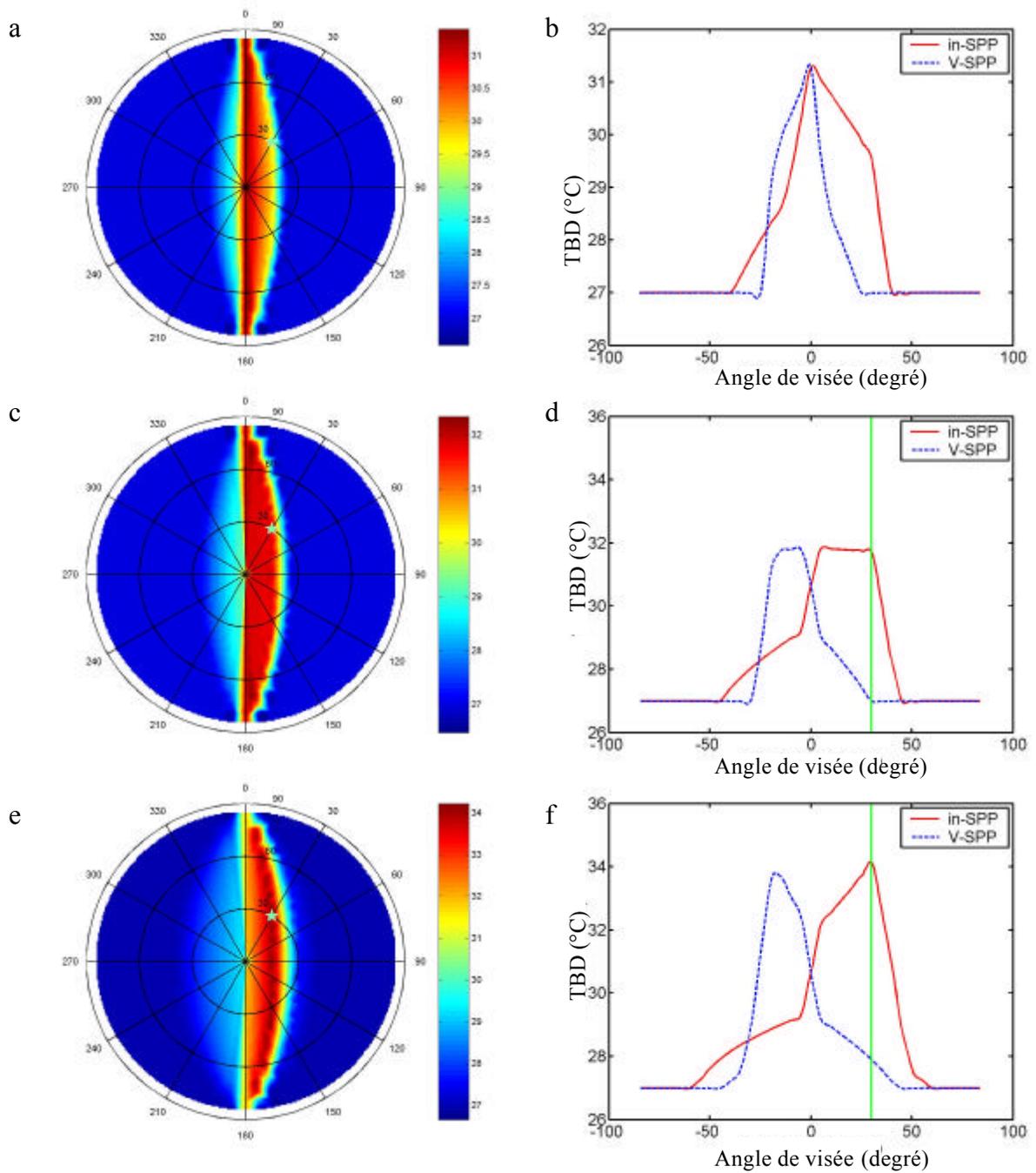


figure 8.12 Influence de la hauteur h de la base des tiges sur la distribution de la TBD. Les rapports entre h et la distance inter-rangs L sont respectivement 0 (a, b), 0.2 (c, d), 0.5 (e, f).

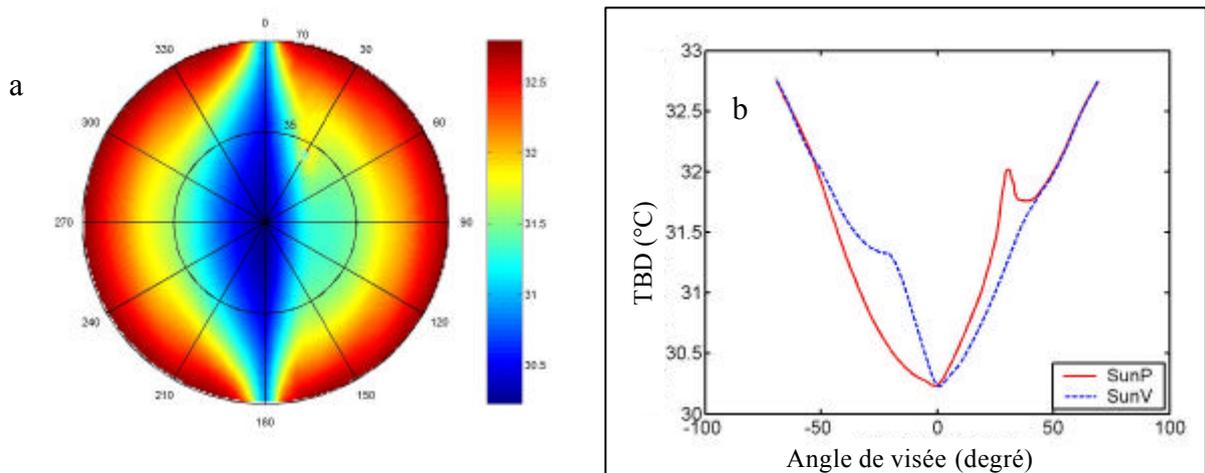


Figure 8.13 Influence de la TB des composantes sur la distribution directionnelle de la TBD du couvert.

8.4 Conclusion

Un modèle hybride simple alliant l'optique géométrique et le transfert radiatif (GORT) a été développé pour étudier l'effet de la structure en rangs des cultures de maïs sur les distributions directionnelles de la TB. Moyennant quelques hypothèses sur l'architecture, les propriétés optiques et la distribution des températures dans le couvert, un rang de maïs a été traité comme un milieu régulièrement distribué, de sorte que la structure discontinue et les trous du couvert puissent être décrits respectivement par l'optique géométrique et la théorie du transfert radiatif. Ainsi, la TB directionnelle a pu être calculée à partir de la prescription des trois composantes du couvert et par intégration, en place de l'analyse probabiliste utilisée par d'autres modèles.

Le modèle révèle l'effet combiné de la structure en rangs et de la géométrie d'observation sur les distributions multi-directionnelles de la TB du couvert. Le hot spot et la région chaude autour de ce dernier sont mis en évidence par les simulations dans la direction anti-spéculaire. En représentation polaire, la région chaude prend une forme de noyau ayant pour axe la direction du rang. Elle résulte de la TB plus élevée de la composante sol éclairé (dans le cas où la TB de la végétation est supérieure à celle du sol éclairé, cette région devient au contraire froide). A l'issue des calculs, ces deux phénomènes ont pu être expliqués par les TB des trois composantes et une distribution de trous entre et à l'intérieur des rangs. La forme de la distribution de TBD peut être employée comme critère pour évaluer l'effet de hot spot: thermique à partir de la région chaude apparaissant autour de la direction anti-spéculaire.

Dans la prochaine étape, nous validerons le modèle avec des mesures multi-angulaires effectuées à différentes périodes de la croissance du maïs.

Chapitre 9

Validation du modèle GORT

9.1 Introduction

Le modèle GORT décrit au Chapitre 8 a été développé afin de décrire physiquement la TBD d'un couvert de maïs en rangs ainsi que ses variations temporelles. Nous avons pu mettre en évidence au moyen de plusieurs simulations, les relations entre la TBD et divers facteurs caractérisant essentiellement la structure du couvert et la géométrie d'observation.

Les objectifs de ce chapitre sont de :

- (1) déterminer les valeurs des variables d'entrée du modèle, y compris celles décrivant la structure géométrique du couvert, la TB des composantes et la géométrie du système Soleil-cible-caméra;
- (2) tester l'hypothèse principale selon laquelle la structure en rangs du couvert et les propriétés optiques de ce couvert de maïs déterminent la TBD;
- (3) étudier les variations de la TBD du couvert de maïs à des heures et des dates différentes, et enfin
- (4) fournir une application réaliste du modèle en recherchant les différents paramètres.

9.2 Détermination des entrées du modèle

9.2.1 Largeur de la barre végétale

Dans le modèle, les rangs de végétation sont assimilés à des barres de section rectangulaire, où les trous sont bien distribués. Dans la visée au nadir de la barre, la fraction de trous est une constante, ainsi que la distribution des feuilles.

Cependant, comme le montre la figure 9.1, la distribution réelle des feuilles de maïs n'est pas aussi uniforme que le suppose notre modèle. La biomasse est concentrée autour des tiges et se situe au centre du rang. Ainsi la distribution des trous est également hétérogène: entre deux rangs de plantes, les trous sont plus importants. Ceci ressort encore plus sur les visées au nadir. La figure 3.17 illustre également l'hétérogénéité de la distribution des trous le 26 juillet 1999 à minuit. Son profil de densité le long d'un axe perpendiculaire aux rangs montre une courbe sinueuse au lieu d'une succession de barres.

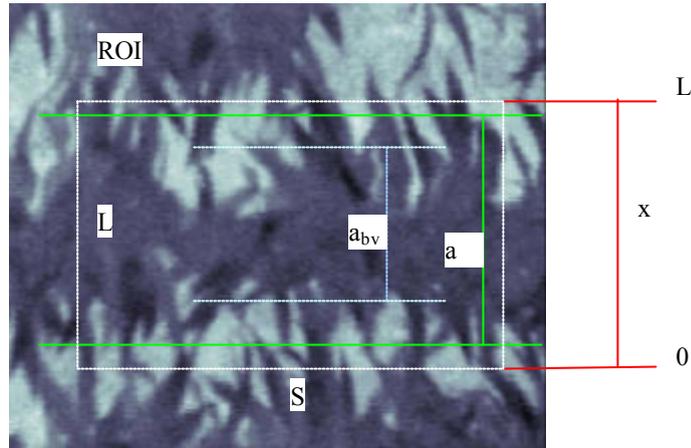


Figure 9.1 Image thermique du 27 juillet 1999 (JJ 208) montrant la surface d'échantillonnage sélectionnée (ROI) et la largeur normalisée de rang. La visée est orientée dans la direction des rangs sous une incidence de 15° .

Au chapitre 3, nous avons défini la largeur normalisée de rang à partir de la moyenne des largeurs et des orientations des feuilles. Ce paramètre représente approximativement la largeur du rang de végétation. Sa valeur augmente avec la croissance des plantes. D'ailleurs, comme le montrent les photos numériques du couvert de maïs à différents stades de croissance (figure 3.12), la structure en rangs du couvert de maïs apparaît clairement à tous les stades même quand la couverture est totale. Nous définissons la largeur de la barre, a_{bv} , comme une fonction de la distribution des trous du couvert et de la largeur normalisée de rang:

$$a_{bv} = k_r a \quad (9.1)$$

où a est largeur de rang normalisée, k_r est le coefficient de conversion, qui est obtenu à partir de la distribution de trous dans une visée verticale:

$$k_r = \frac{L - \int_0^L p(x) dx}{L(1 - p_{mean})} \quad (9.2)$$

où L est la distance inter-rangs; $p(x)$ est la fraction de trou à la position x ; p_{mean} est la valeur moyenne des fractions de trous de la partie végétative centrale :

$$p_{mean} = \frac{\int_{0.25a}^{0.75a} P(x) dx}{0.5a} \quad (9.3)$$

Il est difficile de trouver une position pour distinguer la barre végétale de la surface de sol comme cela est défini dans le modèle. La largeur de la barre peut être déterminée à partir de la définition de la barre végétale, dans le modèle, comme une constante de la fraction de trous égale à la densité moyenne de trous dans la partie centrale du rang de maïs.

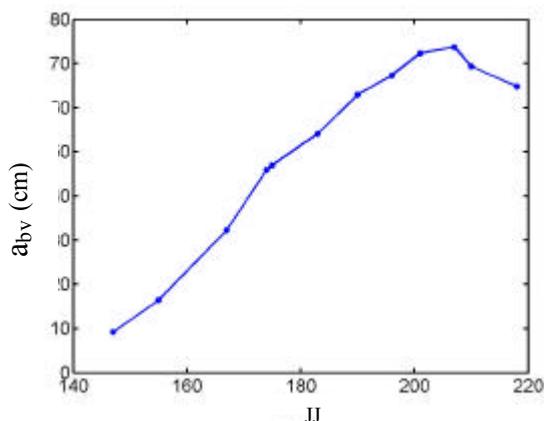


Figure 9.2 Largeur de la barre a_{bv} mesurée en fonction de la date. La distance inter-rangs est de 80cm

La largeur de la barre évolue avec la date de mesure comme l'illustre la figure 9.2 et atteint une valeur maximum de 0.74 m. A tout moment, la structure en rangs est apparente. Par comparaison avec la figure 3.16 montrant la largeur normalisée du rang, la figure 9.2 montre une diminution atteignant environ 10 centimètres aux dates de couverture maximale.

9.2.2 Autres paramètres

Comme décrit au chapitre 3, la hauteur de barre H est la hauteur moyenne des plantes, la hauteur de la base des tiges h est la hauteur de la base du couvert. Ces paramètres ont été mesurés in situ. Les TB des composantes sont obtenues par interpolation des mesures de terrain. Le paramètre d'atténuation du couvert est déterminé à partir des études d'Espana (1997).

9.3 Distribution directionnelle des fractions des composantes en température du couvert de maïs

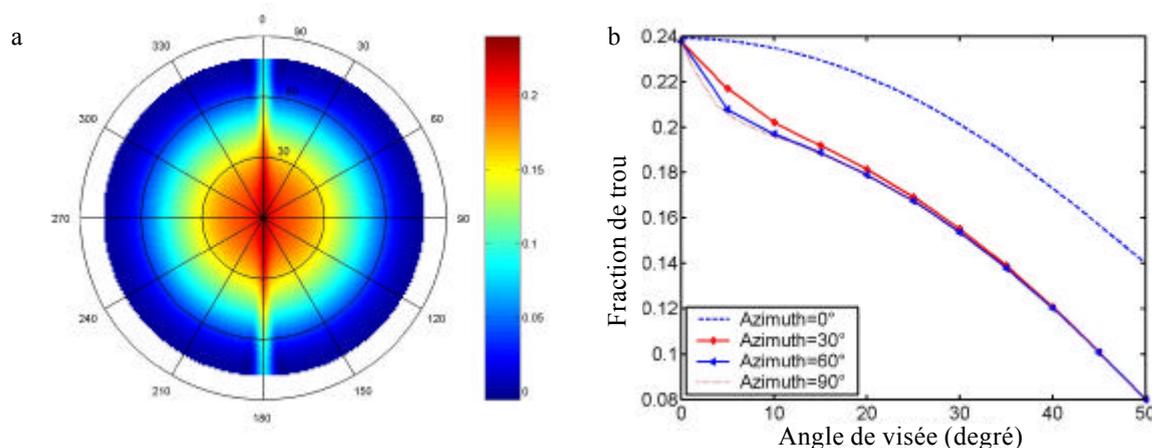


Figure 9.3 Fraction directionnelle de trous : (a) diagramme polaire; (b) profils pour quatre valeurs de l'azimut.

La figure 9.3 montre les probabilités directionnelles de trous simulées pour le couvert de maïs, le 26 juillet 1999. Les paramètres d'entrée apparaissent dans le tableau 9.1. La dimension des feuilles et le coefficient d'atténuation optique ont été discutés aux chapitres 3 et 8.

Tableau 9.1 Valeurs des paramètres d'entrée pour la simulation de la structure géométrique du couvert le 26 juillet 1999.

H(m)	h(m)	a(m)	L(m)	$k(m^{-1})$	τ
1.85	0.5	0.74	0.8	5	1.3

Comme le montre la figure 9.3a, la valeur maximum de la fréquence de trous se trouve naturellement dans le sens d'orientation du rang. Dans les autres directions, nous pouvons observer une symétrie par rapport au centre du diagramme polaire : la fréquence de trous diminue avec l'augmentation de l'angle zénithal de visée mais est peu sensible à l'angle azimutal. Les fractions de trous pour des azimuts de 0° à 90° permettent de représenter toutes les directions de visée

La figure 9.3b montre les profils de la fraction directionnelle de trous pour quatre valeurs de l'angle azimutal : 0°, 30°, 60° et 90° respectivement. En raison de la structure d en rangs, la fraction de trous pour l'angle azimutal 0° est élevée et diminue progressivement et lentement quand l'angle zénithal de visée augmente. Quand l'angle zénithal passe de 0° à 50°, la probabilité de trous diminue de 0,24 à 0,14. Les trois autres profils sont pratiquement identiques (avec de faibles écarts entre 0° et 10°). Ils

présentent une décroissance plus rapide avec une probabilité de trous de 0.08 seulement à 50° d'angle zénithal.

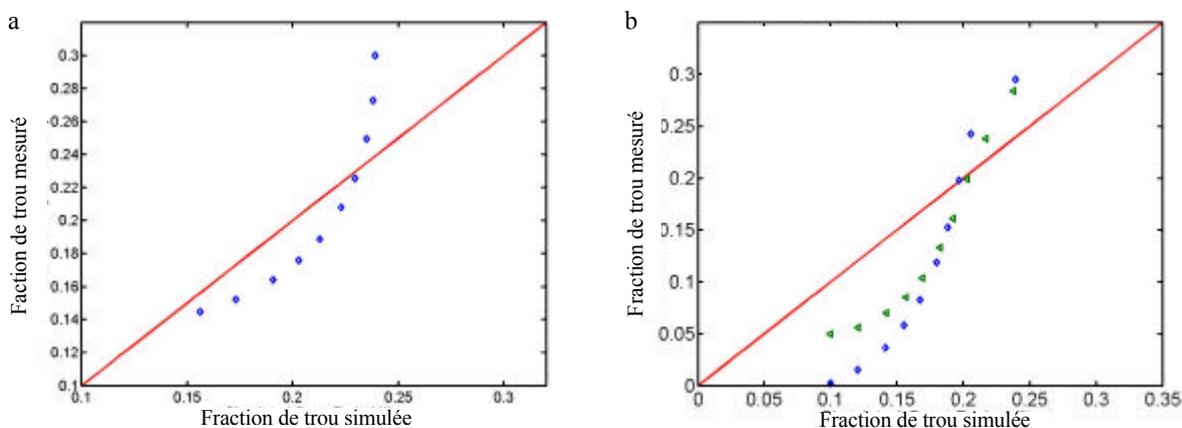


Figure 9.4 Les fractions de trous simulées (lignes rouge) et mesurées. (a) les points bleus représentent des mesures à l'azimut 0°; (b) les points bleus représentent des mesures à l'azimut 45° et en vert 90°.

La figure 9.4 compare les fractions de trous mesurées et simulées à minuit le 26 juillet 1999 pour des valeurs de l'angle azimutal de 0°, 45° et 90°. La description des données mesurées se trouve au chapitre 3 (figure 3.18)

Il existe des différences importantes entre les probabilités directionnelles de trous mesurées et simulées (figure 9.4(a)). Les valeurs mesurées présentent une gamme allant de 0.3 au nadir, à 0.14 pour un angle zénithal de 50°, alors que la gamme des valeurs simulées va de 0.24 à 0.16. En outre, l'allure des courbes n'est pas la même. La courbe des données simulées dérive d'une fonction exponentielle négative, comme le montrent des travaux tels que ceux de Nilson et al. (1971), Cette représentation produit un biais quand on fait la comparaison avec des données mesurées pour un couvert de maïs. La figure 9.4(b) montre également ce biais.

La figure 9.5 montre les simulations des fractions de composante d'un couvert de maïs à 13h10 du 24 juin 1999. Les graphes (a) (b) et (c) représentent respectivement les diagrammes polaires des distributions des fractions de végétation, de sol éclairé et de sol à l'ombre, et les profils correspondants. Les quatre profils représentent les variations des fractions de chaque composante du couvert, parallèlement et perpendiculairement au plan solaire principal, et parallèlement et perpendiculairement à la direction des rangs. Dans cet exemple, cela correspond aux couples d'angles azimutaux (223°, 43°), (133°, 313°), (180°, 0°), et (270°, 90°). Pour illustrer la variation dans un plan vertical complet, les angles zénithaux dans les sens du côté soleil sont exprimés en valeurs positives et ceux du côté opposé (direction spéculaire) sont exprimés en valeurs négatives. Les paramètres d'entrée sont indiqués dans le tableau 9.2. La définition des paramètres et leur dérivation se trouvent dans le Chapitre 8.

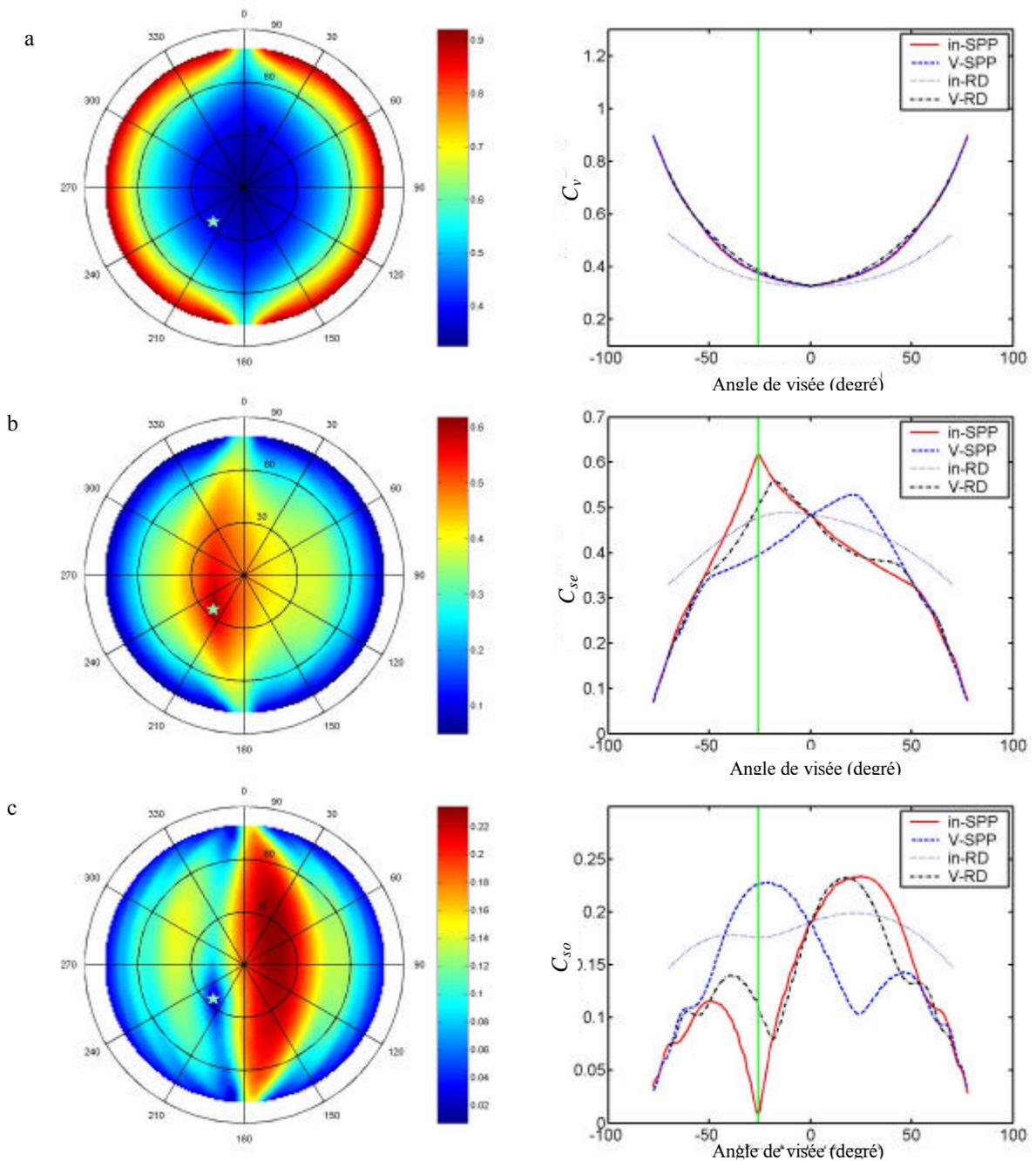


Figure 9.5 Simulation des fractions de composantes du couvert de maïs à 13h10 , le 24 juin 1999 : (a) fractions de végétation, (b) fraction de sol éclairé et (c) fraction de sol à l'ombre.

Tableau 9.2 Valeurs des paramètres d'entrée pour la modélisation de la structure géométrique d'un couvert de maïs le 24 juin 1999.

q_s (°)	j_s (°)	H(m)	h (m)	a (m)	L (m)	k (m ⁻¹)	τ
26	223	0.8	0.15	0.46	0.8	5	1.3

Comme le montre l'analyse faite au Chapitre 8, les proportions des composantes du couvert changent avec la direction de visée. La distribution de ces proportions est asymétrique. La fraction de sol éclairé atteint sa valeur maximale dans la direction anti-spéculaire, quand la fraction de sol à l'ombre est nulle.

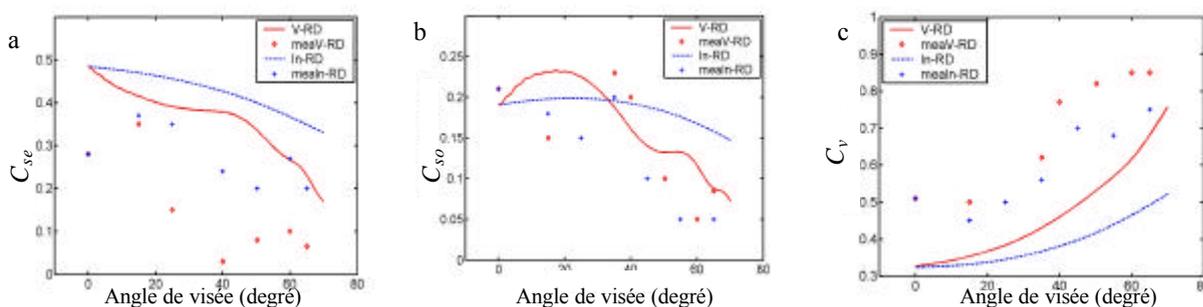


Figure 9.6 Comparaison entre les fractions de composante mesurées et simulées à 13h10 du 24 juin 1999: (a) fraction de sol éclairé, (b) fraction de sol à l'ombre, et (c) fractions de végétation; pour des angles azimutaux de 0° (en bleu) et de 90°(en rouge). Les courbes représentent des simulations et les points représentent des mesures

La figure 9.6 compare les fractions de composantes mesurées et simulées à 13h10 du 24 juin 1999 pour le sol éclairé, le sol à l'ombre et la végétation. Les azimuts des courbes de visée sont respectivement 0° et 90°. Comme représenté dans la figure 9.3, les différences les plus importantes entre les courbes apparaissent pour les visées dans les directions caractérisées par des angles zénithaux de 0° et de 90°. Nous nous limiterons donc à ces deux directions. Les angles zénithaux de visée varient de 0° à 70°. Dans le graphique, V-RD et In-RD sont les moyennes pour les directions de visée perpendiculaires et parallèles à la direction des rangs. Les angles azimutaux correspondants sont respectivement 90° et 0°. Les données mesurées sont notées meaV-RD et meaIn-RD.

Dans les mesures de jour, des images visibles multi-bandes ont été employées pour mesurer les fractions de composantes car la résolution des images visibles est supérieure aux images thermiques. L'échantillon choisi est un carré dont le côté correspond au double de la distance inter-rangs. La surface occupée par le sol éclairé a été identifiée en premier, puis celle occupée par la végétation, et enfin celle occupée par le sol à l'ombre. Les surfaces à l'ombre, la plupart du temps ne peuvent pas être distinguées, nous les traiterons donc pour moitié comme végétation à l'ombre et sol à l'ombre.

9.4 Analyse des TBD mesurées

La figure 9.7 montre la TBD du couvert à 13h10 du 24 juin 1999. La figure 9.7a est un graphique polaire. Dans la figure 9.7b quatre profils sont représentés pour des azimuts différents. La signification des profils est la même que pour la figure 9.6. Les paramètres d'entrée sont donnés dans le tableau 9.2. En outre, les températures de brillance des composantes sont respectivement de 45°C, 31°C et 27°C pour le sol éclairé, le sol à l'ombre et la végétation. Ces valeurs sont dérivées de données mesurées (figure 7.2). Les profils de TBD sont semblables aux profils de la fraction de sol éclairé (voir figure 9.5b).

La figure 9.8 compare les profils de TBD mesurées et simulées. Les quatre graphiques représentent différentes visées azimutales respectivement dans et perpendiculairement au plan principal solaire, et dans et perpendiculairement au plan des rangs.

La figure 9.8a présente des TBD mesurées et simulées dans le plan principal solaire. La TB simulée est toujours plus grande que celle mesurée, particulièrement en position de hot spot. La différence de TBD entre mesures et simulation est d'environ 2 °C. Sur la courbe de simulation, la valeur maximum est la direction antispéculaire. La température décroît rapidement sur le côté gauche du hot spot, elle diminue lentement sur le côté droit; au-delà de 60° d'angle zénithal la courbe décroît plus rapidement. Pour les données mesurées, la valeur maximum correspond aussi au hot spot. Les valeurs de température diminuent de même rapidement du côté gauche du hot spot, lentement du côté droit. Au-delà de 10° d'angle zénithal, la courbe décroît plus rapidement.

La figure 9.8b présente des TBD mesurées et simulées perpendiculaires au plan principal solaire. Pour ces deux courbes, la valeur maximum correspond aux mêmes angles de visée. Les valeurs de température mesurées décroissent rapidement des deux côtés du maximum, alors que les données simulées diminuent plus lentement du côté droit et plus rapidement du côté gauche. Cette différence est supposée liée aux caractéristiques d'atténuation optique de la végétation.

La figure 9.8c présente des TBD mesurées et simulées parallèles à la direction des rangs. On observe une grande différence entre les données mesurées et simulées pour les grands angles de visée. Dans la simulation, les rangs de végétation sont assimilés à des barres. Ainsi les surfaces éclairées simulées sont toujours dans la scène même pour de grands angles zénithaux, alors que ce n'est pas le cas avec les mesures. Les surfaces de sol éclairé sont cachées par des feuilles pour les grands angles zénithaux, même dans la direction des rangs.

La figure 9.8d présente des TBD mesurées et simulées perpendiculaires à la direction des rangs. Un profil concave apparaît dans les courbes de TBD simulées et surtout dans les courbes de TBD mesurées. Ce phénomène est provoqué par les propriétés d'atténuation optique de la végétation. Un coefficient d'atténuation élevé aboutira à d'avantage d'ombre projetée sur le sol. La TBD pour des visées obliques sera ainsi réduite.

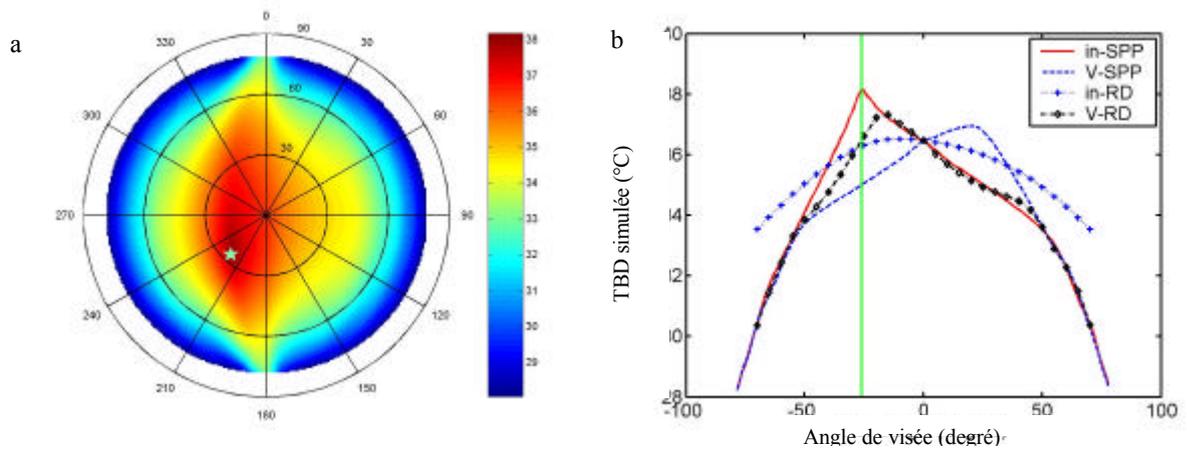


Figure 9.7 TBD du couvert à 13h10 du 24 juin 1999, (a) diagramme polaire; (b) profils pour quatre valeurs de l'azimut.

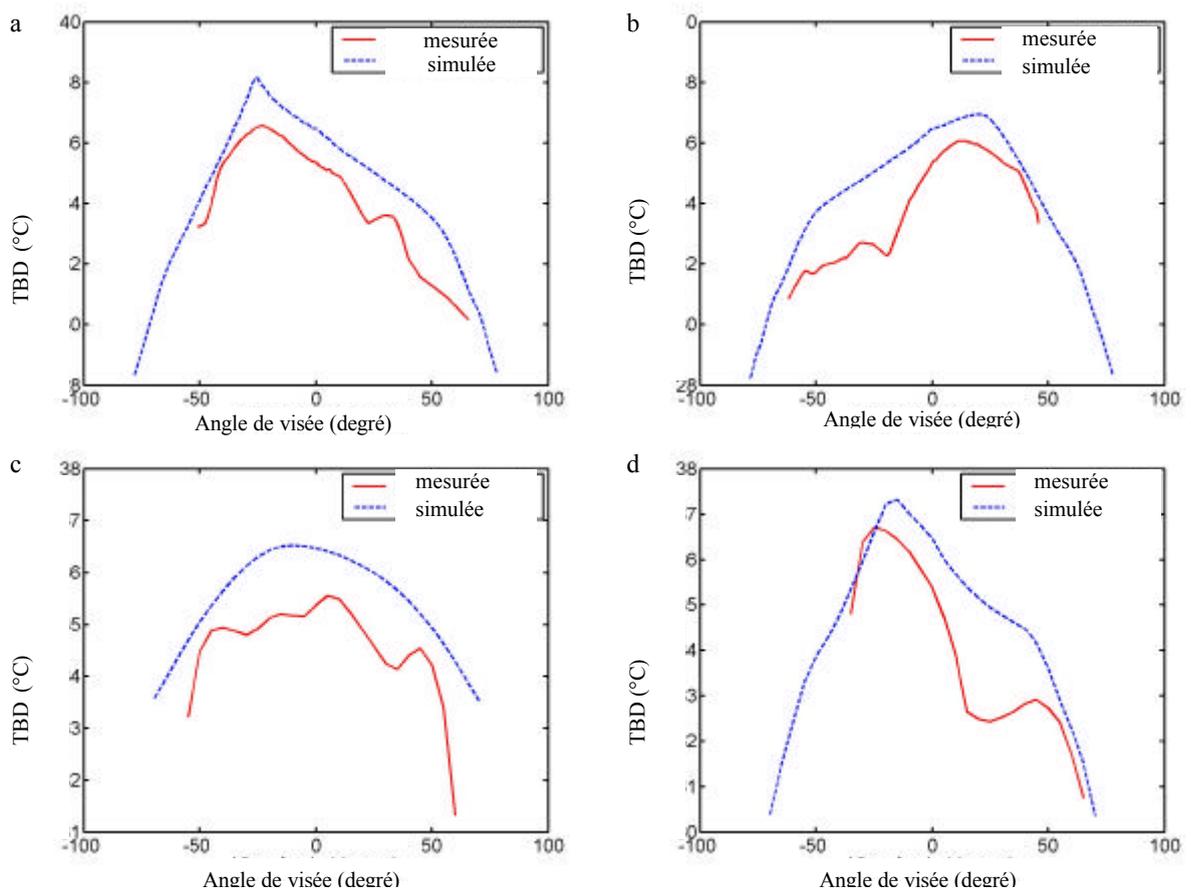


Figure 9.8 Comparaison entre les profils de TBD mesurée et simulée: (a) dans et (b) perpendiculairement au plan principal solaire, (c) dans et (d) perpendiculairement au plan des rangs

La figure 9.9 présente un graphique d'ajustement optimal de TBD du couvert et des comparaisons entre des données mesurées et simulées. Le seul changement de paramètre d'entrée par rapport à la figure 9.8 est le coefficient d'atténuation, qui passe de 1.3 à 2.7. La figure 9.10 montre la différence entre deux diagrammes polaires pour des données mesurées et simulées. On peut considérer que les coïncidences entre ces deux diagrammes sont bonnes. Bien que la différence maximum soit de 4°C (en bord de diagramme polaire), la différence de température dans la plupart des directions est inférieure à 2°C, et la tendance des graphiques est pratiquement la même.

On a simulé des TBD pour le même jour mais à des heures différentes pour évaluer la robustesse du modèle et des paramètres d'entrée. La figure 9.11 montre des TBD à 13h55 et à 15h33. Comparé aux profils représentés sur les figures 7.1d et 7.1e, la différence entre les données mesurées et les données simulées est évidente. Nous supposons que cette différence vient des caractéristiques directionnelles d'atténuation de la végétation. A des instants différents, la distribution de l'ombre de la végétation change avec la variation de la position solaire. La quantité et la position de sol éclairé, de sol à l'ombre et de végétation ne changent pas de la même manière que dans le modèle. En outre, nous avons supposé que les trous dans le modèle sont distribués uniformément. Les feuilles sont de petites surfaces planes disposées horizontalement dans la barre. Cependant, ces hypothèses ne reflètent pas exactement la réalité d'un couvert de maïs. Dans les recherches futures on devra s'intéresser aux variations directionnelles des propriétés optiques des cibles à cause de leur géo-structure complexe.

9.5 Application initiale du modèle de GORT

Kimes (1983) a développé plusieurs stratégies d'inversion pour extraire l'information d'une structure en rangs et la TB des composantes d'un couvert en utilisant une série d'angles de visées d'un capteur. La précision des paramètres simulés, tels que la hauteur et la largeur des rangs, la température de la végétation et du sol étaient respectivement de l'ordre de 5 centimètres, 1° et 2°C. La sensibilité du modèle et de la méthode d'inversion a également été étudiée.

Le modèle physique de culture en rangs développé dans cette recherche possède trois types d'entrées: pour la géométrie de l'ensemble Soleil-cible-caméra, pour la structure géométrique du couvert, pour les propriétés optiques et radiatives (incluant les valeurs des températures de brillance des composantes du couvert). Leurs effets sur la TBD ont été discutés au Chapitre 8. Si la TBD est connue, les paramètres d'entrée peuvent être ajustés en utilisant le modèle, comme par exemple le calcul du paramètre d'atténuation optique de la végétation, ou la recherche de la TB du couvert et de la structure des composantes de la végétation. Nos futures recherches porteront sur les applications du modèle.

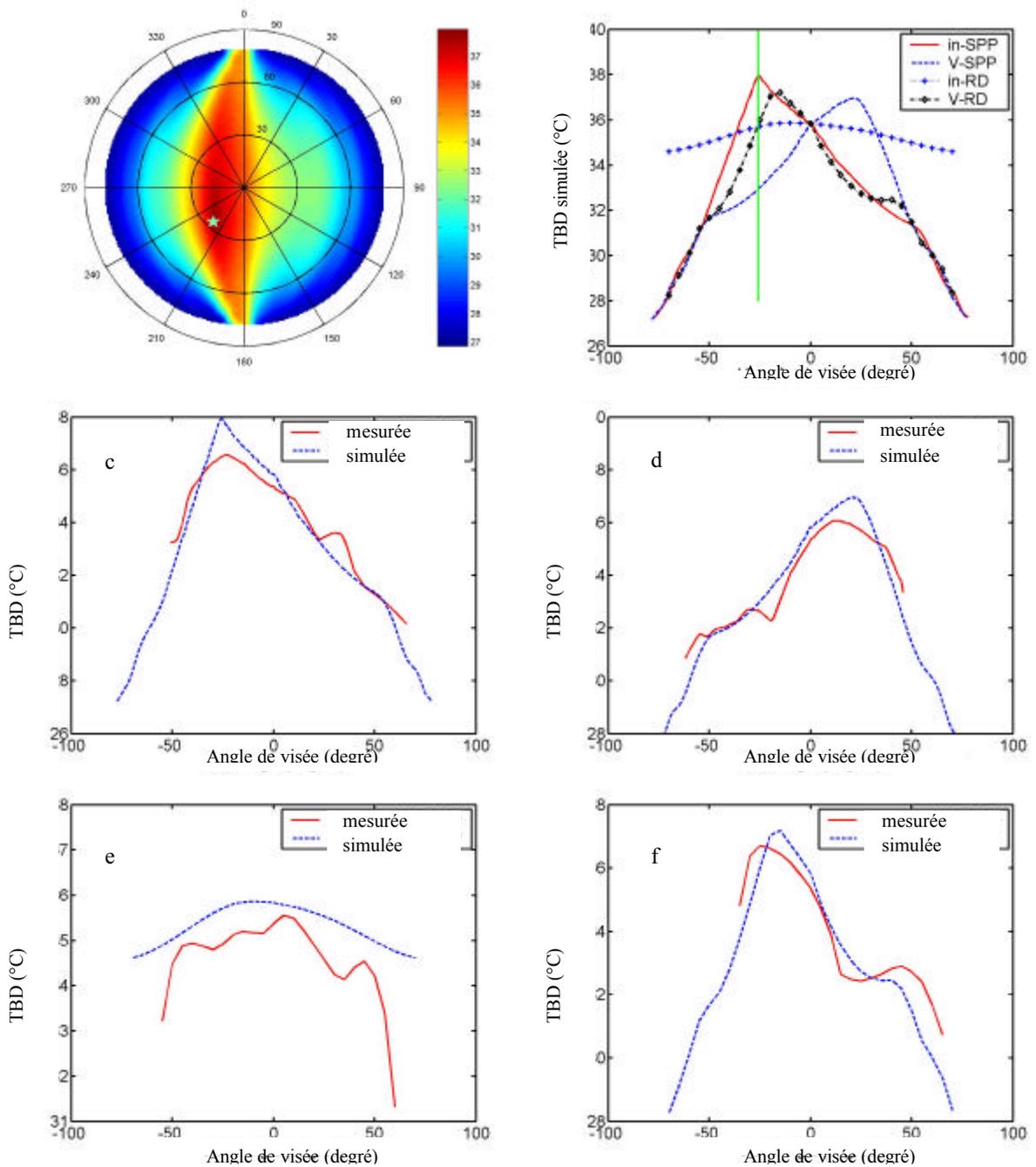


Figure 9.9 Graphique d'ajustement optimal de TBD du couvert et comparaison entre les données mesurées et simulées. (a) diagramme polaire simulé; (b) profils simulés pour quatre valeurs de l'azimut ; (c) dans et (d) perpendiculairement au plan principal solaire, (e) dans et (f) perpendiculairement au plan des rangs

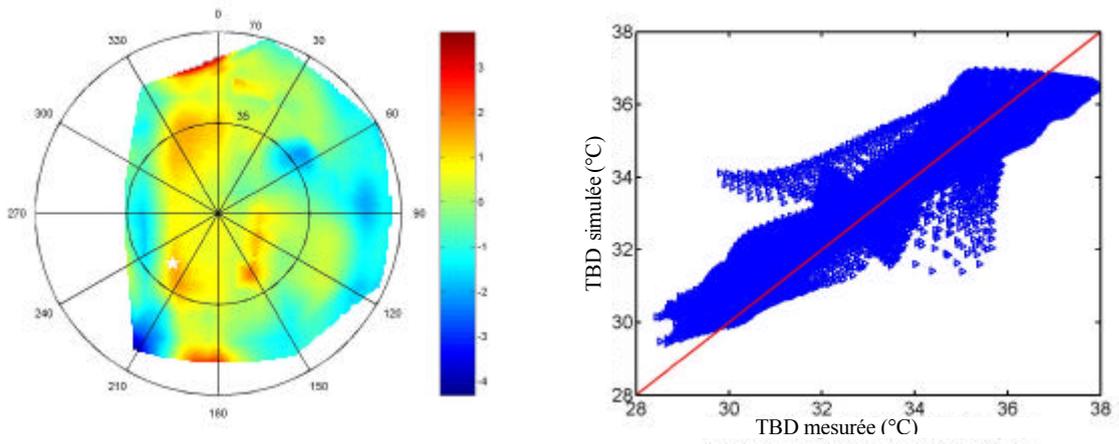


Figure 9.10 Différence entre deux graphiques polaires de données mesurées et simulées. (résultat du 24 juin 1999 à 13h10)

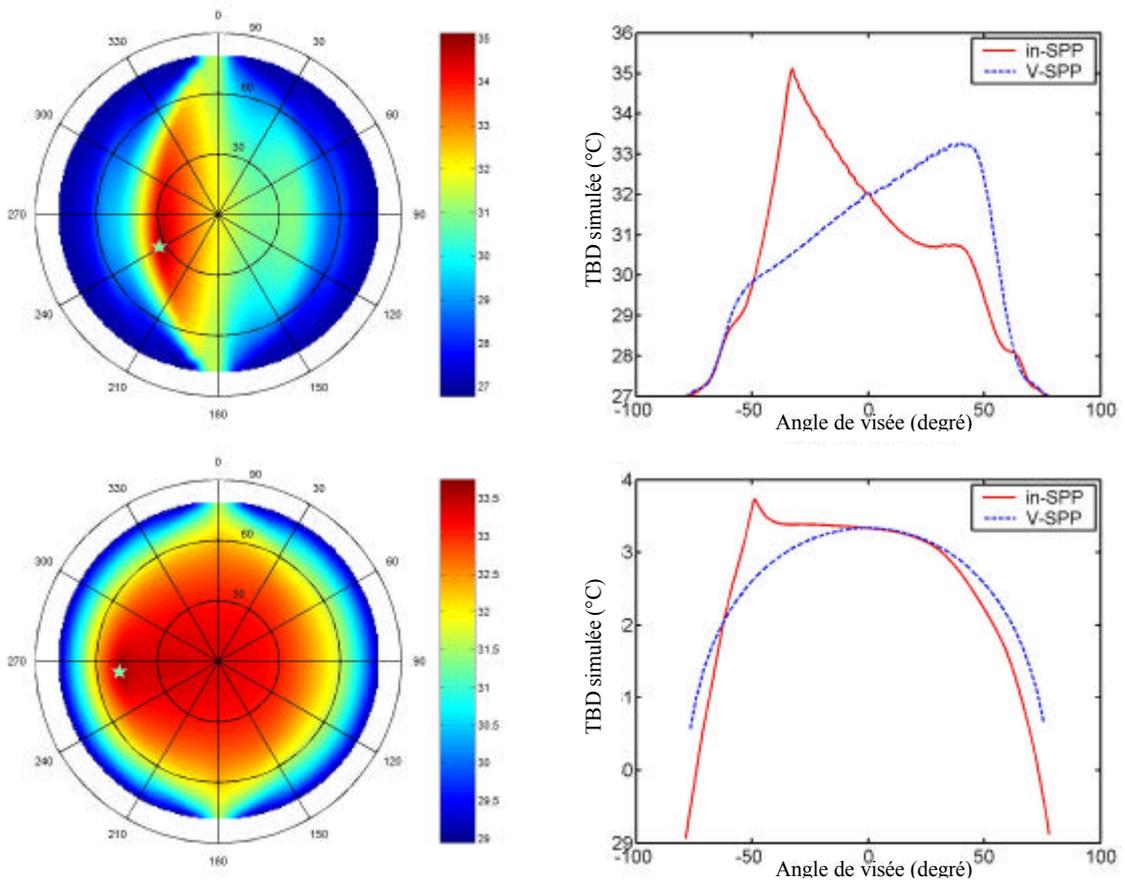


Figure 9.11 TBD simulées à 13h55 et 15h33 du 24 juin 1999.

9.6 Conclusion

Une campagne expérimentale a été réalisée à des heures différentes du cycle diurne et à des dates variées au cours de la période de croissance pour étudier la TBD d'un couvert de maïs. Les résultats des études que nous avons menées indiquent que les facteurs de géométrie de l'ensemble Soleil-cible-caméra, la structure géométrique du couvert, les propriétés optiques de ce couvert et le bilan d'énergie thermique, sont les éléments les plus importants parce qu'ils permettent de comprendre le comportement de cette TBD. Un modèle simple de GORT a été développé afin de décrire physiquement la TBD d'un couvert. Dans le modèle, la structure en rangs de la culture a été assimilée à des barres, à l'intérieur desquelles des trous ont été distribués de manière uniforme. Les scènes sont divisées en trois composantes, sol à l'ombre, sol éclairé et végétation, chacun d'eux étant affecté d'une seule valeur de TB.

Les résultats expérimentaux sont utilisés pour valider le modèle. Les comparaisons entre les TBD mesurées et simulées, à des heures et des dates différentes, ont été effectuées. Les paramètres d'entrée ont également été évalués. Les résultats obtenus montrent que le modèle reflète de manière satisfaisante les TBD mesurées, en ajustant certaines des données d'entrée. Toutes les caractéristiques expliquées de la TBD ont pu être simulées par le modèle.

Cependant, des biais sont évidents dans la validation. La distribution angulaire simulée de la fraction de trous est différente de celle mesurée. De plus, il y a un problème quand on suppose que la répartition spatiale des fractions de trous est uniforme. En fait, les trous et la distribution spatiale varient en fonction de la direction de visée. Pour une même cible, un paramètre d'atténuation constant ne convient pas pour les TBD mesurées à des temps différents.

L'application initiale concerne seulement la recherche des paramètres d'entrée en utilisant le modèle de simulation. La question de savoir comment les TBD sont reliées aux différents stades de développement du couvert, nécessite d'autres recherches et n'est pas abordée ici.

Conclusion générale

La connaissance de la variation directionnelle de la TBD des couverts présente un intérêt pour de nombreuses applications de télédétection, notamment dans le secteur de l'agriculture. De nombreuses études ont été effectuées sur divers aspects de la TBD du couvert de maïs depuis 1979 (Jackson et al., 1979). Cependant, beaucoup de questions restent encore sans réponse. Dans ce travail, nous nous sommes particulièrement attachés à rechercher les réponses à trois d'entre elles: (i) comment optimiser la mesure de la distribution directionnelle de la TBD depuis le sol, (ii) quelles sont les dynamiques directionnelles et temporelles de la TBD d'un couvert de maïs et quels sont les principaux facteurs à considérer; enfin (iii) comment modéliser la variation directionnelle de la TBD d'un couvert en rangs ?

De nombreuses expériences avaient déjà été entreprises, utilisant différentes stratégies de mesure en fonction des objectifs à atteindre et des technologies de mesure utilisées. (Kimes, 1983a, 1983b; Kustas et al., 1990; Lagouarde et al., 1995; Sandmeier, 2000). Un nouveau système associant une caméra thermique –et une grue a été développé lors de notre expérience menée à l'INRA d'Avignon (France) en 1999. L'utilisation d'une caméra à grand champ (80° de FOV $^\circ$) a permis d'obtenir des mesures multidirectionnelles instantanées. En orientant la caméra successivement vers plusieurs directions obliques, nous avons pu accéder aux mesures de grand angle zénithal. En plaçant la caméra proche du couvert (à environ 2 m du sommet de la végétation), nous pouvons obtenir des tailles de pixels de moins de 1 cm, et ainsi observer la distribution de TB des composantes du couvert.

Quatre méthodes (protocoles) de mesures multidirectionnelles ont été évaluées dans notre expérience, consistant à:

- observer la même surface sous différents angles en déplaçant l'ensemble grue - caméra;
- observer les différentes parties de la parcelle sous des angles différents par rotation du capteur et de la plate-forme sans déplacement de la grue (en faisant l'hypothèse de l'homogénéité de la parcelle);
- déplacer la grue pour observer les différentes parties de la parcelle sous trois orientations de l'axe optique de la caméra (verticale, 45° vers le sud et 45° vers le nord), afin d'obtenir un échantillonnage spatial important;
- déplacer la caméra dans la direction perpendiculaire aux rangs à une faible hauteur de mesure.

La deuxième et la troisième méthode donnent des résultats satisfaisants. La première méthode nécessite un temps trop long et introduit des erreurs trop grandes. Avec la quatrième méthode, l'ombre de la grue et de la caméra rend impossible l'obtention de mesures dans toutes les directions. Les deux méthodes retenues nous ont permis

d'acquérir la fonction directionnelle de TBD du couvert de maïs à des dates et dans des conditions différentes durant toute la période de la croissance.

L'analyse des images IRT de haute résolution spatiale démontre qu'il existe plusieurs composantes de TB différentes au sein d'un couvert de maïs. Le nombre de ces composantes varie entre un et quatre. De jour, dans la plupart des cas, le couvert de maïs peut être considéré composé de trois composantes: sol éclairé, sol à l'ombre et végétation. La végétation éclairée et à l'ombre, qui apparaissent habituellement deux composantes distinctes dans le domaine visible et proche infrarouge, peuvent être considérées comme une composante unique dans l'IRT en raison de leur faible différence de TB. Le nombre de composantes peut être réduit à deux voire même à une en fonction du moment de la journée, de l'évolution de la structure du couvert, ainsi que de l'état hydrique du sol.

Différents facteurs affectent la mesure multidirectionnelle de la TBD au sol: les effets instrumentaux (notamment l'incertitude sur l'étalonnage); les effets de la cible observée (essentiellement son hétérogénéité spatiale); les effets de l'environnement—(essentiellement des fluctuations et des évolutions temporelles.

- L'hétérogénéité spatiale du couvert introduit les erreurs les plus importantes dans l'ensemble des mesures. Elle varie au cours d'une journée et dépend de la taille de l'échantillon, de la direction d'observation et de la date de mesure. L'amplitude absolue des variations de TB est comprise entre 1 et 5°C pour notre parcelle expérimentale de 100x150 m² avec des tailles d'échantillon variant entre 0.8 et 20 m. Cet effet spatial est réduit d'environ 1°C quand on s'intéresse à la différence entre TBD dans deux directions distinctes, plutôt qu'à sa valeur absolue. L'effet du FOV est un problème spécifique amplifié par la structure en rangs. Les erreurs commises peuvent atteindre facilement 5°C.
- On observe à la fois des fluctuations rapides (d'amplitude de l'ordre de 0.2°C) et des variations temporelles lentes (d'amplitude pouvant atteindre 3°C) sur les mesures de la TBD. Elles sont principalement liées à la variation des paramètres environnementaux (vent, rayonnement, température de l'air, etc...), et peuvent être normalisées en utilisant des portions d'images de la même zone acquises à des instants différents.

L'effet du FOV sur les mesures au sol est souvent négligé. Pour approfondir son analyse, nous avons développé un modèle géométrique qui calcule la variation des proportions des trois composantes du couvert en rangs (sol éclairé, sol à l'ombre et végétation) en fonction du FOV. On a mis en évidence le phénomène de sous-estimation importante et systématique de la contribution du sol lors des mesures verticales avec un grand FOV. Pour un couvert avec un sol plus chaud que la végétation, les mesures verticales réalisées avec un grand FOV sous-estiment la température composite du couvert d'une valeur qui peut atteindre -3°C pour des observations à 2 mètres du sommet du couvert. Ce phénomène est peu important pour les visées obliques. Ainsi, pour les échantillonnages directionnels, il est important d'utiliser un faible FOV pour les mesures au nadir. Mais il faut intégrer un nombre entier de rangs et tenir compte de la taille du pixel. Dans notre expérimentation avec la caméra à 20 mètres du sol et une barre végétale de 80 cm de large, l'analyse montre qu'il convient d'utiliser des FOV variables pour l'échantillonnage : environ 7° de

champ (taille d'échantillonnage fixée à 3 rangs) pour des mesures voisines du nadir; environ 10° de champ (taille d'échantillonnage fixée à 5 rangs) pour les angles zénithaux entre 2° et 20°; 10° de champ (taille d'échantillonnage variable) pour les angles zénithaux supérieurs à 20°.

Nous avons observé une grande dynamique de la variation directionnelle de la TBD du couvert de maïs à la fois au cours de la journée et pendant le cycle de croissance. L'amplitude de cette variation directionnelle observée sur le couvert de maïs est comprise entre 2°C et 6°C. Elle est généralement faible le matin, et forte au midi solaire. Pendant toute la période, l'amplitude est faible au début et à la fin du cycle de la croissance, et relativement forte au milieu de cette période. La forme de la variation directionnelle dans une représentation polaire est bien marquée par une bande chaude ou froide dans la direction du rang. La direction correspondant à un maximum de TBD se trouve toujours autour de la direction anti-spéculaire, sans coïncider systématiquement avec cette direction exacte. La variation directionnelle de la TBD est déterminée par deux facteurs: (1) la variation de la proportion des composantes constituant le couvert, dépendant de la structure du couvert et de la position du Soleil; (2) la différence de température entre les différents composantes, dépendant de leur bilan d'énergie respectifs en fonction de leurs propriétés (humidité, résistance aérodynamique, rayonnement, température de l'air, du vent, etc..)

Un modèle hybride simple à base d'optique géométrique et de transfert radiatif (GORT) a été développé pour simuler la distribution directionnelle de la TBD des couverts végétaux en rangs. Moyennant quelques hypothèses sur l'architecture, les propriétés optiques et la distribution des températures dans le couvert, un rang a été traité comme un milieu régulièrement distribué, de sorte que la structure discontinue et les trous du couvert peuvent être décrits respectivement par l'optique géométrique et la théorie du transfert radiatif. Ainsi, la température de brillance directionnelle a pu être calculée à partir de la description de trois composantes du couvert et par intégration(?), au lieu de l'analyse probabiliste utilisée dans d'autres modèles.

Le modèle révèle l'effet combiné de la structure en rangs et de la géométrie d'observation sur les distributions multi-directionnelles de la température de brillance du couvert. Le hot spot et la région chaude autour de ce dernier sont mis en évidence par les simulations. Le hot spot apparaît dans la direction anti-spéculaire; la région chaude prend une forme de noyau en représentation polaire, due à la structure en rangs. A l'aide des calculs, ces deux phénomènes ont pu être expliqués par la distribution des trous entre les rangs et à l'intérieur de ceux-ci et par les différences de températures entre les trois composantes. La forme de la distribution directionnelle peut être employée comme nouveau critère pour évaluer l'effet de hot spot thermique: si une région chaude se manifeste autour de la direction anti-spéculaire, l'effet de hot spot apparaît.

Les résultats expérimentaux sont également utilisés pour valider le modèle. Les comparaisons entre les TBD mesurées et simulées, à des heures et des dates différentes, ont été effectuées, les paramètres d'entrée sont aussi évalués. Les résultats obtenus montrent que le modèle reflète de manière satisfaisante les TBD mesurées, en ajustant les données d'entrée. Toutes les caractéristiques expliquées de la TBD ont pu être simulées par le modèle.

APPENDIX A

Case for ideal condition:

If $q \geq b$

$$C_{vv}=1; C_{vo}=0; C_{vs}=0.$$

if $b > q \geq atg \frac{b-a}{h}$

$$C_{vv} = \frac{a+htgq}{L}; C_{vo}=0; C_{vs}=1-C_{vv}-C_{vo}.$$

if $atg \frac{b-a}{h} > q \geq 0$

$$C_{vv} = \frac{a+htgq}{L}; C_{vo} = \frac{b-a-htgq}{L}; C_{vs}=1-C_{vv}-C_{vo}.$$

if $0 > q \geq -tg \frac{L-b}{L}$

$$C_{vv} = \frac{a-htgq}{L}; C_{vo} = \frac{b-a}{L}; C_{vs}=1-C_{vv}-C_{vo}.$$

if $-tg \frac{L-b}{L} > q \geq -b$

$$C_{vv} = \frac{a-htgq}{L}; C_{vs}=0; C_{vo}=1-C_{vv}-C_{vs}$$

if $q < -b$

$$C_{vv}=1; C_{vo}=0; C_{vs}=0$$

For ideal viewing conditions when the sensor is far away from the objectives, the radiation received by the sensor could be thought as parallel rays, the component fractions don't change with the size of sample, the position of sensor and is used as standard to evaluate the errors caused by angular effect within FOV.

Case 1: $a \geq b$

$$C_{vv}=1; C_{vo}=0; C_{vs}=0.$$

Case 2: $a' \geq b > a$

Suppose $s_1 = Htg a' - (L - a)$

$$s_2 = (H - h)tg b$$

$$s_3 = (H - h)tg a$$

then $s' = s_1 - s_2 = Htg a' - (L - a) - (H - h)tg b = L - H(tg b - tga)$

$$s'' = s_1 - s_3 = \mathbf{a} + ht\mathbf{g}\mathbf{b}$$

$$t\mathbf{g}\mathbf{a}_x = \frac{(H-h)t\mathbf{g}\mathbf{b} - (x-s')}{H-h} = t\mathbf{g}\mathbf{b} - \frac{x-s'}{H-h}$$

If $0 \leq x \leq s'$

$$C_{vv}=1; C_{vo}=0; C_{vs}=0.$$

If $s' < x \leq s''$

$$\text{if } \mathbf{a}_x \geq 0, \quad C_{vs} = \frac{L-a-ht\mathbf{g}\mathbf{a}_x}{L}, C_{vo}=0, C_{vv}=1-C_{vs}-C_{vo}$$

$$\text{if } \mathbf{a}_x < 0, \quad C_{vs} = \frac{L-b}{L}, C_{vo} = \frac{h(t\mathbf{g}\mathbf{q} - t\mathbf{g}\mathbf{a}_x)}{L}, C_{vv}=1-C_{vs}-C_{vo}$$

If $s'' < x \leq L$

$$\text{If } x \geq b, C_{vs} = 1 - \frac{x}{L}, C_{vo}=0, C_{vv}=1-C_{vs}-C_{vo}.$$

$$\text{If } x < b, C_{vs} = \frac{L-b}{L}, C_{vo} = \frac{b-x}{L}, C_{vv}=1-C_{vs}-C_{vo}.$$

Case 3: $b > a' > a > 0$

Suppose $s' = ht\mathbf{g}\mathbf{a} + a$

$$s'' = ht\mathbf{g}\mathbf{a}' + a$$

$$t\mathbf{g}\mathbf{a}_x = \frac{Ht\mathbf{g}\mathbf{a} + a - x}{H-h}$$

If $0 \leq x \leq s'$

$$\text{If } \mathbf{a}_x \leq \mathbf{q} \quad C_{vo} = \frac{-a+b-ht\mathbf{g}\mathbf{a}_x}{L}, C_{vs} = \frac{L-b}{L},$$

$$C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo} = \frac{a+ht\mathbf{g}\mathbf{a}_x}{L}$$

$$\text{If } \mathbf{a}_x > \mathbf{q} \quad C_{vo} = 0, C_{vs} = \frac{L-a-ht\mathbf{g}\mathbf{a}_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} = \frac{a+ht\mathbf{g}\mathbf{a}_x}{L}.$$

If $s' < x \leq s''$

$$\text{If } x \geq b \quad C_{vo} = 0, C_{vs} = \frac{L-x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} = \frac{x}{L}.$$

$$\text{If } x < b \quad C_{vo} = \frac{b-x}{L}, C_{vs} = \frac{L-b}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs} = \frac{x}{L}.$$

If $s'' < x \leq L$

$$\text{suppose } t\mathbf{g}\mathbf{a}_x = \frac{Ht\mathbf{g}\mathbf{a} + (L-x) + a}{H-h}$$

$$\text{then } C_{vv} = \frac{a+ht\mathbf{g}\mathbf{a}_x}{L}$$

if $x \geq b$

$$\text{if } \mathbf{a}_x \geq \mathbf{q} \quad C_{vo} = 0, C_{vs} = 1 - C_{vo} - C_{vv}$$

$$\text{if } \mathbf{a}_x < \mathbf{q}, \quad C_{vo} = \frac{h(\mathbf{t}g\mathbf{q} - \mathbf{t}g\mathbf{a}_x)}{L}, \quad C_{vs} = 1 - C_{vo} - C_{vv}$$

$$\text{if } x < b \quad C_{vs} = 1 - \frac{b}{L}, \quad C_{vo} = 1 - C_{vs} - C_{vv}$$

Case 4: $\mathbf{a}' > \mathbf{b} > 0 > \mathbf{a}$

Suppose $s_1 = H\mathbf{t}g\mathbf{a}' - (L - a)$

$$s_2 = (H - h)\mathbf{t}g\mathbf{b}$$

$$s_3 = (H - h)\mathbf{t}g\mathbf{a}$$

Then $s' = s_1 - s_2 = H\mathbf{t}g\mathbf{a}' - (L - a) - (H - h)\mathbf{t}g\mathbf{b} = L - H(\mathbf{t}g\mathbf{b} - \mathbf{t}g\mathbf{a})$

$$s'' = \mathbf{a} + h\mathbf{t}g\mathbf{b}$$

$$\mathbf{t}g\mathbf{a}_x = \frac{(H - h)\mathbf{t}g\mathbf{b} - (x - s')}{H - h} = \mathbf{t}g\mathbf{b} - \frac{x - s'}{H - h}$$

If $0 \leq x \leq s'$

$$C_{vv} = 1, \quad C_{vo} = 0, \quad C_{vs} = 0$$

If $s' < x \leq s''$

$$\text{if } \mathbf{q} \geq \mathbf{b}: \quad C_{vo} = \frac{L - a - h\mathbf{t}g\mathbf{a}_x}{L}, \quad C_{vs} = 0, \quad C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs} = \frac{a + h\mathbf{t}g\mathbf{a}_x}{L}$$

if $\mathbf{b} > \mathbf{q} \geq 0$

if $\mathbf{a}_x \geq 0$

$$C_{vs} = \frac{L - a - h\mathbf{t}g\mathbf{a}_x}{L}, \quad C_{vo} = 0, \quad C_{vv} = 1 - C_{vs} = \frac{a + h\mathbf{t}g\mathbf{a}_x}{L}$$

if $\mathbf{a}_x < 0$

$$C_{vs} = \frac{L - b}{L}, \quad C_{vo} = \frac{h(\mathbf{t}g\mathbf{q} - \mathbf{t}g\mathbf{a}_x)}{L}, \quad C_{vv} = \frac{a + h\mathbf{t}g\mathbf{a}_x}{L}$$

If $s'' < x \leq a$

$$C_{vs} = \frac{L - a - b}{L}, \quad C_{vo} = \frac{b}{L}, \quad C_{vv} = \frac{a}{L}$$

If $a < x \leq L + H\mathbf{t}g\mathbf{a}$,

if $x \geq b$

$$C_{vs} = \frac{L - x}{L}, \quad C_{vo} = 0, \quad C_{vv} = \frac{x}{L}$$

if $x < b$,

$$C_{vs} = \frac{L - a - b}{L}, \quad C_{vo} = \frac{b - x}{L}, \quad C_{vv} = \frac{x}{L}$$

If $L + H\mathbf{t}g\mathbf{a} < x \leq L + h\mathbf{t}g\mathbf{a}$

suppose $\mathbf{t}g\mathbf{a}_x = \frac{L - x + H\mathbf{t}g\mathbf{a}}{H - h}$

if $x \geq b$

$$C_{vs}=0, C_{vo}=\frac{L-x+htga_x}{L}, C_{vv}=1-C_{vo}-C_{vs}$$

if $x < b$

if $-htga_x \geq L-b$

$$C_{vs}=0, C_{vo}=\frac{L-x+htga_x}{L}, C_{vv}=1-C_{vo}-C_{vs}$$

if $-htga_x < L-b$

$$C_{vs}=\frac{L-b+htga_x}{L}, C_{vo}=\frac{L-x-(L-b)}{L}, C_{vv}=1-C_{vo}-C_{vs}$$

If $L+htga < x \leq L$

$$C_{vv}=1, C_{vo}=0, C_{vs}=0$$

Case 5: $a' > 0 \& a < 0 \& a > -a \tan \frac{a}{H}$

If $0 \leq x \leq a + Htga$

Suppose $tga_x = \frac{a + Htga - x}{H - h}$

if $htga_x \geq b - a$

$$C_{vo}=0, C_{vs}=\frac{L-a-htga_x}{L}, C_{vv}=1-C_{vo}-C_{vs}$$

if $htga_x < b - a$

$$C_{vo}=\frac{b-a-htga_x}{L}, C_{vs}=\frac{L-b}{L}, C_{vv}=1-C_{vo}-C_{vs}$$

In the case 5 that the detector locates just over the vegetation, the behavior of fraction changes could be analyzed for two conditions when $x > a + Htga$:

A $-Htga \leq (L-a)$, and

B $-Htga > (L-a)$,

A: If $-Htga \leq (L-a)$

If $a + Htga < x \leq a$,

$$C_{vs}=\frac{L-b}{L}, C_{vo}=\frac{b-a}{L}, C_{vv}=\frac{a}{L}$$

If $Htga' \geq a + htga'$

If $a < x \leq a + htga'$

if $x \geq b$

$$C_{vo}=0, C_{vs}=\frac{L-x}{L}, C_{vv}=1-C_{vo}-C_{vs}$$

if $x < b$

$$C_{vo} = \frac{b-x}{L}, C_{vs} = \frac{L-b}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs}$$

If $a + htga' < x \leq Htga'$

Suppose $tga_{x1} = \frac{Htga' - x - a}{H - h},$

if $x \geq b$

if $htga_x \geq b - a$

$$C_{vo} = 0, C_{vv} = \frac{a + htga_x}{L}, C_{vs} = 1 - C_{vv} - C_{vo}$$

if $htga_x < b - a$

$$C_{vo} = \frac{b - a - htga_x}{L}, C_{vv} = \frac{a + htga_x}{L}, C_{vs} = 1 - C_{vv} - C_{vo}$$

if $x < b$

$$C_{vs} = \frac{L - b}{L}, C_{vv} = \frac{a + htga_x}{L}, C_{vo} = 1 - C_{vs} - C_{vv}$$

If $Htga' < x \leq L + htga$

Suppose $tga_{x1} = \frac{a - (x - Htga')}{H - h}, tga_{x2} = \frac{x - Htga'}{H - h};$

$$C_{vv} = \frac{a + (tga_{x1}' - tga_{x2})h}{L}$$

if $x \geq b$

if $htga_{x1} \geq b - a$

$$C_{vo} = 0, C_{vs} = 1 - C_{vo} - C_{vv}$$

if $htga_{x1} < b - a$

$$C_{vo} = \frac{b - a - htga_{x1}}{L}, C_{vs} = 1 - C_{vo} - C_{vv}$$

if $x < b$

if $-htga_{x2} \geq L - b$

$$C_{vs} = 0, C_{vo} = 1 - C_{vs} - C_{vv}$$

if $-htga_{x2} < L - b$

$$C_{vs} = \frac{L - b + htga_{x2}}{L}, C_{vo} = 1 - C_{vs} - C_{vv}$$

If $L + htga < x \leq L.$

Suppose $tga_x = \frac{a - (x - Htga')}{H - h};$

if $htga_x \geq b - a$

$$C_{vo} = 0, C_{vs} = \frac{x - a - htga_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $htga_x < b - a$

if $x \geq b$

$$C_{vo} = \frac{b-a-h\mathbf{tga}_x}{L}, C_{vs} = \frac{x-b}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $x < b$

$$C_{vo} = \frac{x-a-h\mathbf{tga}_x}{L}, C_{vs} = 0, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

If $H\mathbf{tga}' < a + h\mathbf{tga}'$

If $a < x \leq H\mathbf{tga}'$

if $x \geq b$

$$C_{vo} = 0, C_{vs} = \frac{L-x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs}$$

if $x < b$

$$C_{vo} = \frac{b-x}{L}, C_{vs} = \frac{L-b}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs}$$

If $(H-h)(\mathbf{tga}' - \mathbf{tga}) \geq a$

If $H\mathbf{tga}' < x \leq a + h\mathbf{tga}'$

$$\text{Suppose } \mathbf{tga}_x = \frac{x - H\mathbf{tga}'}{H-h}$$

if $-h\mathbf{tga}_x \geq L-b$

$$C_{vs} = 0, C_{vo} = \frac{L-x+h\mathbf{tga}_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs}$$

if $-h\mathbf{tga}_x < L-b$

if $x \geq b$

$$C_{vo} = 0, C_{vs} = \frac{L-x+h\mathbf{tga}_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs}$$

if $x < b$

$$C_{vs} = \frac{L-b+h\mathbf{tga}_x}{L}, C_{vo} = \frac{b-x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs}$$

If $a + h\mathbf{tga}' < x \leq L + h\mathbf{tga}$

$$\text{Suppose } \mathbf{tga}_{x1} = \frac{a - (x - H\mathbf{tga}')}{H-h}, \mathbf{tga}_{x2} = \frac{x - H\mathbf{tga}'}{H-h};$$

$$C_{vv} = \frac{a + (\mathbf{tga}'_{x1} - \mathbf{tga}_{x2})h}{L}$$

if $x \geq b$

if $h\mathbf{tga}_{x1} \geq b-a$

$$C_{vo} = 0, C_{vs} = 1 - C_{vo} - C_{vv}$$

if $h\mathbf{tga}_{x1} < b-a$

$$C_{vo} = \frac{b-a-h\mathbf{tga}_{x1}}{L}, C_{vs} = 1 - C_{vo} - C_{vv}$$

if $x < b$

if $-h\mathbf{tga}_{x2} \geq L-b$

$$C_{vs} = 0, C_{vo} = 1 - C_{vs} - C_{vv}$$

if $-htga_{x2} < L-b$

$$Cvs = \frac{L-b+htga_{x2}}{L}, Cvo = 1 - Cvs - Cvv$$

If $L+htga < x \leq L$.

Suppose $tgax = \frac{a-(x-Htga')}{H-h},$

if $htgax \geq b-a$

$$Cvo = 0, Cvs = \frac{x-a-htgax}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

if $htgax < b-a$

if $x \geq b$

$$Cvo = \frac{b-a-htgax}{L}, Cvs = \frac{x-b}{L},$$

$$Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

if $x < b$

$$Cvo = \frac{x-a-htgax}{L}, Cvs = 0, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

If $(H-h)(tga'-tga) < a$

If $Htga' < x \leq L+htga'$

Suppose $tgax = \frac{x-Htga'}{H-h};$

if $x \geq b$

$$Cvo = 0, Cvs = \frac{L-x+htgax}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

if $x < b$

if $-htgax \geq L-b$

$$Cvs = 0, Cvo = \frac{L-x+htgax}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

if $-htgax < L-b$

$$Cvs = \frac{L-b+htgax}{L}, Cvo = \frac{b-x}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

if $L+htga < x \leq a+htga'$

$$Cvv = 1, Cvs = 0, Cvo = 0$$

if $a+htga' < x \leq L$

Suppose $tgax = \frac{Htga'-(x-a)}{H-h}$

if $htgax \geq b-a$

$$Cvo = 0, Cvs = \frac{x-a-htgax}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

if $-htgax < b-a$

if $x \geq b$

$$C_{vs} = \frac{x-b}{L}, C_{vo} = \frac{b-h\mathbf{tga}_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $x < b$

$$C_{vs} = 0, C_{vo} = \frac{x-a-h\mathbf{tga}_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

B: If $-H\mathbf{tga} < (L-a)$

If $a + H\mathbf{tga} < x \leq H\mathbf{tga}'$

$$C_{vo} = \frac{b-a}{L}, C_{vs} = \frac{L-b}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

If $(H-h)(\mathbf{tga}' - \mathbf{tga}) \geq a$

If $H\mathbf{tga}' < x \leq a$

Suppose
$$\mathbf{tga}_x = \frac{H\mathbf{tga} + (L-x)}{H-h};$$

If $-\mathbf{tga}_x \leq b$

if $-h\mathbf{tga}_x \geq L-b$

$$C_{vs} = 0, C_{vo} = \frac{L-a+h\mathbf{tga}_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $-h\mathbf{tga}_x < L-b$

$$C_{vs} = \frac{L-b+h\mathbf{tga}_x}{L}, C_{vo} = \frac{b-a}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $-\mathbf{tga}_x > b$

$$C_{vv} = 1, C_{vs} = 0, C_{vo} = 0;$$

If $a < x \leq a + h\mathbf{tga}'$

Suppose
$$\mathbf{tga}_x = \frac{H\mathbf{tga} + (L-x)}{H-h}$$

if $-\mathbf{tga}_x \leq b$

if $x \geq b$

$$C_{vo} = 0, C_{vs} = \frac{L-x+h\mathbf{tga}_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $x < b$

if $-h\mathbf{tga}_x \geq L-b$

$$C_{vs} = 0, C_{vo} = \frac{L-x+h\mathbf{tga}_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $-h\mathbf{tga}_x < L-b$

$$C_{vo} = \frac{b-x}{L}, C_{vs} = \frac{L-b+h\mathbf{tga}_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $-\mathbf{tga}_x > b$

$$C_{vv} = 1, C_{vs} = 0, C_{vo} = 0;$$

if $a + h\mathbf{tga}' < x \leq L + h\mathbf{tga}$

$$\text{Suppose } t\mathbf{g}\mathbf{a}_{x1} = \frac{a - (x - Ht\mathbf{g}\mathbf{a}')}{H - h}, \quad t\mathbf{g}\mathbf{a}_{x2} = \frac{x - Ht\mathbf{g}\mathbf{a}'}{H - h};$$

$$C_{Vv} = \frac{a + (t\mathbf{g}\mathbf{a}'_{x1} - t\mathbf{g}\mathbf{a}_{x2})h}{L}$$

if $x \geq b$

if $ht\mathbf{g}\mathbf{a}_{x1} \geq b - a$

$$C_{Vo} = 0, \quad C_{Vs} = 1 - C_{Vo} - C_{Vv}$$

if $ht\mathbf{g}\mathbf{a}_{x1} < b - a$

$$C_{Vo} = \frac{b - a - ht\mathbf{g}\mathbf{a}_{x1}}{L}, \quad C_{Vs} = 1 - C_{Vo} - C_{Vv}$$

if $x < b$

if $-ht\mathbf{g}\mathbf{a}_{x2} \geq L - b$

$$C_{Vs} = 0, \quad C_{Vo} = 1 - C_{Vs} - C_{Vv}$$

if $-ht\mathbf{g}\mathbf{a}_{x2} < L - b$

$$C_{Vs} = \frac{L - b + ht\mathbf{g}\mathbf{a}_{x2}}{L}, \quad C_{Vo} = 1 - C_{Vs} - C_{Vv}$$

If $L + ht\mathbf{g}\mathbf{a} < x \leq L$.

$$\text{Suppose } t\mathbf{g}\mathbf{a}_x = \frac{a - (x - Ht\mathbf{g}\mathbf{a}')}{H - h};$$

if $ht\mathbf{g}\mathbf{a}_x \geq b - a$

$$C_{Vo} = 0, \quad C_{Vs} = \frac{x - a - ht\mathbf{g}\mathbf{a}_x}{L}, \quad C_{Vv} = 1 - C_{Vs} - C_{Vo}$$

if $ht\mathbf{g}\mathbf{a}_x < b - a$

if $x \geq b$

$$C_{Vo} = \frac{b - a - ht\mathbf{g}\mathbf{a}_x}{L}, \quad C_{Vs} = \frac{x - b}{L}, \quad C_{Vv} = 1 - C_{Vs} - C_{Vo}$$

if $x < b$

$$C_{Vo} = \frac{x - a - ht\mathbf{g}\mathbf{a}_x}{L}, \quad C_{Vs} = 0, \quad C_{Vv} = 1 - C_{Vs} - C_{Vo}$$

If $(H - h)(t\mathbf{g}\mathbf{a}' - t\mathbf{g}\mathbf{a}) < a$

If $L - a \geq -ht\mathbf{g}\mathbf{a}$

If $Ht\mathbf{g}\mathbf{a}' < x \leq a$

$$\text{Suppose } t\mathbf{g}\mathbf{a}_x = \frac{Ht\mathbf{g}\mathbf{a}' + (L - x)}{H - h};$$

if $-ht\mathbf{g}\mathbf{a}_x \geq L - b$

$$C_{Vs} = 0, \quad C_{Vo} = \frac{L - a + ht\mathbf{g}\mathbf{a}_x}{L}, \quad C_{Vv} = 1 - C_{Vs} - C_{Vo}$$

if $-ht\mathbf{g}\mathbf{a}_x < L - b$

$$C_{Vo} = \frac{b - a}{L}, \quad C_{Vs} = \frac{L - b + ht\mathbf{g}\mathbf{a}_x}{L}, \quad C_{Vv} = 1 - C_{Vs} - C_{Vo}$$

If $a < x \leq L + htga$

Suppose $tg\mathbf{a}_x = \frac{Htg\mathbf{a} + (L - x)}{H - h};$

if $x \geq b$

$$Cvo = 0, Cvs = \frac{L - x + htga_x}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

if $x < b$

if $-htga_x \geq L - b$

$$Cvs = 0, Cvo = \frac{L - x + htga_x}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

if $-htga_x < L - b$

$$Cvo = \frac{b - x}{L}, Cvs = \frac{L - b + htga_x}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

If $L + htga < x \leq a + htga'$

$$Cvv = 1, Cvo = 0, Cvs = 0$$

If $a + htga < x \leq L$

Suppose $tg\mathbf{a}_x = \frac{Htg\mathbf{a}' - (x - a)}{H - h}$

if $x \geq b$

if $htga_x \geq b - a$

$$Cvo = 0, Cvs = \frac{x - a - htga_x}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

if $htga_x < b - a$

$$Cvs = \frac{x - b}{L}, Cvo = \frac{b - a - htga_x}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

if $x < b$

$$Cvs = 0, Cvo = \frac{x - a - htga_x}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

If $L - a < -htga$

If $Htg\mathbf{a}' < x \leq L + htga,$

Suppose $tg\mathbf{a}_x = \frac{x - Htg\mathbf{a}'}{H - h};$

if $-tga_x \leq b$

if $-htga_x \geq L - b$

$$Cvs = 0, Cvo = \frac{L - a + htga_x}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

if $-htga_x < L - b$

$$Cvo = \frac{b - a}{L}, Cvs = \frac{L - b + htga_x}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

if $-tga_x > b$

$$Cvv = 1, Cvo = 0, Cvs = 0$$

If $L + htga < x \leq a + htga'$

$$C_{vv}=1, C_{vo}=0, C_{vs}=0$$

If $a + htga' < x \leq L$,

Suppose
$$tga_x = \frac{Htga' - (x - a)}{H - h}$$

if $x \geq b$

if $htga_x \geq b - a$

$$C_{vo}=0, C_{vs} = \frac{x - a - htga_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs}$$

if $htga_x < b - a$

$$C_{vs} = \frac{x - b}{L}, C_{vo} = \frac{b - a - htga_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs}$$

if $x < b$

$$C_{vs}=0, C_{vo} = \frac{x - a - htga_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs}$$

Case 6: $a' \geq 0, a < -a \tan \frac{a}{H}$

In case 6 that the detector locates just over the soil, the behavior of fraction changes could be analyzed under two conditions:

A $-Htga' \leq a$, and

B $-Htga' > a$,

A *If* $Htga' \leq a$:

If $0 \leq x \leq Htga'$

$$C_{vs} = \frac{L - b}{L}, C_{vo} = \frac{b - a}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

If $(H - h)(tga' - tga) \geq a$

If $Htga' < x \leq a + htga'$

Suppose
$$tga_x = \frac{-(x - Htga')}{H - h};$$

if $x \leq a$

if $-htga_x \leq L - b$

$$C_{vs} = \frac{L - b + htga_x}{L}, C_{vo} = \frac{b - a}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $-htga_x > L - b$

$$C_{vs}=0, C_{vo} = \frac{L - a + htga_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $x > a$

if $-htga_x \leq L - b$

if $x \leq b$

$$C_{vs} = \frac{L-b+htga_x}{L}, C_{vo} = \frac{b-x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $x > b$

$$C_{vs} = \frac{L-x+htga_x}{L}, C_{vo} = 0, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $-htga_x > L-b$

$$C_{vs} = 0, C_{vo} = \frac{L-x+htga_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

If $(H-h)(-tga) \geq a$

If $a+htga' < x \leq a+Htga'$

Suppose $tga_{x1} = \frac{a-(x-Htga')}{H-h}, tga_{x2} = \frac{-(x-Htga')}{H-h},$

$$C_{vv} = \frac{a+h(tga_{x1}-tga_{x2})}{L}$$

if $x \geq b$

if $htga_{x1} \geq b-a$

$$C_{vo} = 0, C_{vs} = 1 - C_{vv} - C_{vo}$$

if $htga_{x1} < b-a$

$$C_{vo} = \frac{b-a-htga_{x1}}{L}, C_{vs} = 1 - C_{vv} - C_{vo}$$

if $x < b$

if $-htga_{x2} \geq L-b$

$$C_{vs} = 0, C_{vo} = 1 - C_{vv} - C_{vs}$$

if $-htga_{x2} < L-b$

$$C_{vs} = \frac{L-b+htga_{x2}}{L}, C_{vo} = 1 - C_{vv} - C_{vs}$$

If $a+Htga' < x \leq L+htga$

Suppose $tga_x = \frac{-(x-Htga')}{H-h}$

if $x \geq b$

$$C_{vo} = \frac{b-a}{L}, C_{vv} = \frac{a-htga_x}{L}, C_{vs} = 1 - C_{vv} - C_{vo}$$

if $x < b$

$$C_{vv} = \frac{a-htga_x}{L}, C_{vs} = \max\left[\frac{L-b+htga_x}{L}, 0\right], C_{vo} = 1 - C_{vv} - C_{vs}$$

If $L+htga < x \leq L$

if $x \geq b$

$$C_{vo} = \frac{b-a}{L}, C_{vs} = \frac{x-b}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $x < b$

$$C_{vs} = 0, C_{vo} = \frac{x-a}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs}$$

If $(H-h)(-tga) < a$

If $a + htga' < x \leq L + htga$

Suppose $tga_{x1} = \frac{a - (x - Htga')}{H-h}, tga_{x2} = \frac{-(x - Htga')}{H-h};$

$$C_{vv} = \frac{a + h(tga_{x1} - tga_{x2})}{L}$$

if $x \geq b$

if $htga_{x1} \geq b - a$

$$C_{vo} = 0, C_{vs} = 1 - C_{vo} - C_{vv}$$

if $htga_{x1} < b - a$

$$C_{vo} = \frac{b - a - htga_{x1}}{L}, C_{vs} = 1 - C_{vo} - C_{vv}$$

if $x < b$

if $-htga_{x2} \geq L - b$

$$C_{vs} = 0, C_{vo} = 1 - C_{vs} - C_{vv}$$

if $-htga_{x2} < L - b$

$$C_{vs} = \frac{L - b + htga_{x2}}{L}, C_{vo} = 1 - C_{vs} - C_{vv}$$

if $L + htga < x \leq a + Htga'$

Suppose $tga_x = \frac{a - (x - Htga')}{H-h}$

if $htga \geq b - a$

$$C_{vo} = 0, C_{vs} = \frac{x - a - htga_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $htga < b - a$

if $b \leq x$

$$C_{vo} = \frac{b - a - htga_x}{L}, C_{vs} = \frac{x - b}{L},$$

$$C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $b > x$

$$C_{vo} = \frac{x - a - htga_x}{L}, C_{vs} = 0,$$

$$C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $a + Htga' < x \leq L$

if $x \geq b$

$$C_{vo} = \frac{b - a}{L}, C_{vs} = \frac{x - b}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $x < b$

$$C_{vs} = 0, C_{vo} = \frac{x - a}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs}$$

If $(H-h)(tga'-tga) < a$

If $Htga' < x \leq L + htga$

Suppose $tga_x = \frac{-(x - Htga')}{H-h};$

if $-htga_x \geq L-b$

$$Cvo = \frac{L-a+htga_x}{L}, Cvs = 0, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

if $-htga_x < L-b$

$$Cvo = \frac{b-a}{L}, Cvs = \frac{L-b+htga_x}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

If $L + htga < x \leq a + htga'$

$$Cvv = 1, Cvo = 0, Cvs = 0$$

If $a + htga' < x \leq a + Htga'$

Suppose $tga_x = \frac{Htga' - (x-a)}{H-h}$

if $htga'_x \geq b-a$

$$Cvo = 0, Cvs = \frac{x-a-htga_x}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

if $htga'_x < b-a$

$$Cvs = \frac{x-b}{L}, Cvo = \frac{b-a-htga_x}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

If $a + Htga' < x \leq L$

if $x \geq b$

$$Cvo = \frac{b-a}{L}, Cvs = \frac{x-b}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

if $x < b$

$$Cvs = 0, Cvo = \frac{x-a}{L}, Cvv = 1 - Cvo - Cvs$$

B: $Htga' > a$

If $0 \leq x \leq a$

$$Cvs = \frac{L-b}{L}, Cvo = \frac{b-a}{L}, Cvv = \frac{a}{L}$$

If $Htga' \geq a + htga'$

If $a < x \leq a + htga'$

if $x \geq b$

$$Cvo = 0, Cvs = \frac{L-x}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

if $x < b$

$$Cvo = \frac{b-x}{L}, Cvs = \frac{L-b}{L}, Cvv = 1 - Cvo - Cvs$$

If $a + htga' < x \leq Htga'$

$$\text{Suppose } tga_x = \frac{Htga' - x + a}{H - h},$$

if $x \geq b$

if $htga_{x1} \geq b - a$

$$Cvo = 0, Cvv = a + htga_x, Cvs = 1 - Cvo - Cvv$$

if $htga_{x1} < b - a$

$$, Cvo = \frac{b - a - htga_x}{L}, Cvv = a + htga_x, Cvs = 1 - Cvo - Cvv$$

if $x < b$

$$Cvv = \frac{a + htga_x}{L}, Cvs = \frac{L - b}{L}, Cvo = 1 - Cvs - Cvv$$

If $(H - h)(-tga) \geq a$

If $Htga' < x \leq a + Htga'$

$$\text{Suppose } tga_{x1} = \frac{a - (x - Htga')}{H - h}, tga_{x2} = \frac{-(x - Htga')}{H - h};$$

$$Cvv = \frac{a + h(tga_{x2} - tga_{x1})}{L}$$

if $x \geq b$

if $htga_{x1} \geq b - a$

$$Cvo = 0, Cvs = 1 - Cvo - Cvv$$

if $htga_{x1} < b - a$

$$Cvo = \frac{b - a - htga_{x1}}{L}, Cvs = 1 - Cvo - Cvv$$

if $x < b$

if $-htga_{x2} \geq L - b$

$$Cvs = 0, Cvo = 1 - Cvs - Cvv$$

if $-htga_{x2} < L - b$

$$Cvs = \frac{L - b + htga_{x2}}{L}, Cvo = 1 - Cvs - Cvv$$

If $a + Htga' < x \leq L + htga$

$$\text{Suppose } tga_x = \frac{-(x - Htga')}{H - h}$$

if $x \geq b$

$$Cvo = \frac{b - a}{L}, Cvv = \frac{a - htga_x}{L}, Cvs = 1 - Cvv - Cvo$$

if $x < b$

$$Cvv = \frac{a - htga_x}{L}, Cvs = \max\left[\frac{L - b + htga_x}{L}, 0\right], Cvo = 1 - Cvv - Cvs$$

If $L + htga < x \leq L$

if $x \geq b$

$$Cvo = \frac{b - a}{L}, Cvs = \frac{x - b}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

if $x < b$

$$Cvs = 0, Cvo = \frac{x-a}{L}, Cvv = 1 - Cvo - Cvs$$

If $(H-h)(-tga) < a$

If $Htga' < x \leq L + htga$

Suppose $tga_{x1} = \frac{a - (x - Htga')}{H - h}, tga_{x2} = \frac{-(x - Htga')}{H - h},$

$$Cvv = \frac{a + h(tga_{x1} - tga_{x2})}{L}$$

if $x \geq b$

if $htga_{x1} \geq b - a$

$$Cvo = 0, Cvs = 1 - Cvv - Cvo$$

if $htga_{x1} < b - a$

$$Cvo = \frac{b - a - htga_{x1}}{L}, Cvs = 1 - Cvv - Cvo$$

if $x < b$

if $-htga_{x2} \geq L - b$

$$Cvs = 0, Cvo = 1 - Cvv - Cvs$$

if $-htga_{x2} < L - b$

$$Cvs = \frac{L - b + htga_{x2}}{L}, Cvo = 1 - Cvv - Cvs$$

If $L + htga < x \leq a + Htga'$

Suppose $tga_x = \frac{a - (x - Htga')}{H - h}$

if $htga \geq b - a$

$$Cvo = 0, Cvs = \frac{x - a - htga_x}{L}, Cvv = 1 - Cvo - Cvs$$

if $htga < b - a$

if $b \leq x$

$$Cvo = \frac{b - a - htga_x}{L}, Cvs = \frac{x - b}{L},$$

$$Cvv = 1 - Cvo - Cvs$$

if $b > x$

$$Cvo = \frac{x - a - htga_x}{L}, Cvs = 0,$$

$$Cvv = 1 - Cvo - Cvs$$

If $a + Htga' < x \leq L$

if $x \geq b$

$$Cvo = \frac{b - a}{L}, Cvs = \frac{x - b}{L}, Cvv = 1 - Cvo - Cvs$$

if $x < b$

$$C_{vo} = \frac{x-a}{L}, C_{vs} = 0, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs}$$

If $Htga' < a + htga'$

If $a < x \leq Htga'$

if $x \geq b$

$$C_{vo} = 0, C_{vs} = \frac{L-x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs}$$

if $x < b$

$$C_{vo} = \frac{b-x}{L}, C_{vs} = \frac{L-b}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs}$$

If $(H-h)(tga' - tga) \geq a$

If $Htga' < x \leq a + htga'$

Suppose $tga_x = \frac{-(x - Htga')}{H-h};$

if $x \leq b$

if $-htga_x \geq L-b$

$$C_{vs} = 0, C_{vo} = \frac{L-x+htga_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs}$$

if $-htga_x < L-b$

$$C_{vs} = \frac{L-b+htga_x}{L}, C_{vo} = \frac{b-x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs}$$

if $x > b$

$$C_{vs} = \frac{L-x+htga_x}{L}, C_{vo} = 0, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs}$$

If $(H-h)(-tga) \geq a$

If $a + htga' < x \leq a + Htga'$

Suppose $tga_{x1} = \frac{a-(x-Htga')}{H-h}, tga_{x2} = \frac{-(x-Htga')}{H-h},$

$$C_{vv} = \frac{a+h(tga_{x1}-tga_{x2})}{L}$$

if $x \geq b$

if $htga_{x1} \geq b-a$

$$C_{vo} = 0, C_{vs} = 1 - C_{vv} - C_{vo}$$

if $htga_{x1} < b-a$

$$C_{vo} = \frac{b-a-htga_{x1}}{L}, C_{vs} = 1 - C_{vv} - C_{vo}$$

if $x < b$

if $-htga_{x2} \geq L-b$

$$C_{vs} = 0, C_{vo} = 1 - C_{vv} - C_{vs}$$

if $-htga_{x2} < L-b$

$$C_{vs} = \frac{L-b+htga_{x2}}{L}, C_{vo} = 1 - C_{vv} - C_{vs}$$

If $a + Htga' < x \leq L + htga$

Suppose $tga_x = \frac{-(x - Htga')}{H - h}$

if $x \geq b$

$$Cvo = \frac{b - a}{L}, Cvv = \frac{a - htga_x}{L}, Cvs = 1 - Cvv - Cvo$$

if $x < b$

$$Cvv = \frac{a - htga_x}{L}, Cvs = \max\left[\frac{L - b + htga_x}{L}, 0\right],$$

$$Cvo = 1 - Cvv - Cvs$$

If $L + htga < x \leq L$

if $x \geq b$

$$Cvo = \frac{b - a}{L}, Cvs = \frac{x - b}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

if $x < b$

$$Cvs = 0, Cvo = \frac{x - a}{L}, Cvv = 1 - Cvo - Cvs$$

If $(H - h)(-tga) < a$

If $a + htga' < x \leq L + htga$

Suppose $tga_{x1} = \frac{a - (x - Htga')}{H - h}, tga_{x2} = \frac{-(x - Htga')}{H - h};$

$$Cvv = \frac{a + h(tga_{x1} - tga_{x2})}{L}$$

if $x \geq b$

if $htga_{x1} \geq b - a$

$$Cvo = 0, Cvs = 1 - Cvo - Cvv$$

if $htga_{x1} < b - a$

$$Cvo = \frac{b - a - htga_{x1}}{L}, Cvs = 1 - Cvo - Cvv$$

if $x < b$

if $-htga_{x2} \geq L - b$

$$Cvs = 0, Cvo = 1 - Cvs - Cvv$$

if $-htga_{x2} < L - b$

$$Cvs = \frac{L - b + htga_{x2}}{L}, Cvo = 1 - Cvs - Cvv$$

if $L + htga < x \leq a + Htga'$

Suppose $tga_x = \frac{a - (x - Htga')}{H - h}$

if $htga \geq b - a$

$$Cvo = 0, Cvs = \frac{x - a - htga_x}{L}, Cvv = 1 - Cvs - Cvo$$

if $htga < b - a$

if $b \leq x$

$$C_{vo} = \frac{b - a - htga_x}{L}, C_{vs} = \frac{x - b}{L},$$

$$C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $b > x$

$$C_{vo} = \frac{x - a - htga_x}{L}, C_{vs} = 0,$$

$$C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $a + Htga' < x \leq L$

if $x \geq b$

$$C_{vo} = \frac{b - a}{L}, C_{vs} = \frac{x - b}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $x < b$

$$C_{vs} = 0, C_{vo} = \frac{x - a}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs}$$

If $(H - h)(tga' - tga) < a$

If $Htga' < x \leq L + htga$

Suppose $tga_x = \frac{-(x - Htga')}{H - h};$

if $-htga_x \geq L - b$

$$C_{vo} = \frac{L - a + htga_x}{L}, C_{vs} = 0, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $-htga_x < L - b$

$$C_{vo} = \frac{b - a}{L}, C_{vs} = \frac{L - b + htga_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

If $L + htga < x \leq a + htga'$

$$C_{vv} = 1, C_{vo} = 0, C_{vs} = 0$$

If $a + htga' < x \leq a + Htga'$

Suppose $tga_x = \frac{Htga' - (x - a)}{H - h}$

if $htga'_x \geq b - a$

$$C_{vo} = 0, C_{vs} = \frac{x - a - htga_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $htga'_x < b - a$

$$C_{vs} = \frac{x - b}{L}, C_{vo} = \frac{b - a - htga_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

If $a + Htga' < x \leq L$

if $x \geq b$

$$C_{vo} = \frac{b - a}{L}, C_{vs} = \frac{x - b}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $x < b$

$$C_{vs} = 0, C_{vo} = \frac{x-a}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs}$$

Case 7: $a > -b$, $a' \leq 0$

If $0 \leq x \leq a$

$$\text{Suppose } \mathbf{a}_x = atg \frac{Ht\mathbf{a}' - x}{H - h}$$

if $-htg\mathbf{a}_x \leq L - b$

$$C_{vs} = \frac{L - b + htg\mathbf{a}_x}{L}, C_{vo} = \frac{b - a}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $-htg\mathbf{a}_x > L - b$

$$C_{vo} = \frac{L - a + htg\mathbf{a}_x}{L}, C_{vs} = 0, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

If $a < x \leq L + htg\mathbf{a}$

if $x \geq b$

$$C_{vo} = \frac{b - a}{L}, C_{vv} = \frac{a - htg\mathbf{a}_x}{L}, C_{vs} = 1 - C_{vo} - C_{vv}$$

if $x < b$

if $-htg\mathbf{a}_x \geq L - b$

$$C_{vo} = \frac{L + htg\mathbf{a}_x - x}{L} + \frac{x - a}{L}, C_{vs} = 0, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo} = \frac{a - htg\mathbf{a}_x}{L}$$

if $-htg\mathbf{a}_x < L - b$

$$C_{vo} = \frac{b - a}{L}, C_{vs} = \frac{L - b + htg\mathbf{a}_x}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vo} - C_{vs} = \frac{a - htg\mathbf{a}_x}{L}$$

If $L + htg\mathbf{a} < x \leq L + htg\mathbf{a}'$

if $x \geq b$

$$C_{vo} = \frac{b - a}{L}, C_{vs} = \frac{x - b}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $x < b$

$$C_{vs} = 0, C_{vo} = \frac{x - a}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

If $L + htg\mathbf{a}' < x \leq L$

$$\text{Suppose } \mathbf{a}_2 = atg \frac{Ht\mathbf{a}' + (L - x)}{H - h}$$

if $L - b > -htg\mathbf{a}_2$

$$C_{vo} = \frac{b - a}{L}, C_{vs} = \frac{L - b + htg\mathbf{a}_2}{L}, C_{vv} = 1 - C_{vs} - C_{vo}$$

if $L - b \leq -htg\mathbf{a}_2$

$$C_{vs}=0, C_{vo}=\frac{L-a+htg\mathbf{a}_2}{L}, C_{vv}=1-C_{vs}-C_{vo}$$

Case 8: $\mathbf{a}' > -\mathbf{b} > \mathbf{a} > -atg\left(tg\mathbf{b} + \frac{a}{H}\right)$

Suppose $s' = H(tg\mathbf{b} + tg\mathbf{a}') - htg\mathbf{b}$

If $0 \leq x \leq s'$

$$\text{Suppose } tga_x = \frac{Htg\mathbf{a}' - x}{H - h}$$

if $-htga_x \geq L - b$

$$C_{vs}=0, C_{vo}=\frac{L-a-htga_x}{L}, C_{vv}=1-C_{vs}-C_{vo}$$

if $-htga_x < L - b$

$$C_{vo}=\frac{b-a}{L}, C_{vs}=\frac{L-b-htga_x}{L}, C_{vv}=1-C_{vs}-C_{vo}$$

If $s' < x \leq a$

$$C_{vv}=1, C_{vo}=0, C_{vs}=0$$

If $a < x \leq L + htg\mathbf{a}'$

if $x \geq b$

$$C_{vo}=\frac{b-a}{L}, C_{vs}=\frac{x-b}{L}, C_{vv}=1-C_{vs}-C_{vo}$$

if $x < b$

$$C_{vs}=0, C_{vo}=\frac{x-a}{L}, C_{vv}=1-C_{vs}-C_{vo}$$

$L + htg\mathbf{a}' < x \leq L$

$$\text{Suppose } -tga_x = \frac{-htg\mathbf{a}' - (L-x) - (H-h)tg\mathbf{a}'}{H-h} = \frac{-L+x-Htg\mathbf{a}'}{H-h}$$

if $-htga_x \geq L - b$

$$C_{vo}=\frac{L-a+htga_x}{L}, C_{vo}=\frac{L-a+htga_x}{L}, C_{vs}=0,$$

$$C_{vv}=1-C_{vs}-C_{vo}$$

if $-htga_x < L - b$

$$C_{vo}=\frac{b-a}{L}, C_{vs}=\frac{L+htga_x-b}{L}, C_{vv}=1-C_{vs}-C_{vo}$$

Case 9: $\mathbf{a}' > -\mathbf{b} > -atg\left(tg\mathbf{b} + \frac{a}{H}\right) > \mathbf{a}$

If $0 \leq x \leq a$

$$C_{vv}=1, C_{vo}=0, C_{vs}=0$$

If $a < x \leq L + htg\mathbf{a}'$

if $x < b$

$$C_{vv} = 1 - \frac{x-a}{L}, C_{vo} = \frac{x-a}{L}, C_{vs} = 0$$

if $x \geq b$

$$C_{vs} = \frac{x-b}{L}, C_{vo} = \frac{b-a}{L}, C_{vv} = 1 - \frac{x-a}{L}$$

If $L + htga' < x \leq H(tgb + tga') + a$

$$\text{Suppose } m = L - a - h \left[\frac{-(H-h)tga' + (x - (L + htga'))}{H-h} \right]$$

if $m \leq b - a$

$$C_{vs} = 0, C_{vo} = \frac{m}{L}, C_{vv} = 1 - \frac{m}{L}$$

if $m > b - a$

$$C_{vs} = \frac{b-a}{L}, C_{vo} = \frac{m-(b-a)}{L}, C_{vv} = 1 - \frac{m}{L}$$

If $H(tgb + tga') + a < x \leq L$

$$C_{vv} = 1, C_{vo} = 0, C_{vs} = 0$$

Case 10: $a' \leq -b$

$$C_{vv} = 1, C_{vo} = 0, C_{vs} = 0$$

Appendix B

*8th international symposium of Physical measurements & Signature in Remote Sensing
January 8-12, 2001
Centre Paul Langevin, Aussois, France*

A STUDY OF ANGULAR EFFECTS WITHIN FIELD OF VIEW ON CORN FIELD'S BRIGHTNESS TEMPERATURE EXTRACTION AT LOCAL NOON TIME

T. YU^{1,2}, X.F. GU¹, G. TIAN², J.F. HANOCQ¹, M. LEGRAND³, Q.H. LIU² R., BOSSENO⁴

1. INRA - Unité de Bioclimatologie, France

*2. Laboratory of Remote Sensing Information Sciences,
Institute of Remote Sensing Applications, China*

3. Université des Sciences et Technologies de Lille

4. IRD-Montpellier

ABSTRACT – A simplified 2D structure model was developed to evaluate the errors induced by the angular effect within sample area's field of view (FOV). the model simulated the measurements carried out at night or local noon time or cloud days that there was no shadow component appears in the field. The results shows the errors depend on the viewing zenith and sample area's size. When the detector was at the height 25 times of row spacing, large sample area leads to small errors for most viewing zenith.

1. INTRODUCTION

There have been a number of field experimental studies focus on the directional features of agricultural fields' longwave radiation to help to characterize the heat flux and other agronomic parameters such as soil moisture, leaf stomatal resistances etc.(Kimes et al., 1981, Lagouarde et al. 1995, François et al. 1997, Kustas, et al. 1999, Gu, et al. 2000). The measurement operated from near ground was thought to demonstrate objective's characteristics well, the results were expected to be available widely for different altitude platform observation applications including the developing multi temporal and multi angular satellite systems. However, this expectation would cause concerns in the quantitative analysis when parameters of the measurement from different distances are compared. One of the main factors need to be evaluated is angular effects within the field of view corresponding to definite observe altitudes.

In this research, a simple case was studied that the measurements were conducted at night, local noon time or cloud days when the corn field could be thought contenting only two components: soil with higher temperature and canopy with lower temperature. A modified row crop model from Jackson et al. (1979) was proposed to evaluate sampling size's influence corresponding to different inclined viewing when the measurement is carried out from a definite height. The model allows the calculation of field cover changes which was assumed as the index for assessing the bias caused by the variation of sample area's size and positions.

2. SAMPLING DECISION AND CALCULATION OF THE ERRORS CAUSED BY ANGULAR EFFECTS WITHIN THE FIELD OF VIEW

To investigate the sampling for angular variation extraction from images obtained at definite altitude, the sample area's size need to be considered. As a typical row canopies planted machinery, corn field's periodic geo structure allow an area contents one row of canopy and soil as a minimum unit to construct the whole field in geometry. Such minimum unit has constant component proportions of illuminated/shadowed soil and leaves (Kimes 1983) for a particular solar and viewing direction, which represents the thermal radiation of the whole field. In the study, only the sample areas that content integer times of the minimum unit were evaluated.

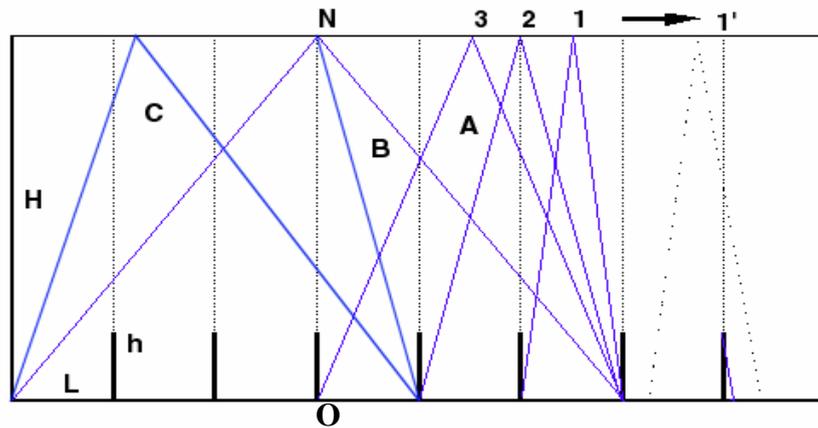


Fig1 Scheme of three simulation, case A: viewing zenith is zero; case B and C: off and near nadir viewing.

For the measurements carried out at night, local noon time or cloud days, there was no shadow component appears in the field which could be simplified to content only two component: soil and plant. The evaluation model was designed to calculate cover change corresponding to different view zenith and sample size to show the angular effect within FOV of images. Compare with Jackson et al. (1979) 's row crops model, the modified one supposes the width of the rectangular solid plant and solar zenith to be zero or no insight sun light so that the field's cover is zero for nadir viewing and there is no shadow parts in the field was caused by the insight solar shining. Moreover, each field's components was supposed a unique temperature value respectively, their angular characteristics of radiation in thermal band are not considered. So, the calculation of the cover proportions for different viewing angle degenerates to a function of camera's height, row spacing, row height, sample area's size and view direction.

To find sample area position's influence, the model simulates the cover error changes when the detector moves forward or backward horizontally along the axe vertical to the rows direction. Three cases were evaluated respectively to deal with nadir looking observation (Figure 1, A), off nadir observation with the sample area is at one side of camera's foot print (Figure 1, B), and near nadir observation with the sample area is just under camera's foot print (Figure 1, C).

As shown in Figure1 for case A, the camera is located at the top of triangular with a height of H, it's foot print locates in the middle of sample area, left part and right part are of symmetry, there are integer times of row spacing (L) from one to N inside the scope. The corn plants has a height of h with no width. Because of field's symmetry structure when viewing from nadir point, the moving distance x has a range of $[0, 0.5L]$ instead of $[0, L]$ to evaluate position's influence. If the row number within the sample area $N < \frac{H}{h}$, the canopy fraction C_v observed by camera in different position vertical to row directions is calculated as:

$$Cv(x, N) = 0.5 - \frac{\frac{NL}{2} - x}{\Delta q} + \sum_{i=1}^{N-1} \left| E(x, \frac{N}{2} - i) \right|, \quad x \in [0, h \tan(\frac{\Delta q}{2})] \quad (2.1)$$

$$Cv(x, N) = \sum_{i=0}^{N-1} \left| E(x, \frac{N}{2} - i) \right|, \quad x \in (h \tan(\frac{\Delta q}{2}), \frac{L}{2}]$$

where

$$E(x, m) = \frac{atg \frac{mL - x}{H - h} - atg \frac{mL - x}{H}}{\Delta q} \quad x \in [0, \frac{L}{2}]$$

If the camera's height $H < Nh$, another target scene appears, which is not discussed in this research.

For the cases B and C that the camera's viewing is offset from the nadir position, the field's symmetry scenes disappear which leads the range of observe distance from $[0, 0.5L]$ to $[0, L]$. We suppose the camera's foot print is the original point O, field of view $\Delta\theta$ is calculated from the difference of the sample area's maximum value of inclination θ' and the minimum value of inclination θ of the scene:

$$\Delta\theta = \theta' - \theta, \quad \tan \mathbf{q} = \frac{S}{H}, \quad \text{and} \quad \tan \mathbf{q}' = \frac{S + kL}{H};$$

where S is the shortest distance between point O and the sample area, k is the number of rows within the sample area. The average value of θ and θ' is assumed to be the viewing zenith θ_1 in ideal conditions which represents this sample's inclination zenith. The corresponding ideal cover Cv_1 is:

$$Cv_1 = \frac{h \tan \mathbf{q}_1}{L};$$

$$\text{when } \tan \mathbf{q}_1 \geq \frac{L}{h}, \quad Cv_1 = 1.$$

In the case B, if there is one row within the sample area and H is greater than h, the cover Cv, observed from the start of row spacing to the end, has different express formations corresponding to the viewing zenith:

$$(1) \quad \mathbf{q} \geq 0 \text{ and } \tan \mathbf{q}' < \frac{L}{h}, \text{ that } \tan \mathbf{q} \in [0, (\frac{1}{h} - \frac{1}{H})L] \text{ and } n < \frac{H}{h} - 1, \text{ Cv is given by} \quad (2.2)$$

$$Cv(x, \theta_1, 1) = 1 - A(x, 1, 0) + A(x, 0, 1) \quad x \in [0, h \tan \mathbf{q}]$$

$$Cv(x, \theta_1, 1) = \frac{\mathbf{q}'}{\Delta \mathbf{q}} - A(x, 1, 0) \quad x \in [h \tan \mathbf{q}, h \tan \mathbf{q}']$$

$$Cv(x, \theta_1, 1) = A(x, 1, 1) - A(x, 1, 0) \quad x \in [h \tan \mathbf{q}', L]$$

Where

$$A(x, a, b) = \frac{a \tan \frac{S - x + aL}{H - bh}}{\Delta \mathbf{q}}, \quad x \in [0, L]; \quad a=0, 1; \quad \text{and} \quad b=0, 1;$$

$$(2) \quad \tan \mathbf{q} < \frac{L}{h} \text{ and } \tan \mathbf{q}' > \frac{L}{h}, \text{ that } \tan \mathbf{q} \in [(\frac{1}{h} - \frac{1}{H})L, \frac{L}{h}] \text{ and } \frac{H}{h} - 1 \leq n < \frac{H}{h}, \text{ Cv is given by} \quad (2.3)$$

$$Cv(x, \theta_1, 1) = 1 \quad x \in [0, h \tan \mathbf{q}' - L]$$

$$Cv(x, \theta_1, 1) = 1 - A(x, 1, 0) + A(x, 0, 1) \quad x \in [h \tan \mathbf{q}' - L, h \tan \mathbf{q}]$$

$$Cv(x, \theta_1, 1) = \frac{\mathbf{q}'}{\Delta \mathbf{q}} - A(x, 1, 0) \quad x \in [h \tan \mathbf{q}, L]$$

- (3) $\tan \mathbf{q} \geq \frac{L}{h}$, only the vegetation can be viewed, so that Cv is a constant of 1, the position of sample has no influence on the result.

When the scene in the view of field covers more than one rows, Cv could be derived from the weight average of every row's performance. If each of the row's θ is greater than $\text{atg}(\frac{L}{h})$, all the soil components were shadowed by canopies, the coverage fraction is 1. If the sample area contents one row whose number is nth, it's $\tan\theta$ value is greater than $\frac{L}{h}-1$ but less than $\frac{L}{h}$, the sample area can be divided into three parts at most, for the row whose number is greater than n, Cv is a constant of 1; for the row whose number equals to n, equation 2.3 can be used; for the rows whose number is less than n, Cv can be derived from equation 2.2. Finally, the weighted average was calculated as the whole sample area's Cv value. If each of the row's θ' within the FOV is less than $\text{atg}(\frac{L}{h})$ the equations for Cv of N rows inside the scene are expressed simply as:

$$\begin{aligned} \text{Cv}(x, \theta, N) &= 1 - A(x, N, 0) + A(x, 0, 1) + \sum_{i=1}^{N-1} (A(x, i, 1) - A(x, i, 0)) & x \in [0, h \tan \mathbf{q}] & (2.4) \\ \text{Cv}(x, \theta, N) &= \frac{\mathbf{q}'}{\Delta \mathbf{q}} - A(x, N, 0) + \sum_{i=1}^{N-1} (A(x, i, 1) - A(x, i, 0)) & x \in [h \tan \mathbf{q}, h \tan \mathbf{q}'] \\ \text{Cv}(x, \theta, N) &= \sum_{i=1}^N (A(x, i, 1) - A(x, i, 0)) & x \in [h \tan \mathbf{q}', L] \end{aligned}$$

For the case C that the sample area is on the two side of camera's foot print Q, the weighted average method was also be used. Each row's cover change can be evaluated by equation 2.2 and 2.3 except one that just under the camera's footprint point. We set this row's field of view is $\Delta\theta$, calculated from the sample's maximum value θ' (>0) minus the minimum value θ (<0). This row's Cv is given by

$$\begin{aligned} \text{Cv}(x, 1) &= \frac{\mathbf{q}' - \text{atg} \frac{H \tan \mathbf{q}' - x}{H}}{\Delta \mathbf{q}} & x \in [0, h \tan \mathbf{q}'] & (2.5) \\ \text{Cv}(x, 1) &= \left| \frac{\text{atg} \frac{H \tan \mathbf{q}' - x}{H - h} - \text{atg} \frac{H \tan \mathbf{q}' - x}{H}}{\Delta \mathbf{q}} \right| & x \in [h \tan \mathbf{q}', L + h \tan \mathbf{q}] \\ \text{Cv}(x, 1) &= \left| \frac{\mathbf{q} - \text{atg} \frac{H \tan \mathbf{q}' - x}{H}}{\Delta \mathbf{q}} \right| & x \in [L + h \tan \mathbf{q}, L] \end{aligned}$$

For the case that sample is at other directions instead of nadir or axe vertical to the rows, the scenes would be more complex. In this research, the sample areas were also selected to content integer times of the minimum unit. For the sample of any position with zenith and azimuth of (\mathbf{y}, \mathbf{j}) , we simplify the Cv behavior to have a feature of cover change according to different position similar with that of the sample at zenith equals to $a \tan(\tan \mathbf{y} \sin \mathbf{j})$ on the axe vertical to the rows, where they share the same value of coverage fraction.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The input data of measuring system and field's geo structure for the model are as follows: Camera's height (H): 20 meters; Row spacing (L): 0.8 meter; Plant's height (h): 0.6 meter; Sample area's size: integer times of row spacing (1L, 2L, 3L,...NL).

Figure 2 shows the coverage errors caused by the sampling size and viewing position's changes for nadir views when camera moves within a distance of one row spacing. When there is one row in the FOV and the camera is just over the canopy, coverage is zero and there isn't error caused. When camera moves to other place, the cover value would be enlarged corresponding to the zenith angle's increase. When the field of view contents more than one spacing rows, shadows emerge unavoidably no matter of the camera's position. The bias increases steadily according to the number of the rows in FOV.

Figure 3 shows the cover fraction with the viewing zenith of 30°. The symmetry feature for nadir viewing disappears, the cover lines fluctuate around ideal cover value which is calculated from the zenith of inclination viewing, cover's bias turns to stable with the increase of sample area's size, smaller sample's cover bias seems more sensitive to its sample position. Compare with the vertical observation, the lines show a more complicate scene: with the enlarge of FOV, the amplitude of the curves turn to decline at first, then increase continuously, and the variety range is smaller than that of nadir view. This indicates the same size of sample areas could induce different level of errors according to viewing zenith's changes while cover errors caused by angular effect within field of view exist through all range of sample size for the observation from definite height. The only method to decrease this bias is hanging the camera higher.

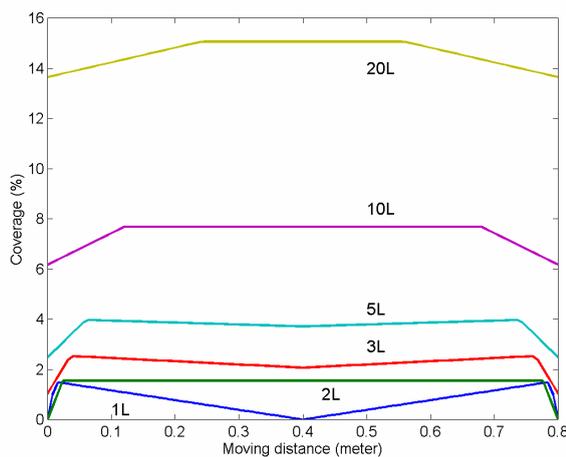


Fig. 2 Cover fraction changes with different viewing position for vertical observation

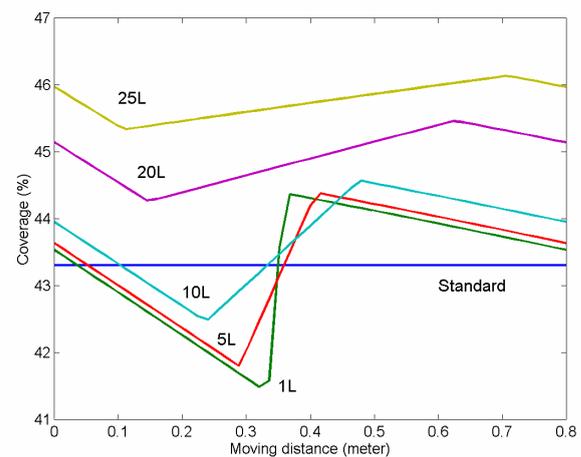


Fig. 3 Cover fraction changes with different viewing position for 30° oblique observation

Figure 4 shows the cover fraction errors caused by sample size and viewing position's changes for different viewing zenith. The maximum absolute value of the difference of cover line minus ideal cover value were selected to represent the error induced by angle effect within the field of view. In nadir viewing, the error increase quickly with the sampling size's enlargement. If the sample area is of $4.8 \times 4.8 \text{ m}^2$ with a FOV less than 15° , 6 times of the minimum size's length, the cover error will larger than 4.5% which can cause 1.2°C less estimation for the corn field with a cover fraction of 0.25 and soil's temperature is 50°C and plant's temperature is 25°C respectively. For large oblique viewing, the errors maintain a constant value that less than 2% for all the test sample sizes. Factually, if the sample area's size is $12 \times 12 \text{ m}^2$, 15 times of the minimum size's length, the error caused by the angular effect within the FOV would also less than 2% when the viewing zenith is greater than 15° . The reason that the errors turn to smaller with the sample size's increase is compensation effect. For the same ideal viewing inclination (the middle value of FOV angle), the increase of sample size would enlarge the angle of FOV, the upper part of FOV, which has a larger

zenith value than the ideal angle, could over estimate the cover fraction, while for the lower part, which has a smaller value compare with the ideal zenith, would less estimate the cover fraction. The two parts compensate each other which lead to a low bias for large oblique viewing. For the zenith larger than zero but smaller to keep all the field of view in one side of the camera's footprint, the error will be between the upper two conditions.

Figure 5 shows the compensation effect vary with the sample size and viewing zenith. This parameter was calculated by averaging absolute value of the difference between each row's cover and that of ideal condition. For same sample size, the smaller zenith leads to a high compensate ratio. For the same inclination angle, the more rows in the field of view, the higher degree of compensation. If there is a shadow component in the field when measuring at the day time, the soil component be divided into two parts of bright soil and shadow soil, the cover fraction could no longer be thought the index of angular effect within the field of view. More accurate criterion need to be found for this case.

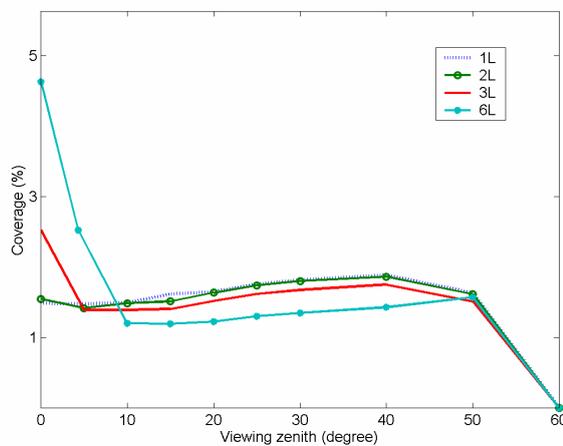


Fig. 4 The error range of coverage according to different viewing zenith and sample area's size

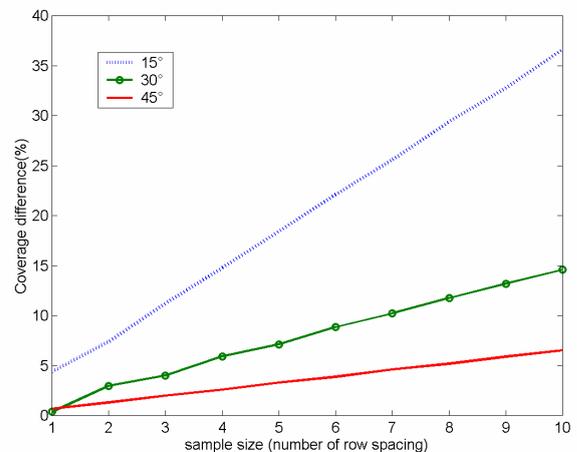


Fig.5 The percentage of coverage compliment ratio for different viewing zenith and sample area's size

5. CONCLUSION

The model for the analysis of errors within field of view outlined here expresses the measuring geometry, sample's size and viewing zenith's influence. Despite of it's simplification, the model demonstrate the system errors caused by the definite height of detector, which can only be minimized by prolong the distance between the camera and the objects. In the conditions that there isn't a shadow component in the field, for example in night and cloudy day measurement, or at local noon time, the cover fraction can be assumed to be an index to show the errors change. The results indicate the errors depend on the viewing zenith and sample area's size. When the detector is at the height of 25 times of row spacing, small errors appear for most viewing zenith and viewing FOV. There remains for future work that modeling for more complex scenes that consist of plant's shadows and finding a more accurate index corresponding to the field's real feature.

6. REFERENCES

- François, C., Ottlé, C., Prévot, L. (1997). "Analytical parameterization of canopy directional emissivity and directional radiance in the thermal infrared. Application on the retrieval of soil and foliage temperature using two directional measurements." *International Journal of Remote Sensing* 12: 2587-2621.
- Gu, X. F., F. Jacob, J. F. Hanocq, T. Yu, Q. H. Liu², L. Prévot, G. L. Tian, X. W. Li (2000). "Measuring and analyzing of thermal infrared emission directionality over crop canopies with an

airborne wide-angle thermal IR camera.” EGS General Assembly, Nice France.

Jackson, R. D., Reginato R. J., Pinter P. J. Jr, Idso S. B. (1979). “Plant canopy information extraction from composite scene reflectance of row crops.” Applied Optics 18: 3775-3782.

Kimes, D. S., Smith J. A., Link L. E. (1981). “Thermal IR exitance of a plant canopy.” Applied optics 20(623-632).

Kimes, D. S., Kirchner J. A. (1983). “Directional radiometric measurements of row-crop temperatures.” International Journal of remote sensing 4: 299-311.

Kustas, W. P., Norman John M. (1999). “Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover.” Agricultural and forest meteorology 94: 13-29.

Lagouarde, J. P., Kerr Y. H., Brunet Y. (1995). “An experimental study of angular effects on surface temperature for various plant canopies and bare soils.” Agricultural and forest meteorology 77: 167-190.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahmad, S.P. and Deering, D.W., 1992. A simple analytical function for bidirectional reflectance. *Journal of Geophysical Research*, 97: 18867-18886.
- Anthoni, P.M., Beverly, E.L., Michael, H.U. and Richard, J.V., 2000. Variation of net radiation over heterogeneous surface: measurements and simulation in a juniper-sagebrush ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 102: 275-286.
- Asrar, G., 1989. Theory and applications of optical Remote Sensing. John Wiley & Sons.
- Baret, F., 1999. ReSeDA: Assimilation of Multisensor & Multitemporal Remote Sensing data to monitor vegetation and soil functioning. Second edition.
- Barton I.J., A.M. Zavody, et al., 1989. Theoretical Algorithms for Satellite-Derive Sea Surface Temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 94(D3): 3365-3375.
- Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A. and Holtslag, A.A.M., 1998. A Remote Sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). I : formulation. *Journal of Hydrology*, **212-213**: 198-212.
- Bastiaanssen, W.G.M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J.F., Roerink, G.J. and Van der Tal, T., 1998. A Remote Sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). II : validation. *Journal of Hydrology*, **212-213**: 213-232.
- Becker, F. and Li, Z.L., 1994. Surface temperature and emissivity at various scales: definition, measurement and related problems. Proceedings of the Workshop on thermal Remote Sensing of the energy and water balance over vegetation in conjunction with other sensors, La Londe les Maures, France, A. Vidal et al. Ed., France(35-60).
- Becker, F., 1987. The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from a satellite. *International Journal of Remote Sensing*, 10: 1509-1522.
- Ben-Dor, E. and Saaroni, H., 1997. Airborne video thermal radiometry as a tool for monitoring microscale structure of the urban heat island. *International Journal of Remote Sensing*, 18(14): 3039-3053.
- Bian, L. and Butler, R., 1999. Comparing effects of aggregation methods on statistical and spatial properties of simulated spatial data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65(1): 73-84.
- Bréon, F.M., Vanderbilt, V., Leroy, M., Bicheron, P., Walthall, C.L. and Kalshoven, J.E., 1997. Evidence of hot spot directional signature from airborne POLDER measurements. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 35(2): 479-484.
- Brutsaert, W., 1975. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. *Water Resource Research*, 11: 742-744.
- Carlson, T.N., 1986. Regional scale estimates of surface moisture availability and thermal inertia. *Remote Sensing Review*, 1: 197-247.
- Carlson, T.N., Gilles, R.R. and Perry, E., 1994. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, 9: 161-173.

- Chedin A., N.A. Scott, et al., 1982. A Single-Channel, Double-Viewing Angle Method for Sea Surface Temperature Determination from Coincident METEOSAT and TIROS-N Radiometric Measurements. *Journal of Applied Meteorology*, 21(4): 613-618.
- Chen, J.M. and Cihlar, J., 1995. Plant canopy gap size analysis theory for improving optical measurements of leaf area index. *Applied Optics*, 34: 6211-6222.
- Chen, J.M. and Leblanc, S.G., 1997. A four-scale bidirectional reflectance model based on canopy architecture. *IEEE transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 35(5): 1316-1337.
- Chen, J.M. and Zhang, R.H., 1989. Studies of the measurements of crop emissivity and sky temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 49: 23-34.
- Chen, J.M., 1992. Foliage area and architecture of plant canopies from sunfleck size distributions. *Agricultural and forest Meteorology*, 50: 249-266.
- Chen, J.M., 1999. Spatial scaling of a remotely sensed surface parameter by contexture. *Remote Sensing of the Environment*, 69: 30-42.
- Clawson, K.L. and Blad, B.L., 1982. Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. *Agronomy Journal*, 74: 311-316.
- Collins, J.B. and Woodcock, C.E., 1999. Geostatistical estimation of resolution-dependent variance in remotely sensed images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65(1): 41-50.
- Combe, L. and Picard, D., 1994. Elaboration du rendement des principales cultures annuelles. INRA editions., Paris.
- Crawford, T.M. and Claude, E.D., 1999. An improved parameterization for estimating effective atmospheric emissivity for use in calculating daytime downwelling longwave radiation. *Journal of Applied Meteorology*, 38(4): 474-480.
- Cresswell, M.P., Morse, A.P., Thomson, M.C. and Connor, S.J., 1999. Estimating surface air temperatures from Meteosat land surface temperatures using an empirical solar zenith angle model. *International Journal of Remote Sensing*, 20(6): 1125-1132.
- Curran, P.J., 1988. The semivariogram in Remote Sensing: an introduction. *Remote Sensing of the Environment*, 24: 493-507.
- Dauzat, J., Rapidel, B. and Berger, A., 2001. Simulation of leaf transpiration and sap flow in virtual plants: description of the model and application to a coffee plantation in Costa Rica. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109: 143-160.
- Deering, D.W., 1990. Bidirectional reflectances of selected desert surfaces and their three-parameter soil characterization. *Agricultural and Forest Meteorology*, 52: 71-93.
- Deering, D.W., E. M. Diddleton and J. R. Irons, 1992. Prairie grassland bidirectional reflectances measured by different instruments at the FIFE site. *Journal of Geophysical Research*, 97(D17): 18,887-18,903.
- Drouet, J.L. and B. Mouliat, 1997. Spatial re-orientation of maize leaves affected by initial plant orientation and density. *Agricultural and Forest Meteorology*, 88: 85-100.
- Emerson, C.W., Nina, S.-N.L. and Dale, A.Q., 1999. Multi-scale fractal analysis of image texture and pattern. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65(1): 51-61.

- Espana Boquera, M.L., 1997. Simulation de la variation temporelle, directionnelle et spectrale de la réflectance de cultures de maïs à partir d'un modèle dynamique de la structure 3D du couvert, Université de Marne-la-Vallée.
- Espana Boquera, M.L., Baret, F., Chelle, M., Aries, F. and Andrieu, B., 1998. A dynamic model of maize 3D architecture: application to the parameterization of the clumpiness of the canopy. *Agronomie*, 18: 609-626.
- Forrest, G.H. and Karl, F.H., 1992. Satellite Remote Sensing of surface energy balance: success, failures, and unresolved issues in FIFE. *Journal of Geophysical Research*, 97(D17): 19061-19089.
- François, C., Ottlé, C. and Prévot, L., 1997. Analytical parameterization of canopy directional emissivity and directional radiance in the thermal infrared. Application on the retrieval of soil and foliage temperature using two directional measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 12: 2587-2621.
- Friedl, M.A. and Davis, F.W., 1994. Sources of variation in radiometric surface temperature over a tall grass prairie. *Remote Sensing of the Environment*, 48: 1-17.
- Friedl, M.A., Davis, F.W., Michaelzen, J. and Moritz, M.A., 1995. Scaling and uncertainty in the relationship between the NDVI and land surface biophysical variables: an analysis using a scene simulation model and data from FIFE. *Remote Sensing of the Environment*, 54: 233-246.
- Ganis, A., 1997. Radiation transfer estimate in a row canopy: a simple procedure. *Agricultural and Forest Meteorology*, 88: 67-76.
- Gastellu-Etchegorry, J.P., Gascon, F., Demarez, V., Lefevre, M.J., Guillevic, P., Benech, N. and Mathiaud, V., 2001. DART: a 3-D model of satellite images and surface radiation budget. In: CNES (Editor), 8th international symposium on Physical measurements & signatures in Remote Sensing. CNES, 8-12 January, Aussois France, pp. 369-373.
- Gijzen, H. and Goudriaan, J., 1989. A flexible and explanatory model of light distribution, photosynthesis in row crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 48: 1-20.
- Gu, X.F., 1991. Etalonnage et intercomparaison des données satellitaires en utilisant le site test de la crau, l'université Paris VII.
- Gu, X.F., Guyot, G. and Verbrugge, M., 1992. Evaluation of measurement errors in ground surface reflectance for satellite calibration. *International Journal of Remote Sensing*, 13(14): 2531-2546.
- Gu, X.F., Jacob, F., Hanocq, J.F., Yu, T., Liu, Q.H., Prévot, L., Tian, G.L. and Li, X.W., 2000. Measuring and analyzing of thermal infrared emission directionality over crop canopies with an airborne wide-angle thermal IR camera. EGS, Nice.
- Guillevic P., 1999. Modélisation des bilans radiatifs et énergétique des couverts végétaux. Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse: 181 pp.
- Hall, F.C., Huemmrich, K.F., Goetz, S.J., Sellers, P.J. and Nickeson, J.E., 1992. Satellite Remote Sensing of surface energy balance: success, failures and unresolved issues in FIFE. *Journal of Geophysical Research*, 97: 19061-19090.
- Hamlyn, G.J., 1999. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95: 139-149.
- Hay, G.J., Niemann, K.O. and Goodenough, D.G., 1997. Spatial threshold, image-objects, and upscaling: a multiscala evaluation. *Remote Sensing of the Environment*, 62: 1-19.

- Heilman, J.L., Heilman, W.E. and Moore, D.G., 1981. Remote Sensing of canopy temperature at incomplete cover. *Journal of Agronomy*, 73: 403-406.
- Herve, S., 1989. Modélisation de l'interception des rayonnements solaires dans une culture en rangs 1. Aspects théoriques. *Agronomie*, 9: 125-135.
- Herve, S., 1991. Estimating the three-dimensional geometry of a maize crop as an input of radiation models: comparison between three-dimensional digitizing and plant profiles. *Agricultural and Forest Meteorology*, 55: 233-249.
- Ibanez, M., 1999. Estimation of the latent heat flux over full canopy covers from the radiative temperature. *Journal of Applied Meteorology*, 38(4): 423-431.
- Idso, S.B. and Jackson, R.D., 1968. Significance of fluctuations in sky radiant emittance for infrared thermometry. *Agronomy Journal*, 60: 388-392.
- Idso, S.B., 1981. A set of equations for full spectrum and 8 to 14 μ m and 10.5 to 12.5 μ m thermal radiation from cloudless skies. *Water Resource Research*, 17: 295-392.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J.J., Reginato, R.J. and Hatfield, J.L., 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural and Forest Meteorology*, 24: 45-55.
- Inframetrics, 1991. Model 760 operator's manual, Inframetrics Inc.
- Jackson, J.E. and Palmer, J.W., 1979. A simple model of light transmission and interception by discontinuous canopies. *Annals of Botany*, 44: 381-383.
- Jackson, R.D., 1985. Evaluating evapotranspiration at local and regional scales. Proceedings of the I.E.E.E., 73: 1086-1096.
- Jackson, R.D., Moran, M.S., Gay, L.W. and Raymond, L.H., 1987. Evaluating evaporation from field crops using airborne radiometry and ground-based meteorological data. *Irrigation Science*, 8: 81-90.
- Jackson, R.D., Reginato, R.J., Pinter, P.J.J. and Idso, S.B., 1979. Plant canopy information extraction from composite scene reflectance of row crops. *Applied Optics*, 18: 3775-3782.
- Jacob, J., 2000. Utilisation de la télédétection courtes longueurs d'onde et infrarouge thermique à haute résolution spatiale pour l'estimation des flux d'énergie à l'échelle de la parcelle agricole, L'Université Toulouse III.
- Jupp, D.L.B., Strahler, A.H. and Woodcock, C.K., 1988. Autocorrelation and regularization in digital images I. basic theory. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26(4): 463-473.
- Jupp, D.L.B., Strahler, A.H. and Woodcock, C.K., 1989. Autocorrelation and regularization in digital images II. simple image models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27(3): 247-258.
- Kimes, D.S. and Kirchner, J.A., 1982. Radiative transfer model for heterogeneous 3-D scenes. *Applied Optics*, 21: 4119-4129.
- Kimes, D.S. and Kirchner, J.A., 1983. Directional radiometric measurements of row-crop temperatures. *International Journal of Remote Sensing*, 4: 299-311.
- Kimes, D.S. and Smith, J.A., 1980. Simulation of solar radiation absorption in vegetation canopies. *Applied Optics*, 19: 2801-2811.

- Kimes, D.S., 1980. Effects of vegetation canopy structure on remotely sensed canopy temperatures. *Remote Sensing of the Environment*, 10(165-174).
- Kimes, D.S., 1981. Azimuthal radiometric temperature measurements of wheat canopies. *Applied Optics*, 20(7): 1119-1121.
- Kimes, D.S., 1981. Remote Sensing of temperature profiles in vegetation canopies using multiple view angle and inversion techniques. *IEEE Trans. Geoscience. Remote Sensing*, GE-19(2): 85-90.
- Kimes, D.S., 1983. Remote Sensing of row crop structure and component temperatures using directional radiometric temperatures and inversion technique. *Remote Sensing of the Environment*, 13: 33-55.
- Kimes, D.S., Idso, S.B., Pinter, P.J.J., Reginato, R.J. and Jackson, R.D., 1980. View angle effects in the radiometric measurement of plant canopy temperatures. *Remote Sensing of the Environment*, 10: 273-284.
- Kimes, D.S., Kerber, A.G. and Sellers, P.J., 1993. Spatial averaging errors in creating hemispherical reflectance (albedo) maps from directional reflectance data. *Remote Sensing of the Environment*, 45: 85-94.
- Kimes, D.S., Smith, J.A. and Link, L.E., 1981. Thermal IR exitance of a plant canopy. *Applied Optics*, 20(623-632).
- Kustas, W.P. and Norman, J.M., 1999. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94: 13-29.
- Kustas, W.P., 1990. Ground and aircraft infrared observations over a partially-vegetated area. *International Journal of Remote Sensing*, 11: 409-427.
- Kustas, W.P., Choudhury, B.J., Moran, M.S., Reginato, R.J., Jackson, R.D., Gay, L.W. and Weaver, H.L., 1989. Determination of sensible heat flux over sparse canopy using thermal infrared data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 68: 93-105.
- Kuusk, A., 1985. The hot spot effect of a uniform vegetative cover. *Sov. Journal of Remote Sensing*, 3: 645-658.
- Lagouarde, J.P., Dubreton, S., Moreau, P. and Guyon, D., 1997. Analyse de l'ergodicité e la température de surface sur des couverts forestiers à diverses résolutions spatiales. In Proc. 7th Symp. Physical Measurements and signatures in Remote Sensing (G. Guyot and T. Phulpin, Eds.), A. A. Balkema, Rotterdam,: 303-310.
- Lagouarde, J.P., Kerr, Y.H. and Brunet, Y., 1995. An experimental study of angular effects on surface temperature for various plant canopies and bare soils. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77: 167-190.
- Lagouarde, L.P., Ballans, H., Moreau, P., Guyon, D. and Coraboeuf, D., 2000. Experimental study of brightness surface temperature angular variations of maritime pine(*pinus pinaster*) stands. *Remote Sensing of the Environment*, 72: 17-34.
- Lhomme, J.P., Monteny, B. and Amadou, M., 1994. Estimating sensible heat flux from radiometric temperature over sparse millet. *Agricultural and Forest Meteorology*, 68: 77-91.
- Lhomme, J.P., Monteny, B., Chehbouni, A. and Troufleau, D., 1994. Determination of sensible heat flux over Sahelian fallow savannah using infra-re thermometry. *Agricultural and Forest Meteorology*, 68: 93-105.

- Li, S., Kurata, K. and Takakura, T., 2000. Direct solar radiation penetration into row crop canopies in a lean-to greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100: 243-253.
- Li, X.W. and Strahler, A.H., 1988. Modeling the gap probability of a discontinuous vegetation canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26(2): 161-170.
- Li, X.W. and Strahler, R.A.H., 1992. Geometrical-optical modeling of the discrete-crown vegetation canopy: Effect of crown shape and mutual shadowing. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, GE-30: 276-292.
- Li, X.W., Strahler, A.H. and Friedl, M.A., 1999. A conceptual model for effective directional emissivity from nonisothermal surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(5): 2508-2517.
- Li, X.W., Strahler, A.H. and Woodcock, C.E., 1995. A hybrid geometric optical-radiative transfer approach for modelling albedo and directional reflectance of discontinuous canopies. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2): 466-480.
- Li, Z.R. and McDonnell, M.J., 1988. Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1: 107-121.
- Luquet, D., 2002. Suivi de l'état hydrique des plantes par infrarouge thermique, Institut national agronomique Paris-Grignon.
- Marceau, J.D., Howarth, P.J. and Gratton, D.J., 1994. Remote Sensing and the measurement of geographical entities in a forested environment 1. the scale and spatial aggregation problem. *Remote Sensing of the Environment*, 49: 93-104.
- Marceau, J.D., Howarth, P.J. and Gratton, D.J., 1994. Remote Sensing and the measurement of geographical entities in a forested environment 2. The optimal spatial resolution. *Remote Sensing of the Environment*, 49: 105-117.
- McGuire, M.J., Smith, J.A., Balick, L.K. and Hutchison, B.A., 1989. Modelling directional thermal radiance from a forest canopy. *Remote Sensing of the Environment*, 27: 169-186.
- Moran, M.S., Clarke, T.R., Ivone, Y. and Vidal, A., 1994. Estimating crop water deficit using the relationship between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of the Environment*, 49: 246-263.
- Moran, M.S., Clarke, T.R., Kustas, W.P., Wertz, M. and Amer, S.A., 1994. Evaluation of hydrologic parameters in a semiarid rangeland using remotely sensed spectral data. *Water Resources Research*, 30(5): 1287-1297.
- Morrow, N. and Friedl, M.A., 1998. Modeling biophysical controls on land surface temperature and reflectance in grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92: 147-161.
- Myneni, R.B. and Kanemasu, E.T., 1988. The hot spot of vegetation canopies. *Journal of quantitative spectroscopy & radiative transfer*, 40(2): 165-168.
- Ni, W., Li, X., Woodcock, C.E., Caetano, M.R. and Strahler, A.H., 1999. An analytical Hybrid GORT model for bidirectional reflectance over discontinuous plant canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(2): 987-999.
- Nilson, T. and Kuusk, A., 1971. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 8: 25-38.
- Nilson, T., 1989. A reflectance model for homogenous plant canopy and its inversion. *Remote Sensing of the Environment*, 27: 157-167.

- Norman, J.M. and Becker, F., 1995. Terminology in thermal infrared Remote Sensing of natural surfaces. *Remote Sensing reviews*, 12: 159 -173.
- Norman, J.M. and Chen, J.L., 1990. Thermal emissivity and infrared temperatures dependence on plant canopy architecture and view angle. *Proceedings of the international Geoscience & Remote Sensing symposium (IGARSS'90)*, 20-24 May, Washington, D. C.: 1747-1750.
- Norman, J.M., Castello, S. and Balick, L.K., 1994. Directional infrared temperature and emissivity of vegetation: measurement and models. Proceedings of the 6th symposium on physical measurement and signatures in remotes sensing, 17-21 January, Val d'Isère, France CNES Ed.(749-758).
- Oliosio, A., 1995. Estimating the difference between brightness and surface temperature for a vegetal canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 72: 237-242.
- Otterman, J., Brakke, T.W., Fuchs, M., Lakshmi, V. and Cadeddu, M., 1999. Longwave emission from a plant/soil surface as a function of the view direction: dependence on the canopy architecture. *International journal of Remote Sensing*, 20(11): 2195-2201.
- Palmer, J.W., 1977. Diurnal light interception and a computer model of light interception by a hedgrow apple orchard. *Journal of Applied Ecology*, 14: 601-614.
- Philipona, R., Frohlich, C. and Betz, C., 1995. Characterization of pyrgeometers and the accuracy of atmospheric long-wave radiation measurements. *Applied Optics*, 34(9): 1598-1605.
- Pierce, L.L. and Congalton, R.G., 1988. A methodology for mapping forest latent heat flux densities using *Remote Sensing*. *Remote Sensing of the Environment*, 24: 405-418.
- Prévot, L., 1985. Modélisation des échanges radiatifs au sein des couverts végétaux. Application a la télédétection. Validation sur un couvert de maïs, Doctoral Thesis, University of Paris VI.
- Prévot, L., Aries, F. and Monestiez, P., 1991. Modélisation de la structure géométrique du maïs. *Agronomie*, 11: 491-503.
- Prevot, L., Brunet, Y., Paw, U.K.T. and Seguin, B., 1993. Canopy modelling for estimating sensible heat flux from thermal infrared measurements. In proceedings of thermal Remote Sensing of the energy balance over vegetation in conjunction with other sensor, La Londe les maures, 20-23 September 93, Cemagref ed., 17-30.
- Prévot, L., Brunet, Y., Paw, U.K.T. and Seguin, B., 1994. Canopy modelling for estimating sensible heat flux from thermal infrared measurements. In: CEMAGREF (Editor), Proceeding of Thermal Remote Sensing of the energy and water balance over vegetation workshop, pp. 17-22.
- Price, J.C., 1983. Estimation surface temperature from satellite thermal infrared data - a simple formulation for the atmospheric effect. *Remote Sensing of the Environment*, 13: 353-361.
- Qin, W.H. and Goel, N.S., 1995. An evaluation of hotspot models for vegetation canopies. *Remote Sensing Reviews*, 13: 121-159.
- Qin, W.H. and Narendra, G., 1994. On the hotspot effect of leaf canopies: Modelling study and influence of leaf shape. *Remote Sensing of the Environment*, 50: 95-106.

- Richardson, A.J., Wiegand, C.L., Gausman, H.W., Cuellar, J.A. and Gerbermann, A.H., 1975. Plant, soil, and shadow reflectance components of row crops. *Photogrammetric engineering and Remote Sensing*, 41(11): 1401-1407.
- Rivard Renoit and Thomas, P.J., 1994. A field-portable thermal infrared grating spectrometer(THIRSPEC). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(2): 307-314.
- Ross, J. and Marshak, A., 1989. The influence of leaf orientation and the specular components of leaf reflectance on the canopy bidirectional reflectance. *Remote Sensing of the Environment*, 27: 251-260.
- Roujean, J.L., 1992. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of Remote Sensing data. *Journal of Gerophysical Research*, 97(D18): 20,455-20,468.
- Rubio, E. and Caselles, V., 1997. Emissivity measurement of several soils and vegetation types in the 8-14 μ m wave band: analysis of two field methods. *Remote Sensing of the Environment*, 59: 490-521.
- Sader, S.A., 1986. Analysis of effective radiant temperatures in a pacific northwest forest using thermal infrared multispectral scanner data. *Remote Sensing of the Environment*, 19: 105-115.
- Sandmeier, S.R., 2000. Acquisition of bidirectional reflectance factor data with field goniometers. *Remote Sensing of the Environment*, 73: 247-269.
- Schaaf, C.B., Li, X.W. and Strahler, A.H., 1994. Topographic effects on bidirectional and hemispherical reflectance calculated with a geometric-optical canopy model. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 32: 1186-1193.
- Seguin, B. and Itier, B., 1983. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. *International Journal of Remote Sensing*, 4: 371-383.
- Smith, A.J., Ballard, J.R. and Pedelty, J.A., 1997. Effect of three-dimensional canopy architecture on thermal infrared exitance. *Optical Engineering*, 36(11): 3093-3100.
- Smith, J.A., Ranson, K.J., Nguyen, D., Balick, L., Link, L.E., Fritschen, L. and Hutchison, B.A., 1981. Thermal vegetation canopy model studies. *Remote Sensing of the Environment*, 11: 311-326.
- Snyder, W.C. and Wan, Z., 1998. BRDF Models to predict spectral reflectance and emissivity in the thermal infrared. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(1): 214-225.
- Snyder, W.C., Wan, Z.M., Zhang, Y.L. and Feng, Y.Z., 1997. Thermal infrared (3-14 μ m) bidirectional reflectance measurements of sand and soils. *Remote Sensing of the Environment*, 60: 101-109.
- Sornprach Thanisawanyangkura, e.a., Leaf orientation and sunlit leaf area distribution in cotton, 1997. Leaf orientation and sunlit leaf area distribution in cotton. *Agricultural and Forest Meteorology*, 86: 1-15.
- Stehman, S.V., 1997. Estimating standard errors of accuracy assessment statistics under cluster sampling. *Remote Sensing of the Environment*, 60: 258-269.
- Stehman, S.V., 1999. Basic probability sampling designs for thematic map accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 20(12): 2423-2441.

- Stewart, D.W. and Dwyer, L.M., 1993. Mathematical characterization of maize canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 66: 247-265.
- Suits, G.H., 1983. Extension of a uniform canopy reflectance model to include row effects. *Remote Sensing of the Environment*, 13: 113-129.
- Sutherland, O., Carlson, T., Bernard, R. and Vidal-Madjar, D., 1977. Significance of vegetation in interpreting thermal radiation from a terrestrial surface. *Journal of Applied Meteorology*, 18: 759-763.
- Svendsen, H. and Jensen, H.E., 1990. The effect of clear sky radiation on crop surface temperature determined by thermal thermometry. *Agricultural and Forest Meteorology*, 50: 239-243.
- Townshend, J.R.G. and Justice, C.O., 1988. Selecting the spatial resolution of satellite sensors required for global monitoring of land transformations. *International Journal of Remote Sensing*, 9: 187-236.
- Vining, R.C. and Blad, B.L., 1992. Estimation of sensible heat flux from remotely sensed canopy temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 97(D17): 18951-18954.
- Voogt, J.A. and Oke, T.R., 1998. Effects of urban surface geometry on remotely-sensed surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 19(5): 895-920.
- Walthall, C., Roujean, J.L. and Morisette, J., 2000. Field and landscape BRDF optical wavelength measurements: experience, techniques and the future. *Remote Sensing Review*, 18: 503-531.
- Walthall, C.L., Norman, J.M., Campbell, G. and Blad, B.L., 1985. Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetation canopies and bare soil surfaces. *Applied Optics*, 24: 383-287.
- Wan, Z.M. and Li, Z.L., 1997. A physics based algorithm for retrieving land surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 35: 980-996.
- Wanner, W., 1995. A new class of geometric-optical semi empirical kernels for global BRDF and Albedo modeling. *IGASS'95*: 15-17.
- Wanner, W., Li, X. and Strahler, A.H., 1995. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. *Journal of Geophysical Research*, 100(D10): 21077-21089.
- Wanner, W., Strahler, A.H., Hu, B., Lewis, P., Muller, J.P., Li, X.W., Barker Schaaf, C.L. and Barnsley, M.J., 1997. Global retrieval of bidirectional reflectance and albedo over land from EOS MODIS and MISR data: Theory and algorithm. *Journal of Geophysical Research*, 102(D14): 17143-17161.
- Weiss, M., Baret, F., Leroy, M., Begue, A., Hautecoeur, O. and Santer, R., 1999. Hemispherical reflectance and albedo estimate from the accumulation of across-track sun-synchronous satellite data. *Journal of Geophysical Research*, **104**: 22221-22232.
- William, C.S. and Wan, Z., 1996. Surface temperature correction for active infrared reflectance measurements of natural material. *Applied Optics*, 35(13): 2216-2220.
- William, C.S. and Wan, Z., 1997. Thermal infrared (3-14 μ m) bidirectional reflectance measurements of sands and soils. *Remote Sensing of the Environment*, 60: 101-109.

William, C.S. and Wan, Z., 1998. BRDF models to predict spectral reflectance and emissivity in the thermal infrared. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(1): 214-225.

Woodcock, C.E. and Strahler, A.H., 1987. The factor of scale in Remote Sensing. *Remote Sensing of the Environment*, 21: 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 the Environment*, 25: 323-348.

Woodcock, C.E., Strahler, A.H. and Jupp, D.L.B., 1988. The use of variograms in Remote Sensing: II real digital images. *Remote Sensing of the Environment*, 25: 349-379.

Résumé

La température de brillance directionnelle (TBD) mesurée par des capteurs de télédétection peut être utilisée pour caractériser les états énergétiques et hydriques des surfaces naturelles. Dans cette thèse, les influences principales sur l'acquisition de la TBD d'un couvert en rang à partir de mesures depuis le sol ont été analysées. Un modèle géométrique a été développé pour évaluer les effets de champ de visée sur les mesures. À l'aide de ce modèle, des erreurs systématiques causées par le champ pour les observations au nadir ont été mises en évidence ainsi que les effets de compensation dans le champ pour des visées obliques. Les résultats de mesures et des analyses montrent que les deux facteurs déterminant la TBD sont la structure géométrique et les températures des composantes du couvert. Pour décrire la variation de TBD, un modèle de transfert radiatif optique géométrique (GORT) a été développé. Il est basé sur une description simplifiée de l'architecture du couvert et de ses propriétés optiques ainsi que les températures des éléments constituant le couvert (sol éclairé, sol à l'ombre et végétation). L'analyse à l'aide de ce modèle montre que la variation directionnelle est déterminée principalement par la structure en rangs et la géométrie Soleil-observation. On peut observer généralement une bande chaude ou froide dans la direction du rang et un pic chaud dans la direction d'incidence du Soleil (hot-spot thermique). Ces phénomènes peuvent être expliqués par la fraction de trous dans le couvert liée au rang et à l'intérieur de la végétation ainsi que par les différences entre les températures des sols éclairé et à l'ombre, et de la végétation. Une analyse de sensibilité du modèle a été effectuée. Le modèle a été ensuite validé avec les mesures obtenues à la fois au niveau de la fraction de trou et de la TBD. Les résultats montrent la bonne performance du modèle et l'importance de détermination du facteur d'atténuation optique au sein du couvert de maïs.

Mots-clés : télédétection, température de brillance directionnelle (TBD), couvert en rangs, mesure au sol, modèles numériques, effet du champ de visée, variation de TBD, GORT, hot-spot thermique, analyse de sensibilité.

Abstract

Directional brightness temperature (DBT) is one of the key parameters to characterize field energy exchanges and distributions. It could be directly measured by remote sensing detectors. Main influences for extracting field BTDF of a row crop from a ground level measurement have been discussed. A geometrical model was developed to interpret the FOV effects appearing in the measurements. The model demonstrates the systematic errors caused by the definite height of the detector and reveals an effect of compensation for the off nadir viewing. The temporal changes of field BTDF have been evaluated. Field geometrical structure and component brightness temperature are the main factors determining the BTDF features. If sunlit soil temperature is the highest, there is a hot band in the row direction in the polar map. If vegetation temperature is the highest, there is a cool band. To physically describe row structure field BTDF, a simple hybrid geometric optical and radiative transfer (GORT) model was developed. With a series of assumption, on vegetation architecture, optical properties, and temperature distribution, the model is based on three categories of input parameters: canopy geometrical structure, component temperature (sunlit soil, shaded soil and leaves) and sun-target viewing geometry. The model reveals the combined effects of field row structure and Sun-view geometry on the field multi-directional brightness temperature distributions. Thermal hot spot and hot stripe around the hot spot appear in the simulation results. These two features could be explained by the gap distribution between and within the row plants and by component temperatures.

Keywords : remote sensing, directional brightness temperature (DBT), row structure, field measurements, computational model, FOV effects, DBT variations, GORT, thermal hot spot effect, sensibility analysis .