

**UNIVERSITE DE PARIS VII
U.F.R DE PHYSIQUE**

DISCIPLINE : METHODES PHYSIQUES EN TELEDETECTION

THESE

Présentée pour obtenir le diplôme de DOCTORAT

**UTILISATION DES DONNEES NOAA-AVHRR POUR
MODELISER LA PRODUCTION PRIMAIRE DU MIL
DANS L'ECOSYSTEME SAHELIEU
(NIGER)**

Par

Hassan OUAIDRARI

Soutenue le 24 Octobre 1994 devant la commission d'examen:

MM. C. KLAPISZ	Président
P. BAUER	Rapporteur
Mme. M. BEN MEHREZ	Rapporteur
MM. B. SEGUIN	Examineur
J. IMBERNON	Examineur
Y. KERR	Examineur

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je tiens à exprimer ma reconnaissance à Jacques Imbernon pour la confiance qu'il m'a accordée, pour avoir dirigé ce travail avec patience, et surtout pour son amitié tout au long de ces trois années de thèse.

Je voudrais remercier Monsieur Bernard Seguin qui a accepté de diriger cette thèse de doctorat. Ses judicieux conseils ont permis le bon déroulement de cette étude.

Je tiens à remercier Monsieur Klapisz, président du jury, qui m'a accepté dans sa formation doctorale, et qui m'a soutenu pendant le DEA et durant toutes ces années de thèse.

Je tiens aussi à remercier Monsieur Pierre Bauer, Directeur du Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Télédétection, et Myriem Ben Mehrez, responsable des relations internationales au Centre Royal de Télédétection Spatiale (Maroc) pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail, et pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse.

J'exprime mes plus vifs remerciements à Agnès Bégué qui m'a largement fait bénéficier de ses connaissances sur le Sahel et les techniques de mesures, ainsi que pour les agréables et fructueuses discussions que nous avons eues.

Ma profonde gratitude et mon amitié vont à Yann Kerr et Gérard Dedieu ingénieurs de recherche au Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Télédétection, et à Martine Guérif chargée de recherche à l'INRA de Laon.

Mes remerciements vont aussi aux responsables de la base de données HAPEx-Sahel qui ont fourni un travail formidable, me permettant d'utiliser les données dans les meilleures conditions.

Que toutes les personnes du laboratoire de télédétection du CIRAD avec qui j'ai pu travailler trouvent ici mes sincères remerciements pour leur aide et leur gentillesse (Pierre Fol, Nathalie Jean, Nadine Kelemen, Van Hugo, Xavier Augusseau, Christian Gounel et Serge Guillobez).

Enfin, cette thèse n'aurait pu être menée à bien sans le soutien moral de nombreuses personnes durant ces trois années. Je pense à ma famille, Béatrice, Zakia, Najet, Mohammed, André, Hélène et Ana.

RESUME

La télédétection dans le domaine optique et infrarouge thermique donne accès à des paramètres biophysiques utiles à la prévision des rendements agricoles. Elle a en particulier un intérêt majeur pour les pays sahéliens dans la mesure où les systèmes traditionnels de statistiques agricoles présentent de nombreuses faiblesses.

Dans cette étude menée au Niger sur les cultures de mil, nous avons développé une méthodologie basée sur le modèle de Monteith, et utilisant les données du capteur NOAA-AVHRR. Les différents paramètres de ce modèle ont été calibrés en 1991 sur le dispositif d'observations et de mesures au sol du projet P4AS. Le souci de qualité de l'information et de spatialisation nous a conduit à utiliser les données Météosat pour estimer le rayonnement global et à corriger les données optiques d'AVHRR des effets de l'atmosphère. Une nouvelle approche est proposée pour prendre en compte la variabilité du contenu en eau de l'atmosphère à l'aide du Modèle de Circulation Générale.

La fraction de rayonnement absorbé est dérivée de l'indice de végétation NDVI au travers de différents modèles plus ou moins complexes. L'effet de la configuration géométrique Source-Capteur-Soleil sur ces relations est mis en évidence. Enfin, l'influence de l'état hydrique du système Sol-Plante sur l'efficacité de conversion est analysée à l'aide d'un indice de stress hydrique, le SDD (Stress Degree Day).

Cette approche a été mise en oeuvre en 1992 et a permis d'établir des cartes de rendement du mil. L'erreur maximale commise dans l'estimation est 24 % pour la matière sèche et 49.64 % pour le grain.

Enfin, le signal mesuré par AVHRR n'étant le plus souvent représentatif que d'un mélange de plusieurs types de végétation, nous avons développé sur la zone du projet HAPEX-Sahel une nouvelle méthode permettant de déconvoluer ce signal, afin d'évaluer l'apport des réflectances pures du mil dans la modélisation de la production végétale.

Mots-clé: Télédétection, AVHRR, NDVI, SDD, Modélisation, Production Primaire, Mil, Sahel

ABSTRACT

Remotely sensed optical and thermal infrared data are prone to give access to biophysical parameters for crop yield estimates. They are particularly interesting for Sahel where reliable statistics are somewhat difficult to obtain.

In this study located in Niger and concerning the millet crop, we developed a methodology based on Monteith model and using NOAA-AVHRR data to estimate crop yield. The parameters were calibrated in 1991 with ground based observations and measurements from the P4AS project. Emphasis was put on data quality and their spatialisation. Global radiation was derived from Météosat data, and AVHRR optical data were corrected for atmospheric effects. For this purpose a new approach, which takes into account the variability of the atmospheric water vapour from Global Circulation Model data, is proposed.

The fraction of the absorbed radiation was linearly related to the vegetation index (NDVI) through models of different level of complexity. The effect of the sun-view conditions on these relations was enhanced. Finally, the influence of the soil water status on the growth efficiency was analysed using a stress index SDD (Stress Degree Day).

This approach was applied on 1992 data and permitted to establish yield maps of millet. The maximum of error was 24 % for dry matter and 49 % for grain estimates.

Finally, as the AVHRR measurements include signatures of several types of vegetation, we developed a new method to extract pure reflectance, using HAPEX-Sahel data, in order to evaluate their contribution to the Monteith model.

Keywords: Remote Sensing, AVHRR, NDVI, SDD, Model, Primary Production, Millet, Sahel.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS CITES

AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CEPMMT	Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme
ϵ_a	Efficiencie d'absorption du rayonnement photosynthétiquement actif incident
ϵ_b	Efficiencie de conversion ou efficiencie biologique ou efficiencie photochimique
ϵ_c	Efficiencie climatique (proportion du RPA dans le rayonnement global)
ϵ_i	Efficiencie d'interception du rayonnement photosynthétiquement actif incident
ETR	Evapotranspiration Réelle
ETP	Evapotranspiration Potentielle
ETM	Evapotranspiration Maximale
FAO	Food and Agriculture Organisation
FIT	Front InterTropical = ZCIT
GAC	Global Area Coverage (AVHRR)
HAPEX	Hydrological and Atmospheric Pilot EXperiment
HRPT	High Resolution Picture Transmission
IF	Indice Foliaire
IGBP	International Geospher and Biospher Programme
IR	Indice de Récolte
LAC	Local Area Coverage (AVHRR)
MSAVI	Modified Soil Adjusted Vegetation Index

MST	Matière Sèche Totale
MVC	Maximum Value Composite
NDVI	Normalised Difference Vegetation Index
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
P4AS	Projet Pilote de Prévision des Productions Au Sahel
PPB	Production Primaire Brute
PPN	Production Primaire Nette
RG	Rayonnement Global
RPA (a ou i)	Rayonnement Photosynthétiquement Actif (absorbé ou intercepté)
SDD	Stress Degree Day
SPOT	Satellite Probatoire d'Observation de la Terre
ZCIT	Zone de Convergence InterTropicale = FIT

SOMMAIRE

CHAPITRE 1: INTRODUCTION GENERALE	12
1.1 LA FRAGILITE DE L'ECOSYSTEME SAHELIEEN	14
1.2 LE DEFICIT CEREALIER DE L'AGRICULTURE SAHELIEENNE	16
1.3 L'OBSERVATION SATELLITAIRE ET LA SURVEILLANCE DE LA PRODUCTION ALIMENTAIRE	16
1.4 LES OBJECTIFS ET LE PLAN DE L'ETUDE	19
CHAPITRE 2: PHOTOSYNTHESE ET PRODUCTION	21
2.1 LES MECANISMES DE LA PHOTOSYNTHESE	23
2.1.1 LES PLANTES ET LA LUMIERE	23
2.1.1.1 Phase claire	23
2.1.1.2 Phase sombre	25
2.1.2 LA PHOTOSYNTHESE	25
2.1.2.1 A l'échelle de la feuille	25
2.1.2.2 A l'échelle du couvert	27
2.1.3 LA RESPIRATION VEGETALE	28
2.1.3.1 La photorespiration	28
2.1.3.2 La respiration	28
La respiration d'entretien	28
La respiration de croissance	29
2.1.3.3 Facteurs influant sur la respiration	29
2.2 LA PRODUCTION VEGETALE	31
2.2.1 LES FACTEURS DE VARIATION DE LA PRODUCTION	31
2.2.1.1 Facteurs climatiques	31
2.2.1.2 Facteurs édaphiques	32
2.2.2 ESTIMATION DE LA PRODUCTION VEGETALE	33
2.2.2.1 Mesures non destructives des échanges de CO ₂	33
2.2.2.2 Mesures destructives de biomasse	34
2.2.2.3 Estimation a l'aide de modèles	34
Modèles statistiques	34
Modèles déterministes	34

2.2.3	DESCRIPTION DU MODELE DE PRODUCTION DE MONTEITH	36
2.2.3.1	Les bases biophysiques	36
2.2.3.2	Le rayonnement global	37
2.2.3.3	L'efficience climatique	39
2.2.3.4	Efficience d'interception et efficience d'absorption	41
2.2.3.5	Efficience de conversion	42
2.2.4	PRISE EN COMPTE D'UN INDICE DE STRESS HYDRIQUE DANS LE MODELE DE MONTEITH	45
2.2.4.1	Indices de stress basés sur l'ETR	46
2.2.4.2	Indice de stress basé sur la température radiative de surface	47
2.3	ESTIMATION DES PARAMETRES DU MODELE DE MONTEITH	49
2.3.1	LE RAYONNEMENT GLOBAL	49
2.3.2	L'EFFICIENCE CLIMATIQUE	52
2.3.3	L'EFFICIENCE D'ABSORPTION	52
2.3.3.1	Indices de végétation	52
2.3.3.2	Relations empiriques	55
2.3.3.3	Simulations du transfert radiatif dans un couvert discontinu	59
2.3.4	L'INDICE DE STRESS HYDRIQUE SDD	60
2.3.4.1	Estimation de la température de surface avec les données AVHRR	60
2.3.4.2	Estimation de la température de l'air	61
CHAPITRE 3: CARACTERISTIQUES DE LA ZONE D'ETUDE ET DONNEES DISPONIBLES		63
3.1	DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE	65
3.1.1	LES CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES	65
3.1.2	LA GEOMORPHOLOGIE	66
3.1.3	LES DIFFERENTS TYPES DE VEGETATION	68
3.1.3.1	La végétation naturelle	68
3.1.3.2	La culture de mil	69
3.2	LES DONNEES DU PROJET P4AS	72
3.2.1	OBJECTIFS DU PROJET	72
3.2.1.1	Estimation des surfaces	72
3.2.1.2	Estimation des rendements	74
3.2.2	LES SITES	74
3.2.3	MESURES AU SOL	77
3.2.3.1	Mesures agronomiques	77
3.2.3.2	Mesures météorologiques	78
3.2.4	DONNEES SATELLITAIRES	81
3.2.4.1	Données NOAA-AVHRR	81
3.2.4.2	Données SPOT-HRV	81
3.2.4.3	Données LANDSAT	81

3.3 LES DONNEES DE L'EXPERIMENTATION HAPEX-SAHEL	83
3.3.1 OBJECTIFS DE L'EXPERIENCE	83
3.3.2 LES SITES	83
3.3.3 LES MESURES AU SOL	83
3.3.3.1 Mesures radiatives (site central-ouest)	84
3.3.3.2 Mesures biologiques	84
3.3.4 DONNEES SATELLITAIRES ET AEROPORTEES	84
3.3.4.1 Données satellitaires	84
3.3.4.2 Données aéroportées	54
CHAPITRE 4: CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES DES DONNEES NOAA-AVHRR	85
4.1 LES CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES	86
4.1.1 LE MODELE DE CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES	87
4.1.1.1 Bases physiques	87
4.1.1.2 Le modèle "5S"	87
4.1.2 LE MODELE "5S" SIMPLIFIE	88
4.1.3 SENSIBILITE AUX PARAMETRES ATMOSPHERIQUES	91
4.2 LES DONNEES NOAA-AVHRR	94
4.2.1 RAPPELS DES CARACTERISTIQUES SPECTRALES	94
4.2.2 CONFIGURATION GEOMETRIQUE	95
4.2.3 HEURE DE PRISE DE VUE	95
4.2.4 PARAMETRES D'ETALONNAGE	97
4.3 LES DONNEES ATMOSPHERIQUES	98
4.3.1 L'OZONE : CLIMATOLOGIE	98
4.3.2 LES AÉROSOLS : MESURES	99
4.3.3 LE CONTENU EN VAPEUR D'EAU : RADIOSONDAGES ET MCG	99
4.4 ANALYSE DES DONNEES DU MCG ET DES RESULTATS DES CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES	100
4.4.1 COMPARAISON DES CONTENUS EN VAPEUR D'EAU ATMOSPHERIQUE	100
4.4.2 VARIABILITE SPATIALE DES REFLECTANCES ET DU NDVI	101
4.4.3 ANALYSE TEMPORELLE DU NDVI	106
4.5 CONCLUSION	108
CHAPITRE 5: EXTRACTION DES REFLECTANCES PURES DES UNITES DE PAYSAGES	109
5.1 LES DONNEES	112
5.1.1 LA CARTE DES UNITES DE PAYSAGE	112
5.1.2 LES MESURES RADIOMETRIQUES	113
5.1.3 LES IMAGES NOAA-AVHRR	114
5.1.4 SUPERPOSITION DES IMAGES NOAA AVEC LA CARTE	114

5.2	METHODOLOGIE D'EXTRACTION	114
5.2.1	LE MODELE LINEAIRE DE MELANGE	114
5.2.2	LE SYSTEME D'EQUATIONS	115
5.2.3	RESOLUTION DES SYSTEMES D'EQUATIONS	115
5.3	ETUDE DE SENSIBILITE AVEC DES DONNEES SIMULEES	117
5.3.1	SIMULATION DES DONNEES AVHRR	117
5.3.2	NOMBRE DE SOLUTIONS ACCEPTEES	117
5.3.3	ERREUR SUR LE CALCUL DES REFLECTANCES	120
5.4	APPLICATION AUX IMAGES NOAA-AVHRR	122
5.4.1	CHOIX DE LA RESOLUTION SPATIALE	122
5.4.2	PROFIL TEMPOREL DU COEFFICIENT DE VARIATION	123
5.4.3	COMPARAISON DES REFLECTANCES ESTIMEES ET MESUREES	124
5.5	CONCLUSION ET PERSPECTIVE	126
CHAPITRE 6: ETALONNAGE DES PARAMETRES DU MODELE DE MONTEITH A L'ECHELLE SATELLITAIRE (SAISON 1991)		127
6.1	L'EFFICIENCE CLIMATIQUE	129
6.2	ESTIMATION DU RAYONNEMENT GLOBAL (RG)	129
6.2.1	VARIABILITE INTERANNUELLE DE RG	129
6.2.2	SPATIALISATION	132
6.3	ESTIMATION DE L'EFFICIENCE D'ABSORPTION ϵ_a	132
6.3.1	RELATION GLOBALE ENTRE ϵ_a ET NDVI	132
6.3.2	RELATIONS DE MYNENI ENTRE ϵ_a ET NDVI	132
6.3.3	COMPARAISON DE LA RELATION GLOBALE ET DES RELATIONS DE MYNENI	137
6.4	ESTIMATION DE L'EFFICENCE DE CONVERSION ϵ_p MOYENNE DE LA SAISON 1991	139
6.4.1	PERIODE D'INTEGRATION	141
6.4.2	LOCALISATION DES SITES P4AS SUR LES IMAGES AVHRR	142
6.4.3	EFFICIENCE DE CONVERSION MOYENNE DES SITES P4AS	142
6.5	CALCUL DE L'INDICE DE STRESS SDD	143
6.5.1	ESTIMATION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE	143
6.5.2	LA TEMPERATURE DE L'AIR	145
6.5.3	SDD DU CYCLE	147
6.5.4	EVOLUTION TEMPORELLE DU SDD	147
6.5.5	RELATION ENTRE SDD ET VARIABLES AGROCLIMATIQUES	148
6.5.6	RELATION ENTRE SDD ET EFFICIENCE DE CONVERSION ϵ_p	150
6.6	CONCLUSION	152

CHAPITRE 7: MISE EN OEUVRE DU MODELE DE PRODUCTION (SAISON 1992)	153
7.1 ESTIMATION DES RENDEMENTS DU MIL A PARTIR DES DONNEES AVHRR.	154
7.1.1 PERIODE D'INTEGRATION	155
7.1.2 EFFICIENCE D'ABSORPTION	155
7.1.3 EFFICIENCE DE CONVERSION	156
7.1.4 ESTIMATION DE LA MATIERE SECHE DU MIL	158
7.1.5 ESTIMATION DES RENDEMENTS EN GRAIN	160
7.1.6 CALCUL D'ERREUR SUR L'ESTIMATION DE LA PRODUCTION VEGETALE	166
7.2 CARTOGRAPHIE DES RENDEMENTS SUR LA ZONE D'ETUDE	169
7.2.1 CARTE DE RENDEMENTS EN MATIERE SECHE TOTALE ...	169
7.2.2 CARTE DES RENDEMENTS EN GRAINS	169
7.3 APPORT DES REFLECTANCES PURES DU MIL DANS LE MODELE DE PRODUCTION	170
7.3.1 DONNEES UTILISEES	170
7.3.2 CALCUL DES EFFICIENCES DE CONVERSION	172
7.4 CONCLUSION	173
CONCLUSION GENERALE	174
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	178
ANNEXE A: LE MODELE DE CORRECTION ATMOSPHERIQUE "5S" ...	193
ANNEXE B: LES RELATIONS ISSUES DU MODELE DE MYNENI	197

CHAPITRE 1:

INTRODUCTION GENERALE

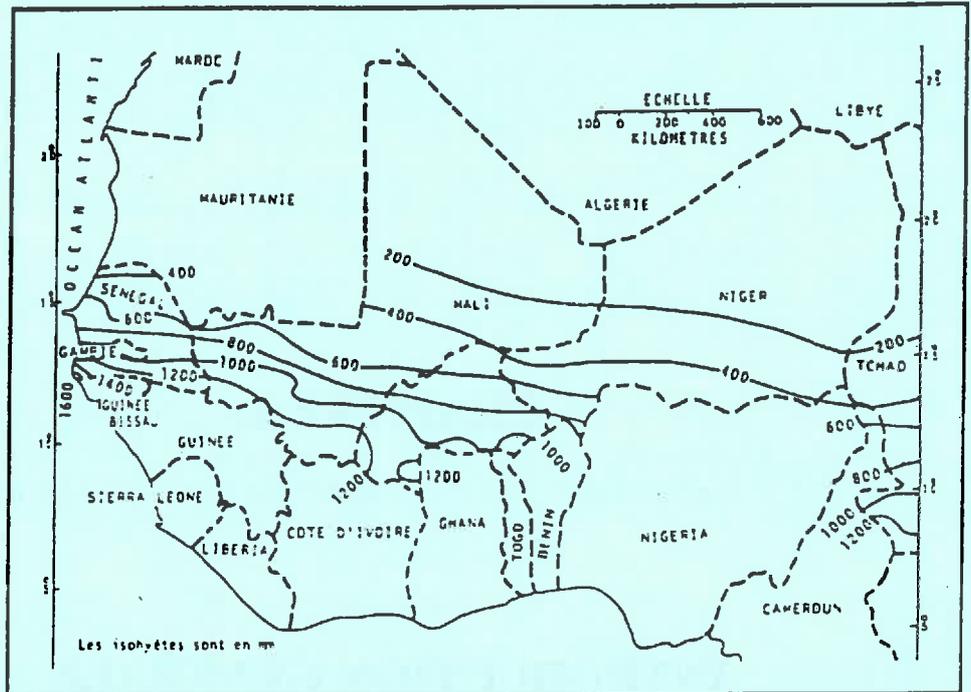


Figure 1.1: Pluviosité annuelle (Virmani et al., 1980), (période de référence non précisée par les auteurs)

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GENERALE

1.1 LA FRAGILITE DE L'ECOSYSTEME SAHELIEN

Au cours des 25 dernières années, l'évolution climatique et ses conséquences au Sahel ont vivement préoccupé les différents gouvernements et le public.

En effet, les phénomènes de sécheresse ont transformé durant ces quelques décennies beaucoup de régions arides et semi-arides en zones non productives, provoquant une dégradation des ressources naturelles et une crise alimentaire très importante.

Contre ce fléau, les pays du Sahel ont décidé de s'unir (Mauritanie, Sénégal, Mali, Burkina-Faso, Niger, Tchad, Soudan) en 1973, en créant le CILSS (Comité Inter-état de Lutte contre la Sécheresse au Sahel), pour définir et mettre en oeuvre des politiques et stratégies adéquates d'intervention, coordonner et harmoniser l'ensemble des actions de développement dans la région, sensibiliser les états et la Communauté Internationale aux problèmes de sécheresse et de désertification, et mobiliser les ressources nécessaires au financement des programmes.

On subdivise généralement le Sahel en trois zones climatiques (figure 1):

- une zone à climat saharien au nord, dont la limite méridionale correspond à l'isohyète 200 mm;
- une zone à climat sahélo-saharien, au sud de la précédente, comprise entre les isohyètes 200 et 400 mm;
- une zone à climat sahélo-soudanien, méridionale, à la pluviométrie comprise entre 400 et 700 mm.

Mais une des caractéristiques de la pluviosité au Sahel est sa forte variabilité interannuelle. Les observations analysées depuis le début du siècle montrent des anomalies annuelles relatives pouvant atteindre 40%, avec une alternance de séquences excédentaires et déficitaires. Ainsi la séquence sèche qui a débuté en 1968, avec de forts déficits en 1972-73 et 1982-84, fait suite à une séquence excédentaire au cours de la décennie cinquante.

De nombreux travaux ont été entrepris pour expliquer cette variabilité. Deux types de facteurs sont le plus souvent avancés: le premier est d'ordre climatique et correspondrait aux modifications survenues dans la composition de l'atmosphère et à son interaction avec l'océan; l'autre est d'ordre anthropique, et résulterait de la pression exercée sur la couverture végétale naturelle par des surpâturages et une agriculture extensive.

La détérioration de l'écosystème sahélien est intensifiée par la densité humaine croissante. En effet, le pâturage excessif, le brûlage de la steppe, le déboisement et appauvrissement du sol par les cultures détruisent la couverture végétale au-delà de la limite minimale indispensable pour la protection du sol contre une érosion rapide par le vent ou l'eau. Les sols surchauffés deviennent durs, sans aucune couche d'humus pour retenir l'eau. On observe alors le schéma de dégradation suivant : la savane couverte de buissons ou clairsemée d'arbres devient steppe herbeuse, et la steppe à son tour se transforme en semi-désert.

Les superficies cultivées ont augmenté sensiblement au même rythme que l'accroissement démographique. Mais les rendements sont demeurés stables ou ont légèrement régressé depuis vingt ans (Gherssi, 1990). Il faut donc cultiver des superficies de plus en plus grandes pour faire face aux besoins alimentaires de subsistance d'une population en expansion. La céréaliculture laisse ainsi le sol nu et en proie à l'érosion pendant six à neuf mois par an. De plus, par suite de la pression démographique, la durée de la jachère est réduite, ou même souvent cette dernière est supprimée, ce qui diminue considérablement la fertilité des sols sableux du Sahel. Il faut donc de plus en plus de terre cultivée pour subvenir aux besoins de chaque famille. Le phénomène s'amplifie de lui-même et au bout de quelques années, il ne reste parfois qu'un sol dégradé.

Pour les mêmes raisons, les éleveurs tendent à détenir de plus en plus d'animaux puisqu'il faut en principe 3 à 4 UBT (Unité de Bétail Tropical) pour maintenir chaque personne au niveau de subsistance, en absence de grains. Une population nombreuse signifie donc plus d'animaux. De ce fait, le nombre d'animaux tend à s'accroître au même rythme que la population humaine, jusqu'à un point de rupture. Un tel point de rupture a été atteint au Sahel en 1969-73 où 30 à 60% du cheptel fut décimé par la sécheresse.

Le surpâturage est intensifié aussi par le défrichement des meilleures terres pour l'agriculture. Ainsi, il ne reste à la disposition des animaux que les pâturages médiocres à faible productivité dont la dégradation tend à devenir irréversible.

Les espèces ligneuses sont utilisées comme combustible par la population sahélienne. Chaque personne peut consommer 1 à 2 kg de bois de feu par jour. Ainsi, les surfaces déboisées au Sahel sont de plus en plus importantes (Bertrand, 1989).

Au cours des années sèches, l'écimage des arbres et arbustes a provoqué des ravages et des peuplements entiers ont été anéantis sur de vastes surfaces. De ce fait, les villes du Sahel sont entourées de zones déboisées concentriques de plus en plus larges, et dans des villes comme Niamey (Niger) on va chercher du bois de feu jusqu'à des distances de 100 km et plus (Bertrand, 1987).

Enfin, les feux de brousse sont très fréquents dès que la biomasse sèche sur pied atteint ou dépasse 1000 kg/ha. On a estimé que le feu détruit chaque année dans les savanes africaines 80 millions de tonnes de fourrage, ce qui représente la ration de 25 millions de bovins pendant 9 mois. Il fait également disparaître certaines espèces ligneuses et les herbacées pérennes.

Pour toutes ces raisons, l'écosystème sahélien subit d'importantes contraintes qui présentent une grande variabilité.

1.2 LE DEFICIT CEREAALIER DE L'AGRICULTURE SAHELIENNE

La population des pays du CILSS est estimée à 64 millions d'habitants, avec une densité faible, de l'ordre de 23 hab./km². Les taux d'accroissement annuel moyens de la population sont les plus élevés du monde, voisins de 3 % par an, ceci suppose un doublement de la population en une vingtaine d'années, d'autant plus que le taux de mortalité semble se stabiliser ou baisser lentement.

Cette poussée démographique a été accompagnée par une forte augmentation de la demande alimentaire, nécessitant une meilleure gestion de la production agricole, et donc une meilleure évaluation.

La croissance de la production de céréales dans les neufs pays du CILSS est faible. Elle est passée d'environ 4.4 millions de tonnes en moyenne au cours des années 1961-1965 à un peu plus de 6 millions de tonnes en 1990 (tableau 1). Cette croissance de la production est essentiellement le fait de l'augmentation des surfaces cultivées car les rendements n'ont pas significativement augmenté au cours des dernières années (Gherssi, 1990).

Cette production est essentiellement constituée de céréales sèches, mil et sorgho. La production de riz se situe selon les années, entre 8 et 9 % de la production totale de céréales (tableau 2), alors que celle du blé et du maïs reste négligeable.

Les pays du Sahel ont toujours recours aux importations pour subvenir à leurs besoins en céréales. Ces importations qui se situaient à 300.000 tonnes en 1961-65, ont dépassé les 1.300.000 tonnes à la fin de la décennie 80 (tableau 3). Le riz représente plus de 60 % des importations totales. La part de l'aide alimentaire dans les importations totales est variable suivant le pays et la récolte en fin de saison des pluies.

Si l'on mesure le degré de dépendance alimentaire par le rapport entre les importations céréalières et les disponibilités totales (importations + production disponible), on constate de grandes différences selon les pays. Toutefois, pour l'ensemble de la région, il se situe à la fin des années 80, en période de bonnes récoltes, aux alentours de 14 %.

1.3 L'OBSERVATION SATELLITAIRE ET LA SURVEILLANCE DE LA PRODUCTION ALIMENTAIRE

Suite à une succession d'années déficitaires en ressources alimentaires, plusieurs organismes nationaux et internationaux ont exprimé leur intérêt prioritaire pour la mise au point de méthodes de suivi et de prévision des productions vivrières dans les pays du CILSS.

Depuis quelques années, les systèmes d'observation et de collecte des données ont été améliorés, afin de répondre aux problèmes causés par les déficits chroniques de la production agricole. Dans une fonction d'alerte, ces systèmes sont également appelés à identifier en temps utile des signes précurseurs de crise alimentaire. L'optimisation de la production locale, la planification des importations et l'organisation des services de distribution sont fortement conditionnées par ces possibilités de prévision.

	1961-65	1980	1981-85	1985-86	1986-87	1987-88	1988-89	1989-90	1990-91
Burkina Faso	932	1 048	1 226	1 346	1 636	1 275	1 773	1 646	1 506
Mali	1 028	913	1 019	1 418	1 498	1 320	1 780	1 730	1 636
Mauritanie	n.d.	53	52	106	97	126	133	139	106
Niger	1 217	1 776	1 568	1 559	1 551	1 200	2 012	1 412	1 366
Sénégal	607	676	888	1 055	756	855	693	856	773
Tchad	600	573	453	586	620	474	664	493	496
Gambie	n.d.	81	55	77	72	72	73	76	72
Guinée Bissau	n.d.	80	n.d.	153	170	154	148	159	165
Cap-Vert	n.d.	9	n.d.	2	10	18	14	8	13

Tableau 1.1: Production disponible totale de céréales (en milliers de tonnes) (sources: FAO, projet diagnostic permanent II). La production disponible représente 85 % de la production céréalière brute.

	1961-65	1981-85	1985-86	1986-87	1987-88	1988-89	1989-90	1990-91
Burkina Faso	28	33	33	26	24	21	23	24
Mali	174	150	136	130	159	158	186	207
Mauritanie	n.d.	13	8	11	8	28	30	29
Niger	10	46	37	49	40	29	39	40
Sénégal	90	116	96	96	88	80	92	86
Gambie	37		15	16	13	13	11	11
Guinée Bissau	47		77	83	95	80	89	88
Tchad	25		6	21	29	41	58	33

Tableau 1.2: Production disponible de riz (en milliers de tonnes) (sources: FAO, projet diagnostic permanent II)

	1961-65	1981-85	1985-86	1986-87	1987-88	1988-89	1989-90	1990-91
Burkina Faso	10	71	146	141	178	119	125	109
Cap-Vert	11	62	84	60	49	55	54	91
Gambie	10	45	145	72	98	80	95	72
Guinée Bissau	n.d.	38	50	52	50	45	45	47
Mali	10	211	193	75	109	87	36	37
Mauritanie	6	205	180	202	219	180	179	188
Niger	4	80	126	68	170	74	109	193
Sénégal	234	549	567	478	503	577	534	585
Tchad	4	53				55	63	75

Tableau 1.3: Importations totales de céréales (en milliers de tonnes) (sources: FAO, projet diagnostic permanent II et base de données IRAM). Les importations totales comprennent les importations commerciales et l'aide alimentaire.

La multiplicité des approches proposées reflète en fait la grande diversité d'objectifs qui peuvent être associés au terme très générique de "surveillance de la production alimentaire". Les critères qui déterminent l'approche retenue sont en général liés au type d'information recherchée, aux circuits que cette information doit suivre pour être effectivement accessible ainsi qu'aux ressources financières allouées à l'opération.

Quel que soit le contexte, les techniques de télédétection sont de plus en plus présentées comme une source indispensable de données sur l'état des pâturages et des cultures au Sahel (Justice et al., 1985; Justice, 1986; Johnson et al., 1987; Lo et al., 1993).

L'intérêt scientifique de l'observation par satellite des écosystèmes agricoles sahéliens n'est plus à démontrer, et a fait l'objet de nombreuses publications. Il faut cependant constater que la télédétection continue à montrer de sérieuses limitations quand il s'agit de fournir de façon opérationnelle des informations indispensables dans le cadre de la surveillance des cultures. En effet, la fiabilité encore insuffisante des méthodes utilisant cette technologie en restreint souvent les applications. Il est donc nécessaire d'apporter des améliorations aux techniques spatiales, et d'examiner la nature des problèmes à résoudre et les conditions qui prévalent sur la région concernée. En outre, vu l'accroissement du nombre de systèmes d'observation mis à la disposition de l'utilisateur, il est évident qu'une certaine "synergie" entre différents systèmes doit être exploitée.

La littérature est abondante en études qui ont pour objectif le suivi de la végétation, et l'estimation des rendements agricoles à partir de données satellitaires. Les méthodes utilisées peuvent être scindées en deux catégories. D'une part, il existe des méthodes qui sont basées sur des modèles empiriques simples, exploitant la relation linéaire entre le cumul annuel d'un indice de végétation et la biomasse végétale (Tucker et al., 1985; Diallo et al., 1991, Prince et Justice, 1991; Wylie et al., 1991, Rasmussen, 1992, Lo et al., 1993). Ce type de modèle est très critiqué, car sa validité est limitée à l'année et à la région pour laquelle il a été conçu, et nécessite une étalonnage pour chaque année concernée. De plus, les modèles empiriques ne prennent pas en considération certains paramètres importants pour les mécanismes de la production végétale tels que la structure du couvert ou le rayonnement solaire incident.

D'autre part, apparaissent des méthodes basées sur des modèles déterministes, qui tiennent compte des paramètres du couvert végétal et de l'environnement. Dans ce cas, on distingue deux types de modélisation: les modèles de fonctionnement de la plante, qui simulent la croissance et le développement saisonnier d'une plante à l'échelle du champs, et les modèles de production végétale, qui ont été validés à plusieurs échelles, allant de la parcelle à la région.

Les modèles de fonctionnement ont été conçus au départ pour suivre l'état des cultures au niveau du sol. Ces modèles utilisent une formulation assez détaillée de la photosynthèse nette à des échelles de temps et d'espace fine (par exemple la description instantanée de l'assimilation du CO₂ au niveau d'une couche foliaire ou la description journalière de la respiration au niveau de l'épaisseur du couvert). Le modèle ARCWHEAT (Porter et al., 1982), adapté pour une estimation des rendements des cultures de blé en France (Fisher, 1994) à l'aide des données NOAA-AVHRR, a donné de bons résultats. Cependant, il présente quelques inconvénients. Le plus important est sa sensibilité au profil temporel du NDVI qui

engendre des erreurs assez importantes dans les estimations de biomasse. De plus, il ne tient pas compte des variabilités intervenant dans le processus de croissance, et liées à un certain état des conditions d'environnement (stress hydrique, attaques parasitaires,...). La nouvelle version qui couple le modèle ARCWHEAT à un modèle de bilan hydrique améliorera les estimations en tenant en compte l'effet du stress hydrique sur la plante.

Le modèle de production le plus communément utilisé est celui élaboré par Monteith (1972), puis simplifié par Varlet-Granchet et al. (1982). Plusieurs études ayant pour objectifs le suivi de la végétation et l'estimation de la biomasse produite ont choisi ce type d'approche (Kumar et Monteith, 1981; Asrar et al., 1984; Baret et al., 1988; Baret et Olioso, 1989; Guérif et al., 1993). Ce modèle nécessite 4 paramètres d'entrée, le rayonnement global (RG), le taux de Rayonnement Photosynthétiquement Actif (RPA) au sein du RG (efficacité climatique: ϵ_c), la fraction du RPA absorbée par le couvert végétal (efficacité d'absorption: ϵ_a) et la conversion de l'énergie absorbée en matière sèche (efficacité de conversion: ϵ_p).

Loudjani (1993) a utilisé cette approche pour estimer la Production Primaire Nette (PPN) de l'Afrique de l'Ouest, à l'aide de données AVHRR. Les estimations et la carte de production végétale qu'il a obtenue sont satisfaisantes, et permettent d'appréhender les variations spatiales et interannuelles. Cependant, il a été observé quelques incertitudes dues à l'efficacité de conversion, qui a été considérée constante pour chaque région. De plus, la relation qui lie l'indice de végétation à l'efficacité d'absorption ne tient pas compte des effets directionnels de surface.

1.4 LES OBJECTIFS ET LE PLAN DE L'ETUDE

Notre objectif dans cette étude est de contribuer à l'amélioration des techniques spatiales de surveillance de la production agricole, et de mettre en valeur la synergie des différents systèmes d'observation spatiale, dans le cadre du projet P4AS (Projet Pilote de Prévision des Productions Au Sahel).

L'approche que nous avons adoptée dans cette étude, est basée sur le modèle de Monteith simplifié. Elle vise à améliorer l'estimation des différentes efficacités du modèle, pour mieux évaluer la production végétale du mil (*Pennisetum glaucum*, (L.) R. Br.) au Niger.

Pour mieux comprendre le fonctionnement du modèle de Monteith, les principaux mécanismes de la photosynthèse seront rappelés dans le chapitre 2, ainsi que les autres méthodes d'estimation de la biomasse.

Le modèle de Monteith a été utilisé à une échelle régionale en utilisant des mesures spectrales issues du capteur NOAA-AVHRR, dont les images couvrent les deux saisons de culture 1991 et 1992. Les données utilisées proviennent de deux projets, P4AS et HAPEX-SAHEL. La description de ces données et de la zone d'étude seront détaillées dans le chapitre 3.

Dans le chapitre 4 sont discutées les corrections atmosphériques apportées aux canaux rouge et proche infrarouge du capteur AVHRR, et une nouvelle méthodologie sera utilisée pour améliorer la correction des données AVHRR des effets de la vapeur d'eau atmosphérique.

La basse résolution du capteur AVHRR n'est pas adaptée au suivi des cultures de mil au Sahel. En effet, le signal mesuré par ce capteur n'est pas caractéristique d'un couvert végétal, mais d'un mélange de plusieurs types de végétation. Dans le chapitre 5, on montrera donc une technique de déconvolution qui permet d'extraire les réflectances pures des principales unités de paysage sahélien à partir des données AVHRR.

La démarche suivie pour étalonner les coefficients du modèle de Monteith simplifié durant la saison culturale 1991 sera exposée dans le chapitre 6, et l'estimation de la production végétale du mil sera réalisée pour la saison 1992 dans le chapitre 7. L'accent sera surtout mis sur les avantages et les inconvénients de la méthodologie proposée.

A la fin de l'étude un rapide bilan des différents enseignements apportés (limites, perspectives, améliorations envisageables) sera réalisé en exposant les applications en cours ou à venir permises par ce type d'approche.

CHAPITRE 2:

PHOTOSYNTHESE ET PRODUCTION

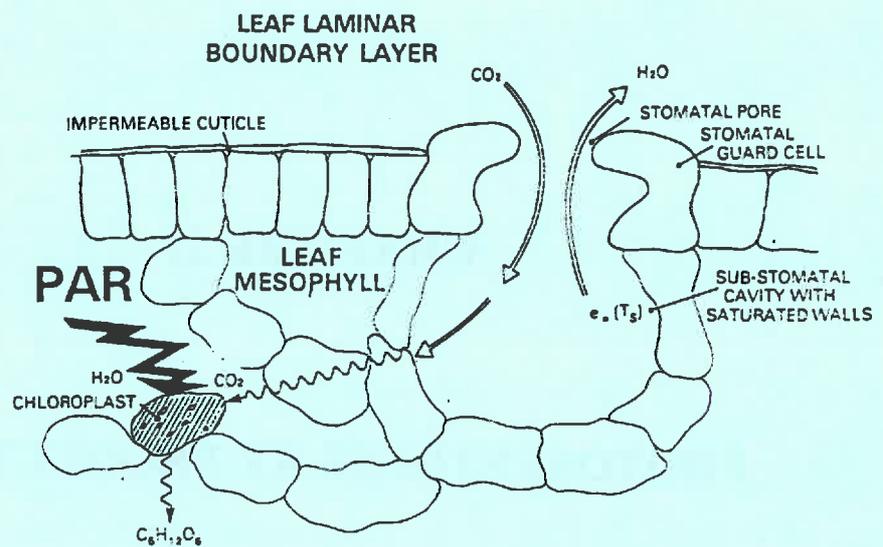


Figure 2.1: Schéma explicatif des échanges de CO₂ et de vapeur d'eau entre la feuille de la plante et l'atmosphère. La photosynthèse s'effectue au niveau du chloroplaste avec une régulation des échanges gazeux par les stomates (Tucker and Sellers, 1986).

CHAPITRE 2 :

PHOTOSYNTHESE ET PRODUCTION

2.1 LES MECANISMES DE LA PHOTOSYNTHESE

2.1.1 LES PLANTES ET LA LUMIERE

Les végétaux chlorophylliens utilisent l'énergie lumineuse pour transformer le dioxyde de carbone de l'atmosphère (CO₂) en glucide. Ce processus est communément appelé **photosynthèse**. C'est une réaction photochimique qui s'effectue dans le chloroplaste, organe formé par des chlorophylles et présent en grande quantité dans les tissus foliaires et tous les organes verts en général (Figure 2.1). Cette réaction s'écrit :



En réalité, le phénomène de photosynthèse est beaucoup plus complexe. La production du glucide par la plante nécessite plusieurs centaines de réactions, qui sont subdivisées en deux catégories, d'une part les réactions dites lumineuses, ou phase claire, qui utilisent le rayonnement solaire, et d'autre part, les réactions dites obscures, ou phase sombre.

2.1.1.1 Phase claire

L'absorption de l'énergie lumineuse s'effectue grâce à des pigments contenus dans les membranes des thylacoïdes, situés au niveau des chloroplastes.

Les thylacoïdes contiennent des structures protéïniques associées à des pigments assimilateurs nommés photo-systèmes. Ces photo-systèmes sont regroupés en deux catégories; la première (PS I) possède un pic d'absorption de l'énergie lumineuse vers 700 nm, alors que pour la deuxième (PS II), le pic d'absorption de l'énergie se trouve dans le rouge (680 nm).

Les pigments assimilateurs PS II utilisent l'énergie absorbée pour dissocier les molécules d'eau en hydrogène (protons) et oxygène, avec libération d'électrons (photolyse de l'eau). Les réactions s'opérant au niveau de PS I et PS II conduisent finalement à la synthèse d'ATP (Adénosine Tri Phosphate) et du NADPH (réducteur) (Figure 2.2).

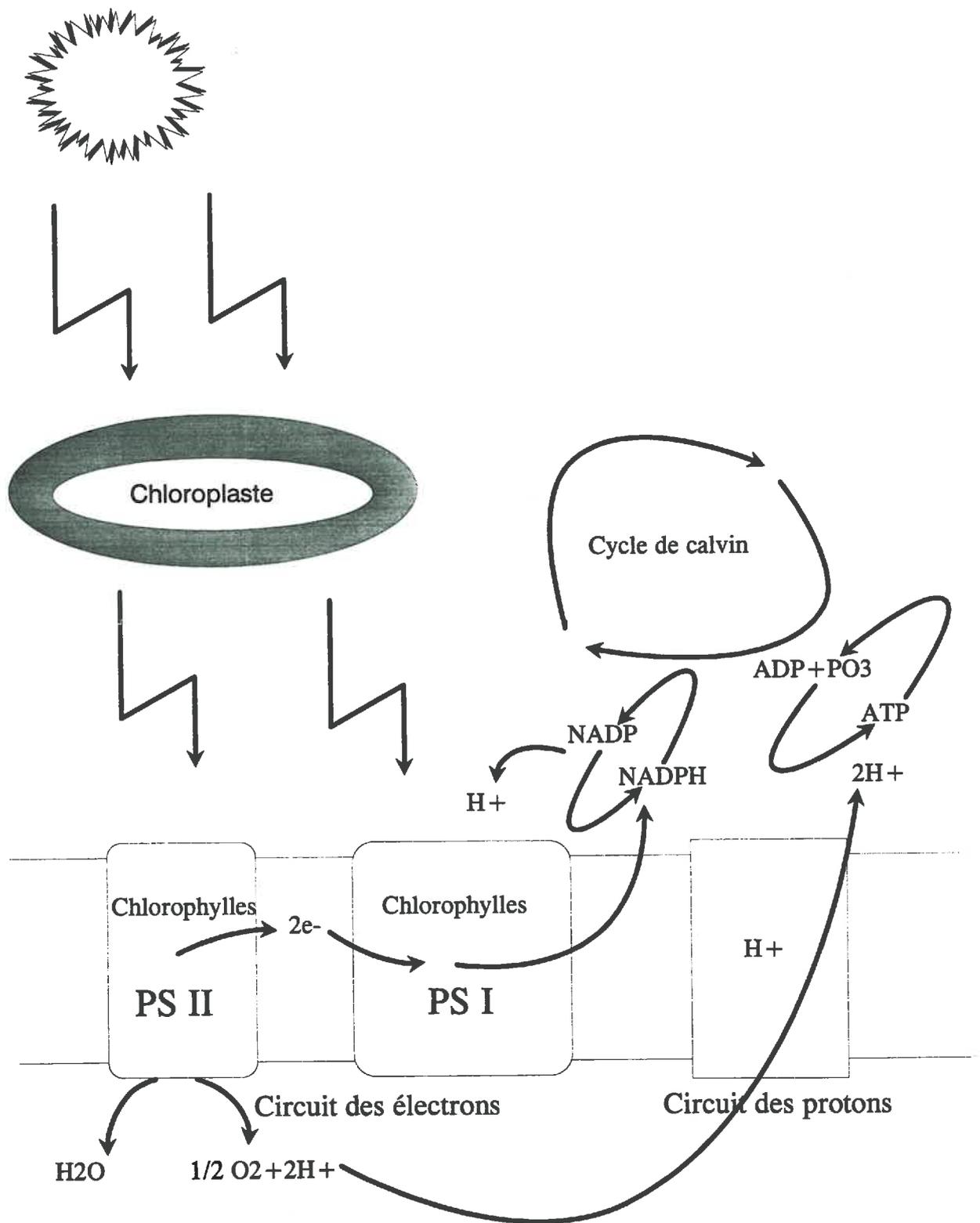


Figure 2.2 : Présentation schématique des réactions de la phase claire de la photosynthèse

2.1.1.2 Phase sombre

L'ATP et le NADPH produits pendant la phase claire sont utilisés dans différents mécanismes de la plante (synthèse d'azote et de soufre). Cependant, la principale utilisation demeure l'assimilation du CO₂ et sa transformation en matière organique.

La première phase du cycle du CO₂, appelé cycle de Calvin-Benson (Calvin, 1956), consiste en une carboxylation d'un corps à cinq carbones (C₅), le ribulose bi-phosphate (RubP), pour produire deux corps en C₃ (Acide PhosphoGlycérique = APG).

Cette carboxylation est effectuée par l'enzyme Rubisco (RubP), qui représente souvent la moitié des protéines solubles du chloroplaste.

Enfin, l'APG est transformée grâce à la NADPH et l'ATP en triose-phosphate, qui pourra être polymérisé en glucides de poids plus élevé, ou régénérer du RubP.

2.1.2 LA PHOTOSYNTHESE

En 1966 Hatch et Slack découvrent un nouveau type de carboxylation chez la canne à sucre: le premier produit de la photosynthèse est une molécule à 4 atomes de carbone (type C₄) formé par la fixation du CO₂ sur une molécule en C₃ (Phospho Enol Pyruvate, PEP), alors que pour les plantes étudiées précédemment, c'était toujours une molécule à 3 atomes de carbone (type C₃). Des études ultérieures ont montré que le type C₄ était répandu chez les graminées tropicales et chez de nombreuses espèces (essentiellement tropicales); de plus, les plantes de type C₄ possèdent tout l'appareil métabolique des plantes C₃ mais en plus une carboxylation originale qui leur permet d'utiliser le gaz carbonique à basse concentration de façon beaucoup plus efficace que les plantes en C₃.

2.1.2.1 A l'échelle de la feuille

La photosynthèse P d'une feuille est souvent présentée par rapport à l'énergie incidente E, sous la forme d'une équation hyperbolique :

$$P = \frac{P_{\max} \cdot E}{P_{\max} / \alpha + E} - R_d$$

avec P_{max} la photosynthèse instantanée brute maximale, α l'efficacité initiale d'utilisation de la lumière et R_d la respiration obscure.

Cette photosynthèse est illustrée pour deux plantes en C₃ et en C₄ sur la figure 2.3, d'où il se dégage 3 points remarquables :

- 1- la pente à l'origine de la relation entre l'assimilation nette et la teneur de l'air en CO₂ est plus forte chez les plantes C₄.
- 2- le point de compensation Γ (concentration en CO₂ pour laquelle l'assimilation nette s'annule) est beaucoup plus faible chez les plantes en C₄.
- 3- La teneur en CO₂ pour laquelle l'assimilation est saturée est bien plus faible chez les C₄ (300 à 350 ppm) que chez les plantes en C₃ (1000 ppm ou plus).

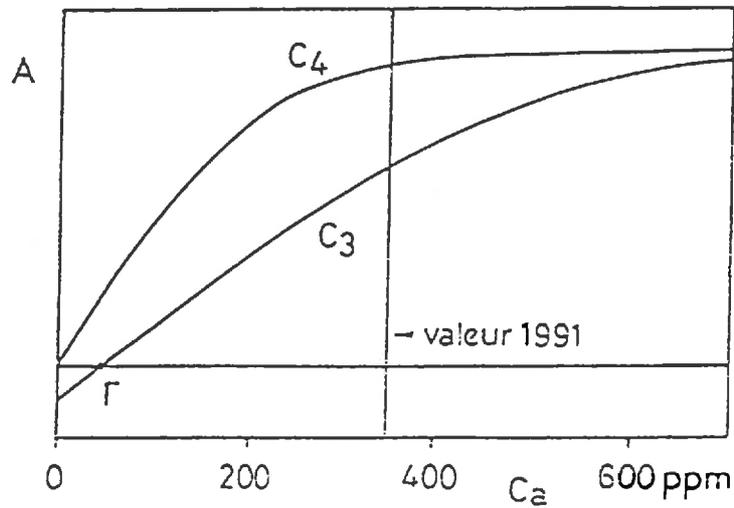


Figure 2.3: Variations de l'assimilation nette A en fonction de la teneur de l'air en CO₂ (Ca) pour des feuilles d'espèces en C₃ et en C₄. (d'après Saugier, 1991)

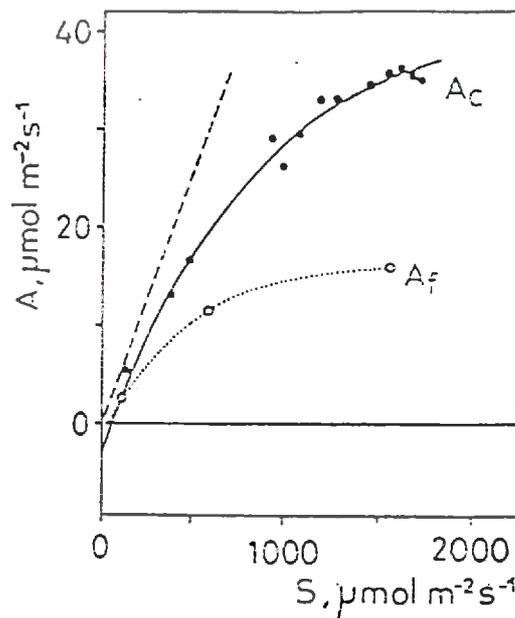


Figure 2.4: Variations de l'assimilation nette A en fonction du rayonnement solaire incident S, pour:

Af: une feuille de *Dactylis glomerata* (résultats exprimés par unité de surface foliaire)

Ac: une culture de *Dactylis glomerata* d'indice foliaire 6 (résultats exprimés par unité de surface de sol). (d'après Saugier, 1991)

Cette distinction entre C3 et C4 se traduit dans les modèles de fonctionnement des plantes par l'importance relative des résistances stomatiques R_s et internes R_i . R_s est inférieure à R_i chez les plantes en C3, alors que c'est l'inverse chez les plantes en C4. Ainsi la résistance des stomates à la diffusion du CO₂ est plus marquée chez les C4 que chez les C3. Mais un mécanisme de transport efficace leur permet de concentrer le CO₂ au niveau du site de carboxylation du RubP.

Les mesures effectuées sur les échanges de CO₂ ont montré que le taux maximum d'assimilation peut varier de 4 à 60 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ pour des plantes en C4 (Saugier, 1986), alors que pour les plantes en C3, il se situe entre 10 et 30 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Van Keulen and Wolf, 1986).

Une certaine catégorie de plantes C4 appelées plante CAM (Crassulecean Acid Metabolisme), possède un mécanisme légèrement différent, puisque la formation du corps en C4 et le passage du CO₂ dans le cycle de Calvin-Benson sont déphasés dans le temps, d'autant plus que les stomates ne sont ouverts que la nuit. Le CO₂ est assimilé et stocké sous-forme d'acide malique ou d'acide aspartique dans les vacuoles des cellules. Les stomates sont fermés durant la journée, et le CO₂ stocké est utilisé pour la photosynthèse. Ce mécanisme est utilisé par certaines plantes adaptées aux conditions désertiques, pour limiter les déperditions en eau.

2.1.2.2 A l'échelle du couvert

L'assimilation du CO₂ au niveau du couvert A_c est rapportée à une unité de surface au sol. Lorsque l'indice foliaire (IF) d'un couvert augmente de 0 jusqu'à 5 (forêts feuillues), A_c augmente parallèlement. A faible IF, presque toutes les feuilles sont au soleil, ainsi la réponse de A_c à l'éclairement est presque similaire à la réponse foliaire. Par contre, à fort IF, seules les feuilles du haut reçoivent un éclairement saturant leur photosynthèse; les autres feuilles reçoivent un éclairement limitant, ce qui veut dire que leur photosynthèse dépend du rayonnement reçu. L'ensemble du couvert répond alors au rayonnement de façon beaucoup plus linéaire qu'une simple feuille (Figure 2.4).

Le premier modèle de pénétration de la lumière est celui de Monsi et Saeki (1953), établi par analogie avec la pénétration-diffusion de la lumière dans un milieu trouble :

$$E = E_0 e^{-k \cdot \text{IF}z}$$

où E est l'éclairement reçu par une surface horizontale après traversée d'une strate de feuillage d'indice foliaire $\text{IF}z$, E_0 est l'éclairement incident, et k est le coefficient d'extinction.

Plusieurs auteurs ont amélioré la précision de ce modèle (Miller et Norman, 1971a et b; Lemeur et Blad, 1974), en prenant en compte les effets de pénombre, la répartition hétérogène du feuillage et de leurs propriétés optiques. Ces modèles combinés avec l'équation de la photosynthèse d'une feuille permettent par intégration de calculer la photosynthèse du couvert végétal.

Ces modèles récents sont devenus plus précis mais aussi plus lourds à utiliser, car ils nécessitent la connaissance d'un grand nombre de paramètres souvent non disponibles pour un couvert végétal particulier. Ils sont très intéressants comme référence car ils intègrent au mieux les connaissances actuelles, mais leur utilisation est réservée à des équipes de chercheurs capables de les tester avec les jeux de mesures nécessaires.

2.1.3 LA RESPIRATION VEGETALE

2.1.3.1 La photorespiration

La photorespiration, ou respiration diurne, est directement liée à l'oxydation rapide des produits intermédiaires du métabolisme de synthèse. Elle s'effectue parallèlement à la photosynthèse pour assurer les échanges gazeux avec l'atmosphère, avec un rejet à l'extérieur de 50 % du CO₂ dans le cas des plantes en C₃.

Par contre, pour les plantes en C₄, le CO₂ rejeté ne se trouve pas à l'extérieur de la plante, mais au niveau cellulaire, et est donc réutilisé pour la photosynthèse. Cette économie d'énergie double le rendement de la photosynthèse nette par rapport aux plantes en C₃.

2.1.3.2 La respiration

La respiration est un processus biochimique qui se manifeste par l'absorption du O₂ servant à oxyder les substrats respiratoires, avec dégagement du CO₂, afin de fournir l'énergie aux différents organes végétaux. Elle constitue donc le terme négatif du bilan carboné.

La respiration consiste à transférer l'énergie contenue dans les métabolites, dans des éléments qui peuvent la restituer ultérieurement, comme les glucides ou les acides (aminés et gras).

L'équation globale de la respiration peut s'écrire sous la forme :



Elle correspond à 20 ou 30 % de la photosynthèse brute, et varie en fonction du poids de la matière végétale et des photosynthèses précédentes (Mc Cree, 1970; Mc Cree and Troughton, 1966). Il a été montré en effet l'existence de deux types de respiration: la respiration d'entretien et la respiration de croissance.

La respiration d'entretien

Elle est proportionnelle à la masse de matière sèche du matériel végétal. Elle a pour rôle la maintenance de la structure cellulaire, et en particulier le renouvellement des protéines. Selon Thornley (1977), il s'agit surtout de dégradation d'anciennes molécules protéiques.

Quand la plante se trouve dans des conditions de stress hydrique, c'est par cette respiration qu'elle tente de survivre en adaptant ses échanges gazeux.

La respiration de croissance

Elle est proportionnelle à la quantité de métabolites issus de la photosynthèse (Penning de Vries, 1975). Son rôle est de transformer les molécules produites par celle-ci pour permettre la synthèse du tissu végétal.

Cette respiration (R) a été modélisée en fonction de la photosynthèse (P) et de la biomasse produite (B) par :

$$R = a P + b B$$

Les mesures de respiration ont montré que la respiration de croissance représente 25 à 30 % du CO₂ fixé par la plante, alors que la respiration d'entretien n'en représente que 1.5 % de la biomasse B pour une journée à 25°C.

2.1.3.3 Facteurs influants sur la respiration

Comme pour la photosynthèse, quand les conditions sont non limitantes, la respiration ne peut pas dépasser un maximum, aux alentours de 1.5 ml de CO₂ par gramme de matière sèche et par heure. Cette limite est rarement atteinte car la respiration est limitée par des facteurs environnementaux et biologiques.

La température. La température entraîne une stimulation du fonctionnement de la respiration, tant qu'elle est inférieure à un certain seuil. Quand il y a dépassement du maximum de température, le système respiratoire subit des altérations, qui ont pour conséquence une diminution de la production de matière sèche.

La lumière. La lumière a une action stimulante sur la respiration, car elle favorise la stabilité du contenu en CO₂, nécessaire à la synthèse des glucides.

Le taux d'oxygène. Le manque d'oxygène se manifeste dans le mécanisme respiratoire par un phénomène de fermentation. La respiration atteint un maximum pour un taux d'oxygène qui varie entre 1 et 4 %.

La concentration en CO₂. Quand on augmente la concentration en CO₂, le rendement de l'activité photosynthétique est amélioré. Cependant, il a été observé chez certaines plantes que l'enrichissement excessif en CO₂ provoque une diminution progressive de l'assimilation par rapport à une condition normale. Cette baisse qui est due à une perturbation d'activité de la Rubiscose, diminue l'intensité de la respiration.

L'âge de la plante. L'activité de la respiration évolue avec l'âge de la plante. Elle reste élevée pendant toute la période de croissance pour diminuer ensuite. Des pics d'intensité sont observés pendant la floraison et la maturation des fruits.

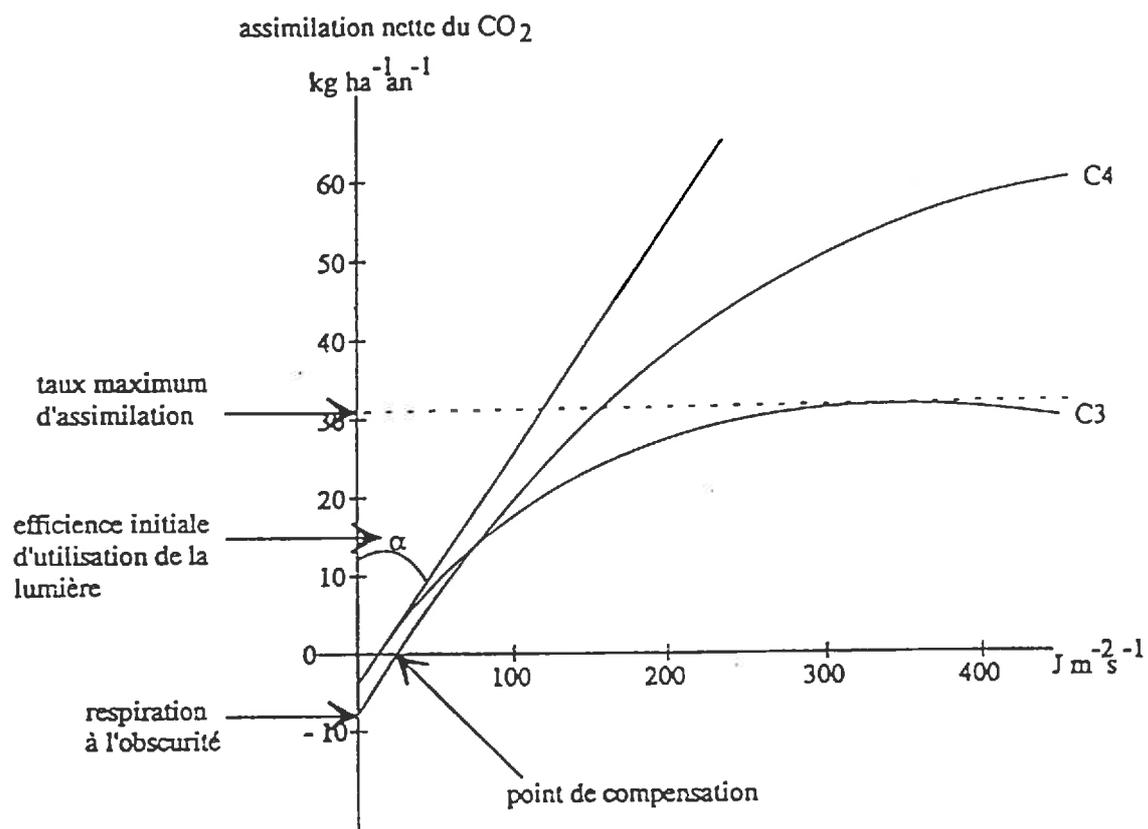


Figure 2.5: Caractéristiques d'assimilation nette du CO₂ par les feuilles de plantes en C₃ et C₄. (d'après Van Keulen et Wolf, 1986).

2.2 LA PRODUCTION VEGETALE

La littérature fournit plusieurs termes qui désignent la production végétale: **PPB**, **PPN**, **biomasse**, **phytomasse**, etc.

La **PPB** (Production Primaire Brute) correspond à la somme des échanges effectués par la photosynthèse jusqu'à un temps donné.

Quand on s'intéresse aux assimilations utilisées pour produire la matière végétale, on utilise le terme **PPN** (Production Primaire Nette). Il correspond au **PPB** diminué des pertes dues aux respirations (**R**):

$$\text{PPN} = \text{PPB} - \text{R}$$

La production primaire nette (**PPN**) subit des modifications au cours du temps. Ces modifications ont plusieurs origines; elles sont d'une part d'origine anthropique ou animale, à travers les récoltes, et l'alimentation des animaux; et d'autre part, certains végétaux ont atteint entre temps leur stade de sénescence. De ce fait, la quantité de matière végétale réellement observable sur le terrain est désignée par le terme **biomasse végétale** ou **phytomasse**.

2.2.1 LES FACTEURS DE VARIATION DE LA PRODUCTION

La production végétale des couverts fluctue en fonction de plusieurs paramètres ayant une conséquence plus ou moins importante. Ces paramètres sont d'ordre climatique et édaphique, ou d'origine anthropique et animale.

2.2.1.1 Facteurs climatiques

Le rayonnement incident

D'après la figure 2.5, les plantes en C3 et C4 ne réagissent pas de la même manière à l'énergie incidente. Les plantes en C4, essentiellement tropicales sont dotées d'une forte capacité d'assimilation même en cas de faible quantité d'énergie solaire.

En général, les couverts sont structurés de manière à ce qu'ils profitent au maximum de cette énergie, en adaptant leurs paramètres physiologiques, comme l'indice foliaire, la distribution des angles foliaires et la concentration en chlorophylle.

Le maximum d'assimilation varie de 2 à 60 μmol de $\text{CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ lorsqu'on passe d'une espèce d'ombre à une annuelle du désert (Mooney et al., 1976). Ces variations sont liées apparemment à l'importance du système photosynthétique : quantité de Rubiscose et de transporteurs d'électrons par unité de surface foliaire (Field et Mooney, 1986).

La température

La température optimale pour un fonctionnement normal de la production végétale varie en fonction des plantes. Dans le cas de la végétation tropicale, cette température est comprise entre 30°C et 35°C. Des dégâts importants et irréversibles peuvent arriver vers 45°C, suite à une destruction des enveloppes membranaires.

2.2.1.2 Facteurs édaphiques

La pluviométrie et l'état hydrique du sol

Elle représente le facteur déterminant qui pilote la production végétale en zone aride et semi aride. Plusieurs auteurs ont montré à une échelle régionale ou sur de grandes séries temporelles, l'existence d'une linéarité entre la production ou la biomasse végétale et la pluviométrie annuelle mesurée sur un réseau de stations météorologiques. Cependant, cette approche n'est pas tout à fait opérationnelle, car d'une part elle perd sa validité dès que les précipitations annuelles dépassent une moyenne de 600 mm (Diarra et Breman, 1975; Le Houerou et Hoste, 1977; Deshmukh, 1984); et d'autre part, elle ne prend pas en compte la répartition intrasaisonnière des précipitations, ou la redistribution de l'eau par ruissellement, infiltration ou stockage dans le sol.

Dans les zones sahéliennes, l'alimentation hydrique reste le facteur le plus limitant, et la vigueur des plantes est affectée par tout facteur qui intéresse l'économie de l'eau.

L'eau représente l'élément principal des cellules végétales (60 à 90 %). Son rejet par évapotranspiration permet le refroidissement des organes de la plante, et constitue le moteur principal des circulations de la sève pour alimenter le tissu végétal.

Pour remédier à un déficit hydrique, les plantes limitent leurs déperditions en eau, en fermant leurs stomates. Une longue période de stress hydrique se traduit par une dégradation des cellules végétales, à cause d'une diminution des activités photosynthétiques. Ceci peut aboutir à la mort de la plante. Dans le cas des plantes en C4, on observe une meilleure capacité de gestion des réserves hydriques du sol que les plantes en C3. De plus, la résistance des stomates (R_s) étant plus élevée chez les plantes en C4, la concentration interne en CO₂ est faible, mais un mécanisme de transport efficace leur permet de concentrer le CO₂ au niveau du site de carboxylation du RubP.

Il est toutefois très difficile de quantifier les conséquences du stress hydrique sur un couvert végétal, car d'une part le dispositif expérimental est très coûteux et lourd à mettre en oeuvre, et d'autre part la réponse de la plante au stress est très variable, et dépend du type de végétation, du type de sol, de la durée du stress, et du stade phénologique de la plante.

L'alimentation minérale

L'augmentation des éléments nutritifs dans le sol se manifeste par une augmentation de la production végétale. La production de chlorophylle et des protéines dont la Rubiscose, qui représente 50 % des protéines foliaires, dépend beaucoup de la quantité d'azote contenue dans le sol. Des études menées sur le blé ont montré une nette amélioration de la production après une fertilisation azotée, en augmentant la surface foliaire, et donc la surface photosynthétiquement active, plutôt que l'intensité photosynthétique (Garcia et al. 1988).

La pauvreté minérale est un caractère important des sols où l'on cultive du mil. Mais pour répondre à la demande nutritionnelle, le mil développe un système racinaire très performant, pour mieux explorer les ressources du milieu. La puissance du système racinaire du mil est favorisée par les sols sableux à sablo-argileux, très faciles à pénétrer.

2.2.2 ESTIMATION DE LA PRODUCTION VEGETALE

Plusieurs méthodes sont utilisées pour estimer la biomasse. Ces méthodes sont très différentes les unes des autres, et elles couvrent une large gamme d'échelles spatiales et temporelles. Les mesures d'échanges de CO₂ peuvent être faites à l'échelle de la feuille, de la plante ou de la petite parcelle. A l'échelle des parcelles de culture, les mesures de production primaire sont réalisées grâce à un suivi de la variation de biomasse.

Outre les mesures, une autre voie d'estimation de la production est basée sur des modèles empiriques ou déterministes. Mais là encore des problèmes de transferts d'échelle se posent, ce qui multiplie la diversité des modèles spécifiques à chaque niveau.

2.2.2.1 Mesures non destructives des échanges de CO₂

A l'échelle de la feuille

A cette échelle, les mesures d'échanges de CO₂ sont effectuées dans une chambre d'assimilation à circuit ouvert, où la composition gazeuse est maintenue stable grâce à une pompe à air dont le débit est constant. Ce système permet d'avoir des mesures de CO₂ et d'O₂ avec une bonne précision (Saugier, 1986; Van Keulen and Wolf, 1986). L'absorption et la localisation du CO₂ sont possibles grâce à des isotopes radioactifs comme le ¹⁴C, ou stables comme le ¹³C.

A l'échelle de la plante et du couvert

A cette échelle, on utilise encore la technique de la chambre d'assimilation, mais cette fois les mesures sont plus délicates à réaliser, à cause des problèmes d'étanchéité du système, des perturbations dues à la respiration du sol, et des difficultés d'homogénéisation de l'air ambiant. Les mesures journalières sont obtenues par interpolation de plusieurs mesures réalisées au cours de la journée.

D'autres techniques en cours de développement permettent de mesurer les flux turbulents de CO₂ au sommet et à la base d'un couvert (Perrier et al., 1977; Monteith et al., 1964; Saugier, 1970), mais sont difficilement accessibles.

2.2.2.2 Mesures destructives de biomasse

Ce sont les techniques les plus couramment utilisées pour l'estimation de la biomasse aérienne d'un couvert. Elles consistent à choisir une surface, le plus souvent un carré (quelques m²) dont on pèse la biomasse après séchage. Des mesures bien réparties sur le cycle végétatif permettent d'établir un suivi de la production primaire nette. Une seule mesure réalisée au moment du maximum de biomasse ne prendra pas en compte les différentes pertes dues à la sénescence par exemple.

Une estimation de la production à l'échelle de la parcelle ou à une échelle régionale nécessite obligatoirement une bonne technique d'échantillonnage, pour améliorer la précision des résultats. Cet échantillonnage doit être représentatif du domaine concerné, en prenant un nombre suffisant de carrés de rendement judicieusement répartis. Le choix des échantillons peut être fait de deux manières, soit de façon visuelle par un expert qui connaît bien le milieu agricole, soit d'une façon statistique par un tirage aléatoire, avec ou sans stratification préalable.

Les techniques qui permettent de mesurer la production racinaire sont quant à elles très difficilement réalisables et peu précises en raison de la profondeur de l'enracinement et de la compacité du sol.

2.2.2.3 Estimation à l'aide de modèles

Modèles statistiques

Des modèles statistiques ont été développés pour estimer la production primaire à une échelle régionale et/ou globale, en utilisant des données aisément accessibles telles que les bases de données climatologiques.

Lieth et Whittaker (1975) ont établi des relations statistiques qui relient la production primaire à la pluviométrie annuelle et à la température moyenne annuelle ou à l'évapotranspiration réelle (ETR).

Des relations de ce type ont été utilisées sur des régions spécifiques telles que la zone soudano-sahélienne (Diarra et Breman, 1975; Le Houerou et Hoste, 1977) ou l'Afrique de l'Est et l'Afrique du Sud (Deshmukh, 1984). Ces relations nécessitent d'être calibrées pour chaque année concernée, et sont difficilement extrapolables à des régions autres que celles où elles ont été calibrées.

Modèles déterministes

Ces modèles sont développés à différents niveaux (feuille, plante, couvert, région et global), pour décrire l'activité photosynthétique et la production végétale.

A l'échelle de la feuille

L'activité photosynthétique instantanée de la feuille peut être décrite par des modèles mécanistes (Goudriaan, 1982; Charles-Edwards, 1984), établis grâce aux relations qui lient le taux de photosynthèse instantanée à l'intensité lumineuse.

Le modèle proposé par Goudriaan (1982) permet de calculer la photosynthèse foliaire instantanée brute P_b :

$$P_b = P_{\max} \cdot \left(1 - \exp^{-\alpha \frac{RPA}{P_{\max}}}\right)$$

où P_{\max} représente la photosynthèse instantanée brute maximale, α l'efficacité initiale d'utilisation de la lumière, et RPA le rayonnement photosynthétiquement actif.

Le modèle de Charles-Edward (1984) permet de calculer la photosynthèse instantanée nette P_n :

$$P_n = \frac{(\alpha \cdot RPA \cdot P_{\max})}{(\alpha \cdot RPA - P_{\max} - R_d)}$$

où R_d est la respiration obscure.

A l'échelle du couvert.

La modélisation de la photosynthèse à l'échelle de la parcelle consiste en une intégration des photosynthèses de chaque plante, en utilisant la loi de pénétration de la lumière dans le couvert, et en prenant en compte des paramètres qui varient spatialement, de type climatique et édaphique (Innis, 1978; Van Keulen and Wolf, 1986; Penning de Vries et al., 1989; Jackson et Palmer, 1979; Wang et Jarvis, 1990).

Ces modèles sont très difficiles à mettre en oeuvre, soit parce que les temps de calculs sont très importants, soit parce que les données nécessaires sont rarement disponibles.

Un modèle plus simple a été élaboré par Varlet-Grancher et al. (1982). C'est une version simplifiée du modèle de Monteith (1972) qui relie la production primaire au rayonnement solaire absorbé par la végétation, et qui est extrapolable à une échelle régionale et même globale.

A l'échelle régionale et globale.

La méthode la plus couramment utilisée à l'échelle régionale et globale est celle basée sur le modèle de Monteith (Justice, 1986; Prince and Justice, 1991; Loudjani, 1993, Ruimy et al., 1994). Son succès est dû à sa relative facilité de mise en oeuvre, et au faible nombre de coefficients et variables utilisés. C'est cette démarche qui sera suivie dans le cas de notre étude d'estimation de la production primaire, en étalonnant les paramètres du modèle pour la zone sahélienne.

2.2.3 DESCRIPTION DU MODELE DE PRODUCTION DE MONTEITH

Dans le paragraphe précédent sont cités plusieurs modèles qui explicitent de façon plus ou moins détaillée les différents processus de la production primaire, à des niveaux qui vont de la feuille à la région. Ces modèles sont souvent complexes, et nécessitent un pas de temps trop fin pour être utilisés dans notre étude.

Le modèle de Monteith est le plus adapté pour arriver à estimer la production en zone sahélienne, car, en plus de sa simplicité, il offre l'avantage d'utiliser des pas de temps plus grands, de la journée à 10 jours. Il ne prend pas toutefois en compte les effets de stress (essentiellement le stress hydrique en zone sahélienne) qui peuvent affecter le fonctionnement des couverts végétaux.

2.2.3.1 Les bases biophysiques

La réponse photosynthétique d'un couvert au rayonnement incident est quasiment linéaire (§ 2.1.2.2). Cette caractéristique est valable pour n'importe quel couvert tant qu'il est en conditions non limitantes (bonne alimentation hydrique et minérale).

Monteith (1972) a été le premier à tirer profit de cette relation, en introduisant la notion d'efficacité énergétique (ϵ), définie comme le rapport entre l'énergie solaire stockée par la photosynthèse, et le rayonnement solaire extraterrestre.

$$dP = \epsilon \cdot RG_0 \cdot dt$$

où dP représente le différentiel de la matière sèche produite, dt le différentiel temps, et RG_0 la constante solaire.

Pour mieux prendre en compte l'influence des facteurs physiques, biologiques et géométriques, l'efficacité énergétique est décomposée en un produit de 7 efficacités élémentaires.

$$\epsilon = \epsilon_g \cdot \epsilon_a \cdot \epsilon_c \cdot \epsilon_i \cdot \epsilon_q \cdot \epsilon_d \cdot \epsilon_r$$

où ϵ_g est le facteur géométrique (le cosinus de l'angle d'incidence par rapport à la verticale), ϵ_a la transmittance de l'atmosphère, ϵ_c l'efficacité climatique, ϵ_i l'efficacité d'interception du rayonnement incident, ϵ_q l'efficacité photochimique, ϵ_d l'efficacité de diffusion des molécules de CO₂ au dessus du couvert et ϵ_r l'efficacité de respiration.

Ce modèle tel qu'il a été conçu n'était pas utilisable à une échelle régionale, à cause de certaines efficacités telles que l'efficacité de diffusion et l'efficacité de respiration qui sont difficiles à appréhender sur de grandes surfaces.

Il était donc indispensable pour utiliser cette démarche, de procéder à une simplification du modèle, en réduisant le nombre de coefficients.

C'est grâce aux travaux de Varlet-Grancher et al. (1982) que cette simplification a pu être réalisée. En effet, dans le modèle de Monteith, l'apport d'énergie est établi à partir de la constante solaire. Or il existe une mesure couramment réalisée dans les stations météorologiques, le rayonnement global (RG), et qui n'est rien d'autre que la constante solaire pondérée par le facteur géométrique et la transmittance atmosphérique.

$$RG = RG_0 \cdot \varepsilon_g \cdot \varepsilon_a$$

Enfin, les efficacités ε_q , ε_i et ε_c ont été agrégées en une seule efficacité ε_b , qui caractérise la transformation de l'énergie solaire absorbée par le couvert végétal en matière sèche.

La formulation simplifiée du modèle de Monteith est donc de la forme:

$$dP = RG \cdot \varepsilon_c \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_b \cdot dt$$

où dP est le différentiel de la production primaire nette ou brute, RG est le rayonnement global, ε_c est l'efficacité climatique (RPA/RG), ε_i est l'efficacité d'interception qui correspond à la fraction du RPA interceptée par le couvert, ε_b est l'efficacité de conversion du rayonnement absorbé en matière sèche.

2.2.3.2 Le rayonnement global (RG)

Le rayonnement global est la source d'énergie d'un écosystème. A la surface de la terre, ce rayonnement est le produit de l'interaction entre le rayonnement extra-terrestre et les composantes atmosphériques. En effet, au cours de leur traversée de l'atmosphère, les très faibles longueurs d'ondes ($\mu < 0.4 \mu\text{m}$) du rayonnement solaire sont presque totalement absorbées, notamment par l'ozone (O_3). Dans le visible ($0.4\mu\text{m}$ à $0.7\mu\text{m}$), c'est surtout le phénomène de diffusion qui intervient, essentiellement dû aux aérosols et aux molécules, suivi dans le proche et moyen infrarouge ($0.7 \mu\text{m}$ à $4 \mu\text{m}$) par le processus d'absorption, dû cette fois-ci aux gaz atmosphériques (H_2O , O_2 , CO_2). Ces absorptions interviennent dans des bandes de longueurs d'onde bien définies (Figure 2.6).

Les variations du CO_2 proviennent surtout des phénomènes de combustion, de photosynthèse et de décomposition, ainsi que des échanges océan-atmosphère, alors que les variations du contenu en eau de l'atmosphère sont dues au cycle continu Evaporation-Condensation-Précipitation, et surtout aux mouvements du Front Inter-Tropical (FIT) dans les zones sahéliennes. L'ozone stratosphérique, fort d'une stabilité chimique, est présent dans l'atmosphère avec des masses volumiques variables en latitude. Ceci est essentiellement dû au phénomène de transport et aux réactions chimiques à haute altitude.

Enfin, les aérosols sont des particules en suspension dans l'atmosphère qui peuvent exister sous trois états; liquide, solide ou mixte. Souvent, on les classe suivant leur origine: les poussières (terres), les embruns (océans et mers), et enfin les suies et goudrons (chimiques). Au Sahel, ce sont les poussières fines et les sables en suspension qui prédominent.

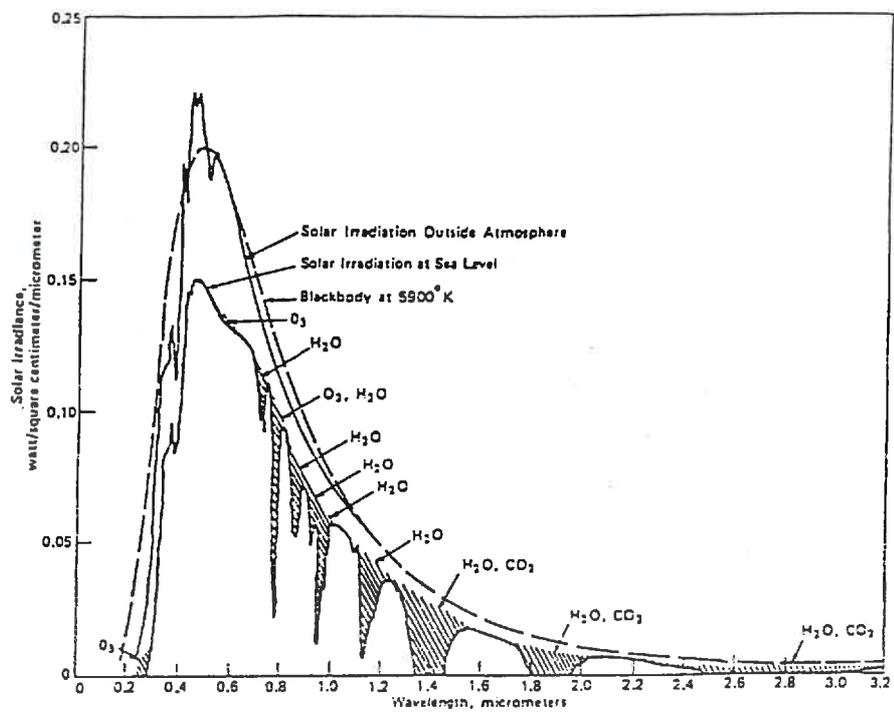


Figure 2.6: Spectre du rayonnement solaire et bande d'absorption des constituants atmosphériques (d'après Sellers, 1965)

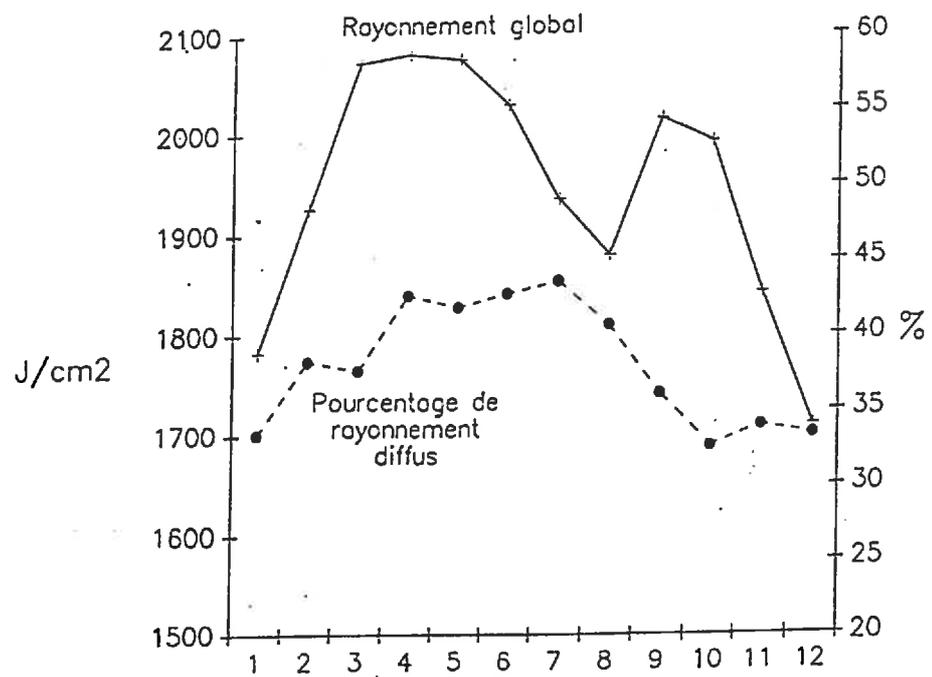


Figure 2.7: Moyennes mensuelles (Niamey, 1979/1988) : (+) : Rayonnement global journalier, (•) : Pourcentage de rayonnement diffus. (d'après Bégué, 1991).

Composantes du rayonnement global au Sahel

Les variations mensuelles du rayonnement global à Niamey montrent deux minima (Figure 2.7) : juillet-août et décembre-janvier. Ces deux minima peuvent être expliqués par les variations de deux composantes du rayonnement global : le rayonnement direct et le rayonnement diffus.

- Au printemps et en été (Avril-Août), l'angle zénithal solaire est inférieur à 10° , ce qui engendre un rayonnement global élevé. Le rayonnement diffus pendant cette période est essentiellement dû aux couvertures nuageuses, aux brumes "humides" et aérosols.

- En hiver (Septembre-Mars), l'angle zénithal solaire varie entre 10° et 37° , ce qui se traduit par un rayonnement global moins fort qu'en saison des pluies. Le rayonnement diffus pendant cette période est dû principalement aux poussières en suspension dans l'atmosphère.

2.2.3.3 L'efficience climatique

L'efficience climatique ϵ_c est le rapport entre le Rayonnement Photosynthétiquement Actif (RPA) et le rayonnement global RG.

Le rayonnement photosynthétiquement actif (RPA)

Seule une partie du rayonnement solaire est utilisée par l'appareil photosynthétique pour être convertie en énergie chimique. Cette gamme du spectre solaire correspond aux bandes d'absorption des pigments chlorophylliens (chlorophylles a et b) et des caroténoïdes (carotènes et xanthophylles) des organes végétaux.

Cette absorption du rayonnement est réalisée dans le visible. McCree (1972) a étudié la réponse photosynthétique de plusieurs espèces de plantes entre 380 nm et 750 nm, et il a observé l'existence de deux maxima de la réponse foliaire, un à 440 nm, et un autre à 680 nm (Figure 2.8). Par contre, l'absorption du rayonnement est négligeable pour des longueurs d'onde supérieures à 700 nm, alors que celles qui sont inférieures à 400 nm (rayonnement ultra-violet) sont filtrées par l'épiderme des feuilles. Ces résultats sont confirmés par les travaux d'Inada (1976) qui a étudié de nombreuses espèces herbacées et ligneuses.

Le domaine du RPA que nous avons choisi est celui qui a été adopté par la communauté scientifique, c'est à dire celui défini par McCree: entre 400 nm et 700 nm.

Cependant, il reste le problème de la grandeur à mesurer: le rendement quantique du nombre de photons réellement absorbé par les pigments entre 400 nm et 700 nm, ou l'énergie absorbée (l'énergie d'un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde). Mc Cree a pu montrer, en travaillant sous éclairage artificiel, que la mesure du flux de photons est bien meilleure que la mesure énergétique (différence de 7% suivant l'espèce de la plante). Ces conclusions ont été discutées ensuite par Varlet-Granchet qui a travaillé pour sa part sous éclairage naturel, et a montré que les mesures énergétiques sont suffisantes pour caractériser la photosynthèse.

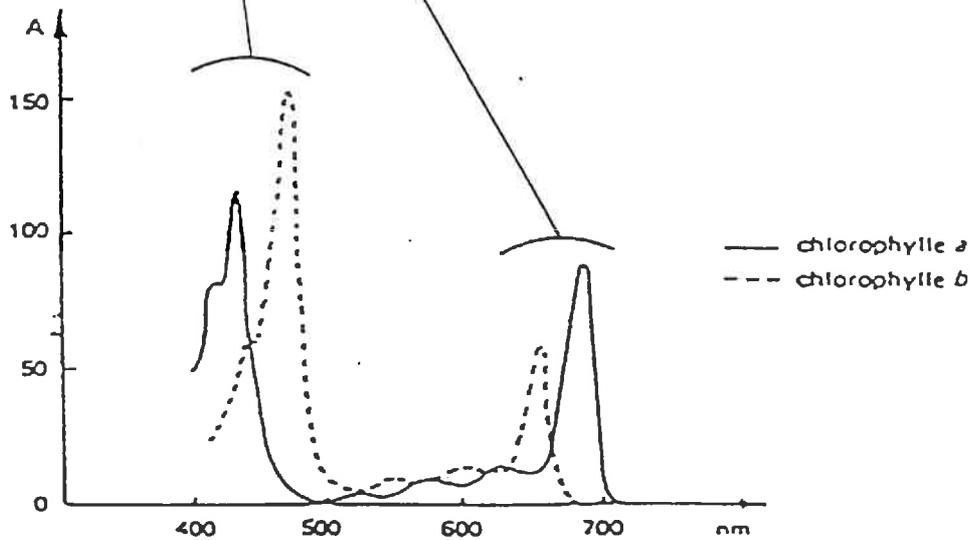
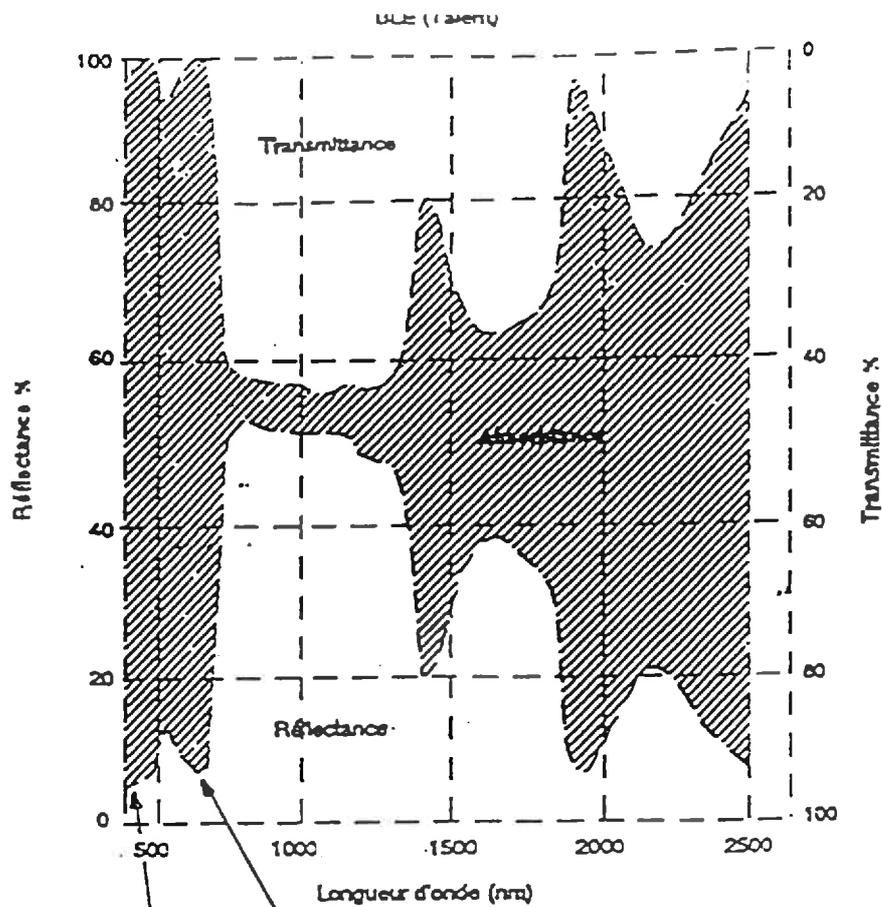


Figure 2.8: Absorption du rayonnement solaire par les feuilles: a) évolution des propriétés optiques d'une feuille de blé en fonction de la longueur d'onde (d'après Guyot et al., 1983). b) L'absorption des chlorophylles a et b ($\log(I_0/I)$) en fonction de la longueur d'onde (I_0 est la lumière incidente et I la lumière transmise) (d'après Heller et al., 1989).

Mesures de l'efficacité climatique

Thekaekara (1976) a montré que cette efficacité est constante hors atmosphère, et vaut 0.38. Or, au niveau de la surface terrestre, la composition du rayonnement global dépend de l'état de l'atmosphère, et notamment de la proportion des rayonnements diffus et directs. Ces variations de ϵ_t peuvent être modélisées en fonction des principales composantes de l'atmosphère et de l'élévation solaire (Avaste et al., 1962, Katz et al., 1981). Mais le manque d'informations précises sur la composition de l'atmosphère rend cette démarche irréalisable.

Les variations au cours de la journée de l'efficacité climatique sont liées à l'angle zénithal solaire (θ_s). Quand θ_s augmente, l'efficacité climatique du rayonnement direct diminue (Baker et Frouin, 1987), alors que celle du rayonnement diffus croît (Monteith, 1969). Cependant, l'efficacité climatique peut être considérée comme constante sur une journée, car la majorité du rayonnement global (90%) est reçue pour des angles zénithaux solaires inférieurs à 60°, où les écarts de ϵ_t à la valeur moyenne peuvent être négligés.

2.2.3.4 Efficacité d'interception et efficacité d'absorption

Le rayonnement intercepté (R_i) est déduit du bilan radiatif entre le rayonnement incident (R_0) et celui transmis au sol (R_t) :

$$R_i = R_0 - R_t$$

Cependant, sur la totalité du Rayonnement Photosynthétiquement Actif intercepté, seule une partie est absorbée par le couvert végétal. Elle est déterminée par le bilan radiatif entre le rayonnement reçu par le couvert (le rayonnement incident R_0 et le rayonnement réfléchi par le sol R_{rs}) et le rayonnement perdu par le couvert (rayonnement réfléchi par l'ensemble sol-plante R_r et le rayonnement transmis au sol R_t) (Varlet-Grancher et al., 1989) :

$$R_a = R_0 + R_{rs} - R_r - R_t$$

Lorsqu'on normalise ces deux équations par le rayonnement incident on obtient :

$$\epsilon_i = 1 - \tau$$

où $\epsilon_i = R_i / R_0$ est l'efficacité d'interception et τ la transmittance du couvert,

et

$$\epsilon_a = 1 - \tau - \rho + \tau \cdot \rho_s$$

où $\epsilon_a = R_a / R_0$ est l'efficacité d'absorption, $\rho = R_r / R_0$ est la réflectance du couvert, et ρ_s est la réflectance du sol.

Asrar et al. (1989) ont montré que dans le RPA ϵ_i et ϵ_a peuvent être très proches du fait de la forte absorption chlorophyllienne. Cependant il faut faire la distinction entre les deux efficacités pendant la phase de sénescence de la végétation, car la dégradation de l'appareil photosynthétique diminue les phénomènes d'absorption par le couvert.

Mesures de l'efficacité d'absorption

Il existe deux méthodes, directe et indirecte, pour mesurer l'efficacité d'absorption.

Méthode directe

Elle consiste à mesurer les termes du bilan radiatif par des capteurs mesurant les différents flux (incident, transmis et réfléchi par le couvert et le sol) dans le domaine spectral 0.4 μ m-0.7 μ m (Figure 2.9) (Bégué, 1991; Bégué et al., 1994). Elle est difficile à mettre en oeuvre à cause des problèmes d'échantillonnage à prendre en compte pour bien représenter l'hétérogénéité du couvert.

L'estimation de l'efficacité d'interception peut être améliorée en disposant les capteurs au dessus de la strate sénescence (elle ne participe pas à la photosynthèse). Mais ceci accentue les difficultés du dispositif expérimental.

Méthodes indirectes

Les méthodes indirectes reposent sur l'estimation de la fréquence de trous dans le couvert. Elle peut être estimée de deux manières; soit par photographies hémisphériques (Bonhomme et Chartier, 1972), soit par la méthode des "points quadrats" qui consiste à enfoncer une aiguille dans le couvert, et à mesurer le nombre de points de contact aiguille-feuilles.

Facteurs de variation

Le principal facteur de variation de l'efficacité d'interception est l'indice foliaire (IF). Il est souvent utilisé pour estimer ϵ_i par le formalisme (Monteith, 1981; Gallo et al, 1985) :

$$\epsilon_i = \epsilon_{i_{\max}} \cdot (1 - \exp(-k \cdot IF))$$

où $\epsilon_{i_{\max}}$ est l'efficacité d'interception maximale, considérée souvent comme constante et égale à 0.95 (Loomis et Williams, 1963), et k est le coefficient d'extinction du rayonnement dans le couvert végétal, qui dépend des propriétés optiques et géométriques du couvert (Varlet-Grancher et Bonhomme, 1979).

2.2.3.5 Efficacité de conversion

L'efficacité de conversion (ϵ_p) est le rapport entre la matière sèche produite pendant un laps de temps donné Δt , et l'énergie photosynthétiquement active absorbée pendant la même période (RPA_a). Cette efficacité est exprimée en g/MJ et peut être évaluée expérimentalement (Bégué, 1991, 1993a et 1993b).

Mesure de ϵ_p

Les mesures consistent à faire des prélèvements de matière sèche d'un couvert pour en déduire la production primaire nette, et à mesurer le RPA intercepté ou absorbé. Ces mesures sont soumises à certaines contraintes qui se répercutent sur la précision de ϵ_p . D'une part les mesures de rayonnement intercepté sont délicates à faire en raison des problèmes déjà évoqués, liés à l'échantillonnage et aux feuilles sénescences; et d'autre part, les mesures de matière sèche ne concernent que la partie aérienne du couvert.

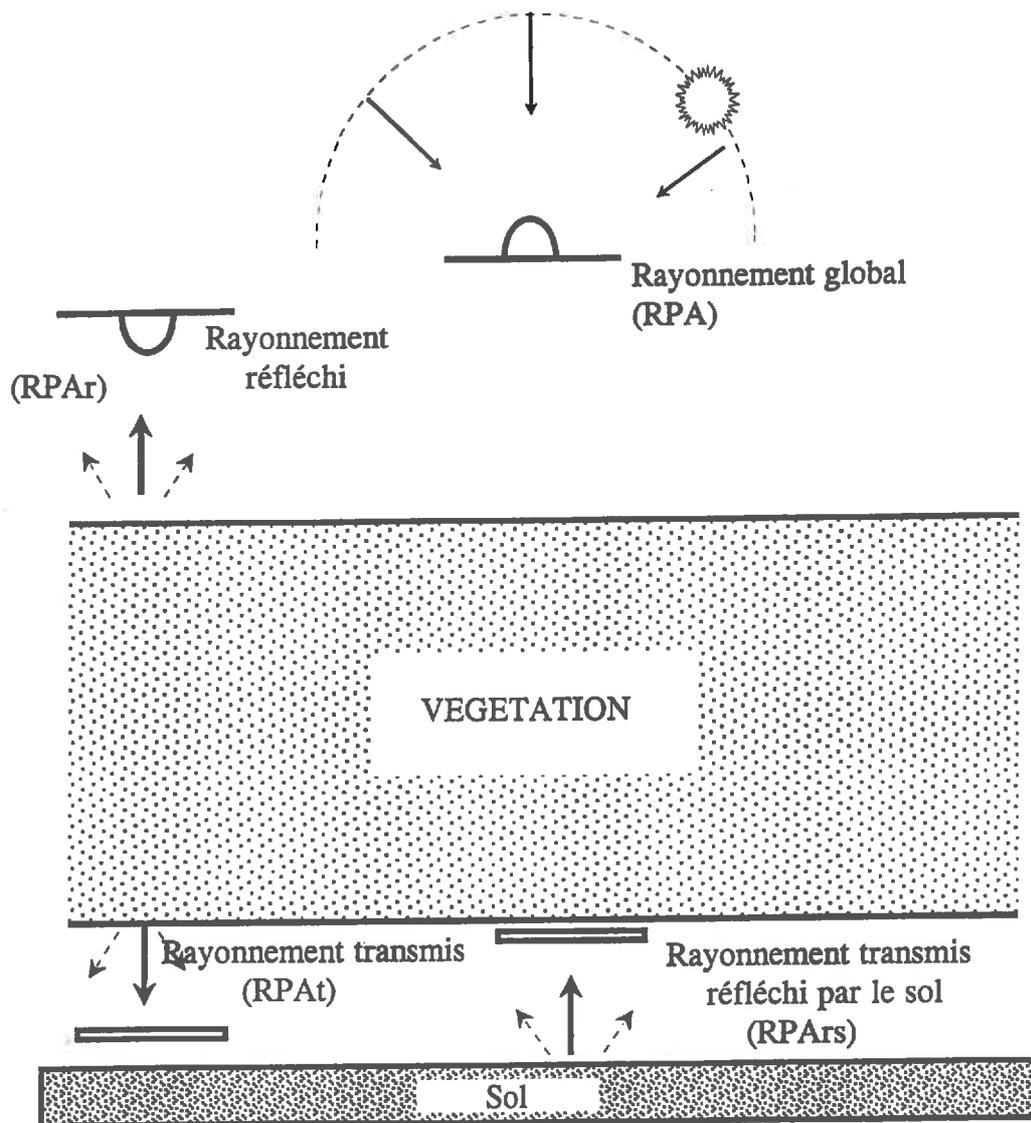


Figure 2.9 : Bilan radiatif d'un couvert dans le domaine RPA (adapté de Varlet-Grancher et Bonhomme, 1979).

Les facteurs de variation de ϵ_p

La littérature est abondante en valeurs de ϵ_p . Mais celles-ci sont difficiles à comparer, car les mesures sont souvent effectuées de façon différente les unes des autres. On observe deux facteurs principaux de variation de ϵ_p en conditions non limitantes :

* Le type de fonctionnement photosynthétique. Les travaux de Gosse et al. (1986) sur plusieurs types de plantes ont montré que l'on peut classer les cultures en trois catégories, suivant leur efficacité de conversion. Les plantes en C4 sont caractérisées par une forte efficacité de conversion moyenne, de l'ordre de 2.51 g/MJ. Celle des plantes en C3 n'est que de 1.93 g/MJ. La troisième catégorie est celle des légumineuses, qui sont aussi des plantes en C3, mais dont la dépense énergétique pour fixer l'azote atmosphérique se répercute par une faible efficacité de conversion moyenne, de l'ordre de 1.72 g/MJ.

* Le stade phénologique. La valeur de l'efficacité de conversion varie en fonction du développement de la plante. Ceci peut être expliqué d'une part par les transferts d'assimilats entre la partie aérienne de la plante et la production racinaire (très importante en début du cycle) (Baret et al., 1993), et d'autre part, par l'orientation du métabolisme général de la plante, c'est-à-dire par la teneur énergétique de la matière sèche, comme le montre Varlet-Grancher et al. (1982) dans le cas de l'effet "puits-source" observé au moment de l'épiaison. L'efficacité de conversion est souvent considérée constante sur de longues périodes, quelques fois même sur le cycle végétatif (Monteith, 1977).

Des facteurs environnementaux peuvent aussi altérer l'efficacité de conversion. Ce sont des conditions limitantes de température, d'alimentation minérale et d'état hydrique du sol:

* La température. Comme on l'a dit précédemment, le fonctionnement photosynthétique est optimal pour une gamme de températures spécifiques aux plantes en C3 et C4.

* L'alimentation minérale. L'apport d'engrais organiques ou chimiques favorise la production végétale, dans les limites de la plante (Steinmetz, 1990a). Si les doses utilisées sont excessives, elles provoquent un effet inverse à cause d'une forte toxicité du sol, et la production peut diminuer ainsi d'une façon importante (Gallagher et Biscoe, 1978).

* L'alimentation hydrique. C'est un facteur primordial pour un bon fonctionnement de la photosynthèse. Le manque de réserves hydriques suffisantes dans le sol se manifeste par la fermeture des stomates au niveau de la plante, réduisant ainsi les pertes dues à la transpiration. Ceci diminue la photosynthèse par blocage des échanges gazeux (Squire et al., 1984; Steinmetz, 1990a, 1990b). L'effet du stress hydrique sur ϵ_p est toutefois variable suivant le stade phénologique de la plante (Steinmetz, 1990a).

2.2.4 PRISE EN COMPTE D'UN INDICE DE STRESS HYDRIQUE DANS LE MODELE DE MONTEITH

En zone sahélienne, la variabilité de la production végétale est plus liée à la réserve hydrique du sol, qu'à d'autres paramètres telle que la nutrition minérale.

La réponse des diverses fonctions physiologiques de la plante au stress hydrique est illustrée par la figure 2.10 (Bradford et Hsiao, 1982). La plante réagit rapidement en modifiant son cycle de développement par des stimuli hormonaux, en favorisant la croissance racinaire, et en diminuant la turgescence de ses cellules afin d'ajuster le potentiel foliaire au potentiel hydrique du sol. La transpiration va ensuite être affectée à son tour par la fermeture des stomates et l'accélération de la sénescence suite à une diminution de la photosynthèse.

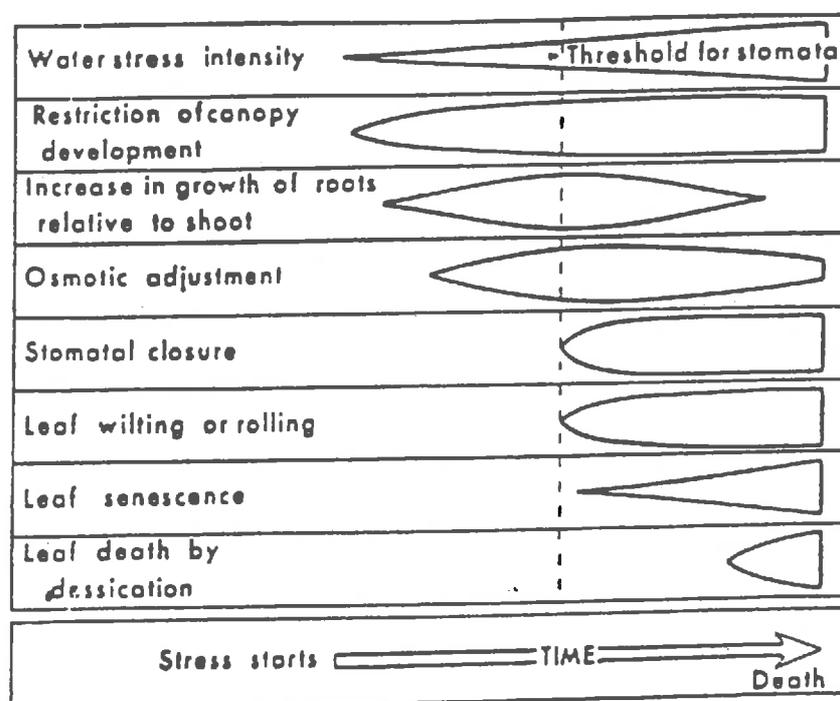


Figure 2.10: Réponse des diverses fonctions physiologiques à un stress hydrique modéré. (d'après Bradford et Hsiao, 1982)

En conditions hydriques limitantes, la valeur moyenne de l'efficacité de conversion ϵ_p sur la période de croissance active sera inférieure à celle qu'on pourra obtenir en conditions optimales. Des études menées à l'échelle locale sur le blé par Steinmetz et al. (1990a) au sud de la France l'ont mis en évidence. Les travaux de Bégué (1991) sur la culture de mil en contre saison ont montré une chute très importante de ϵ_p , de l'ordre de 50 %, suite à un arrêt de l'irrigation à la fin de la montaison.

De nombreux auteurs ont essayé de caractériser le stress hydrique à différentes échelles spatiales par des indices. Ces indices sont construits soit à partir de l'Evapotranspiration Réelle (ETR) du couvert, soit de la température radiative de surface.

2.2.4.1 Indices de stress basés sur l'ETR

La production finale d'une culture est proportionnelle à la consommation d'eau transpirée par la plante. Cependant, la plupart des études font la liaison entre la production de biomasse et l'évapotranspiration qui englobe à la fois la transpiration des plantes (T) et l'évaporation du sol (E), tout simplement à cause de la complexité des mesures ou des modèles pour séparer ces deux composantes (Hanks, 1974; Kanemasu et al., 1976).

Les méthodes de mesure de l'ETR peuvent être classées en deux catégories:

* La méthode hydrologique consiste à estimer l'ETR à partir du bilan hydrique du sol:

$$ETR = P + I - (R + D + \Delta W)$$

où P est la pluviométrie, I l'irrigation, R l'écoulement superficiel, D le drainage profond et ΔW la variation de la réserve en eau du sol entre deux dates de mesure.

Dans le cas le plus simple où l'écoulement superficiel et le drainage sont négligeables, l'ETR peut être calculé en fonction de P, I et ΔW .

* Les méthodes micrométéorologiques sont basées sur l'analyse des variables caractérisant l'état de l'atmosphère près de la surface. Les méthodes utilisées sont celles du rapport de Bowen et de la méthode aérodynamique (Lagouarde, 1988) qui reposent sur des mesures de gradient de température, d'humidité de l'air et de la vitesse du vent, et celle des fluctuations qui repose sur une mesure fine de la turbulence (Rosenberg, 1974).

Les méthodes micrométéorologiques utilisent généralement l'équation du bilan d'énergie:

$$ETR = R_n - H - S$$

où R_n est le rayonnement net, H le flux de chaleur sensible et S le flux de chaleur de conduction dans le sol.

Des indices basés sur le rapport ETR/ETM (ETM : EvapoTranspiration Maximale) ou ETR/ETP (ETP : EvapoTranspiration Potentielle) ont été utilisés par plusieurs auteurs pour expliquer la production végétale (Stewart et al., 1977; Doorenbos et Kassam, 1979).

Asrar et al. (1985) ont pu évaluer l'efficacité de l'indice ETR/ETP pour corriger directement l'effet du stress hydrique sur la production de matière sèche estimée à partir du modèle de Monteith (1972). L'effet C du stress hydrique a été rajouté au modèle de Monteith comme un paramètre multiplicatif supplémentaire, et a été considéré égal à 1 si ETR/ETP est supérieur à 0.7, et égal à ETR/ETP dans le cas contraire.

Un autre indice, proposé par Maas et al. (1985), le Crop Water Stress Index (CWSI) utilise le même principe, et correspond à $1 - \text{ETR}/\text{ETP}$ (Jackson et al., 1981).

Ces indices sont très intéressants pour notre étude, car ils permettent de corriger les effets du stress hydrique dans le modèle de Monteith. Cependant leur application à une échelle régionale n'est pas encore opérationnelle, car les modèles d'estimation régionale de l'ETR à partir de données satellitaires sont en cours d'élaboration.

2.2.4.2 Indice de stress basé sur la température radiative de surface

Une relation simplifiée a été proposée par Jackson et al. (1977), puis améliorée par Seguin et Itier (1983) pour estimer l'évapotranspiration journalière d'une culture de blé à Phoenix (Arizona) à partir des mesures du rayonnement net journalier et de l'écart $T_s - T_a$, aux alentours du midi solaire:

$$\text{ETR}_j - \text{Rn}_j = A - B \cdot (T_s - T_a)$$

où T_s est la température de surface, T_a est la température de l'air, ETR_j est l'évapotranspiration réelle journalière, Rn_j est le rayonnement net journalier, A et B des coefficients d'étalonnage.

Cette simplification doit être considérée avec précaution, car elle suppose des journées dégagées pour que $T_s - T_a$ soit représentatif de toute la journée. De plus les estimations obtenues avec ce modèle peuvent être affectées par la vitesse du vent, la stratification thermique et la rugosité (Figure 2.11) (Seguin et Itier, 1983; Riou et al., 1988; Lagouarde et Brunet, 1988).

La relation simplifiée permet de calculer l'évapotranspiration cumulée sur des périodes de plusieurs jours, pour lisser les variations journalières:

$$\sum \text{ETR}_j = \sum \text{Rn}_j + \sum A - B \cdot \sum (T_s - T_a)$$

Cette relation a été simplifiée par Jackson et al. (1977), qui ont proposé l'indice de stress hydrique SDD (Stress Degree Day), mieux adapté à une échelle satellitaire:

$$\text{SDD} = \sum_{j=1}^{j=N} (T_s - T_a)$$

Cet indice a été utilisé par Steinmetz (1990a) pour une culture de blé. Celui-ci a montré que le SDD cumulé est bien corrélé avec l'efficacité de conversion ϵ_p (Figure 2.12).

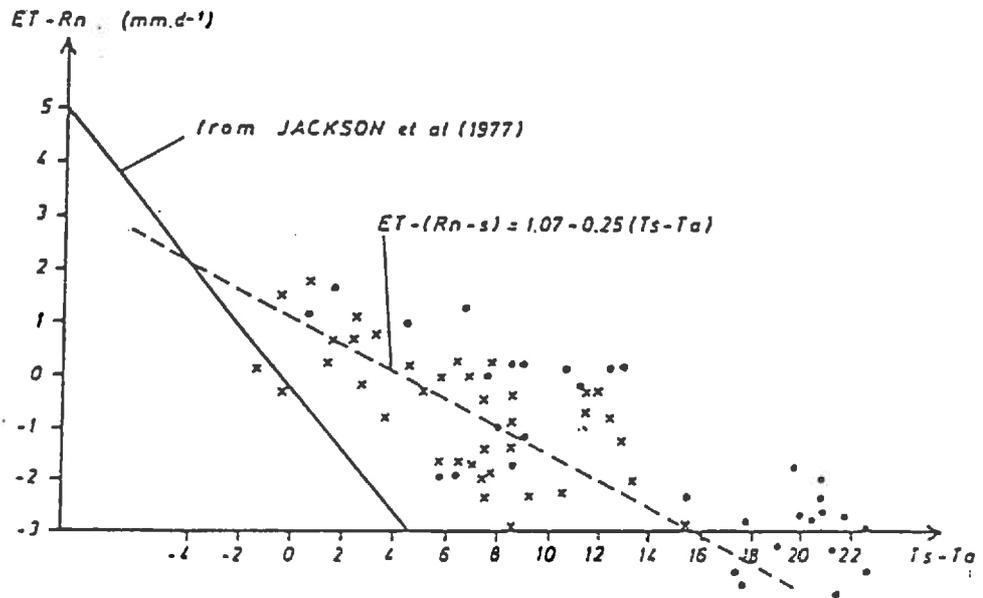


Figure 2.11: Relation entre $ET - (R_n - S)$ et $T_s - T_a$ pour 32 journées de l'été 1978 sur le site de la Crau (x Crau irriguée, • Crau sèche) (d'après Seguin et al., 1982).

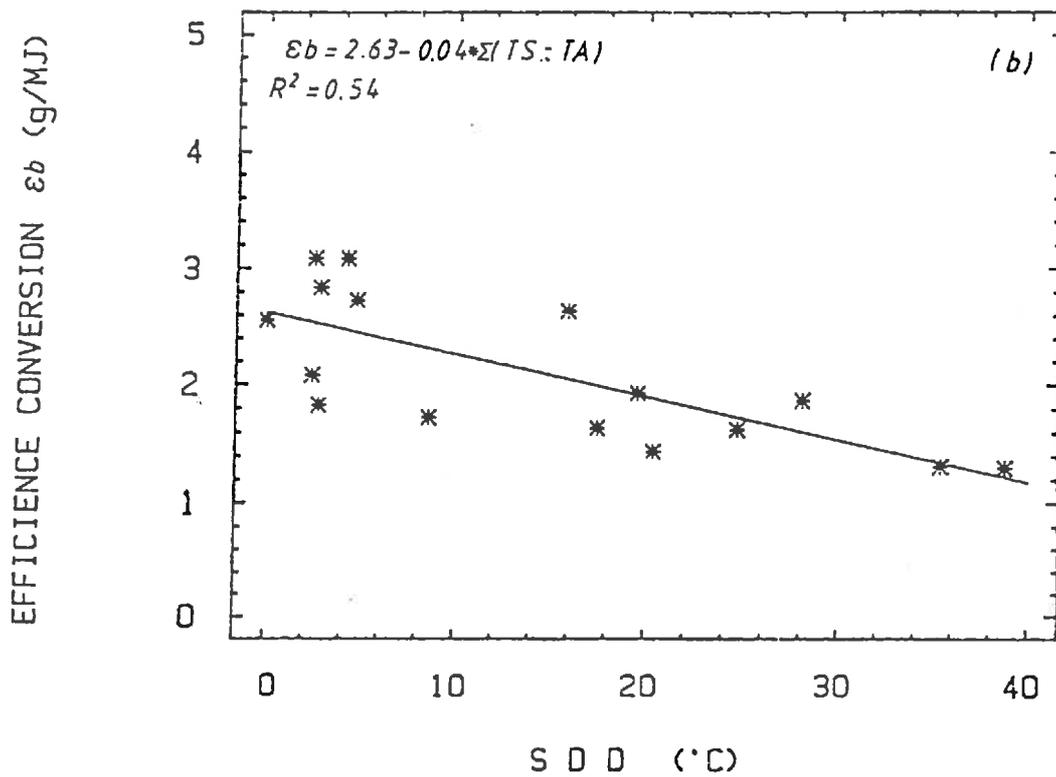


Figure 2.12: Régression entre valeurs hebdomadaires de l'efficacité ϵ_b et le cumul de $T_s - T_a$ (SDD) pour un couvert de blé. (d'après Steinmetz, 1990).

2.3 ESTIMATION DES PARAMETRES DU MODELE DE MONTEITH

2.3.1 LE RAYONNEMENT GLOBAL

Actuellement, il n'existe pas de cartographie régulière du rayonnement global établie sur l'ensemble de la zone sahélienne. Le centre AGRHYMET (Niamey) fournit uniquement des mesures de durée d'insolation au pas du temps journalier. La plupart des stations synoptiques du réseau météorologique ne sont équipées que d'un héliographe Campbell.

Ces mesures d'insolations peuvent être reliées au rayonnement global par la relation de Prescott (1940).

$$RG = RG_0 \cdot (a + b \cdot n / N_0)$$

où RG est le rayonnement global journalier, RG_0 le rayonnement extra-terrestre journalier, n la durée d'insolation journalière mesurée par un héliographe, N_0 la durée astronomique du jour, et a et b des coefficients.

Plusieurs auteurs ont proposé des valeurs plus ou moins standard de ces coefficients à partir d'un certain nombre de mesures (Rietvild, 1978; Stigter, 1980). D'autres ont établi des relations entre ceux-ci et la latitude du lieu (Glover et McCulloch, 1958). Rietvild (1978) a proposé une relation applicable à l'ensemble du globe en prenant a égal à 0.18 et b égal à 0.62.

L'application des coefficients de Rietvild aux valeurs moyennes mensuelles d'insolation de Niamey (entre 1991 et 1992) surestime de 15% à 22% le rayonnement global. Ceci peut s'expliquer par le fait que ces relations ont été établies à partir de stations situées dans des zones géographiques différentes de la notre.

Lof et al. (1966) ont regroupé les valeurs de a et b suivant les régions climatiques. Les valeurs qui correspondent aux zones arides et semi-arides sont regroupées dans le tableau 2.1. Mais seule la relation établie au Texas est compatible avec les données de Niamey (Bégué, 1991).

Des valeurs de a et b plus localisées ont été estimées par Bégué (1991), grâce à un jeu de données de Niamey. Les coefficients de la relation de Prescott ont ainsi été établis pour la saison sèche, la saison des pluies et l'année (Tableau 2.2).

Ces relations présentent une forte dispersion due à plusieurs facteurs: d'une part les erreurs instrumentales et d'observations; d'autre part le fait que la fraction d'insolation n'indique pas avec une bonne précision l'intensité du rayonnement.

	Lieu	a	b	a+b
Semi-aride	D'jamena (Tchad)*	0.34	0.44	0.78
	Ouagadougou (B.F)**	0.25	0.53	0.78
	Brownsville (Texas)***	0.35	0.31	0.66
Aride	Ely (Nevada)***	0.54	0.18	0.72
	Tamanrasset (Sahara)***	0.30	0.43	0.73
	El Paso (Texas)***	0.54	0.20	0.74
	Albuquerque (N. Mexico)***	0.41	0.37	0.78

* : Riou (1972) (3 années de mesures)

** : Ouedraogo et al. (1981) (6 années de mesures)

*** : Lof et al. (1966)

Tableau 2.1: Coefficients de la relation de Prescott pour les zones arides et semi-arides.

	a	b	r ²
Saison des pluies	0.27	0.40	0.85
Saison sèche	0.29	0.37	0.78
Année	0.28	0.38	0.82

Tableau 2.2: Coefficients de la relation de Prescott établis à partir du réseau météorologique de Niamey (1979/1988) (Bégué, 1991).

Une autre méthode d'estimation de RG a été élaborée par Dedieu et al. (1987b) en se basant sur des données du satellite METEOSAT, et permet d'établir des cartes de RG sur de grandes zones. La figure 2.13 compare les valeurs horaires estimées par la méthode satellitaire et des mesures radiométriques. Les mesures de rayonnement sont effectuées entre 11h et 13h. L'erreur résiduelle observée est de 109 Wm^{-2} . Cette erreur augmente avec la couverture nuageuse. Lorsqu'on considère des moyennes mensuelles, cette erreur est de l'ordre de 36.7 Wm^{-2} , soit 6.4 % de la moyenne en valeur relative.

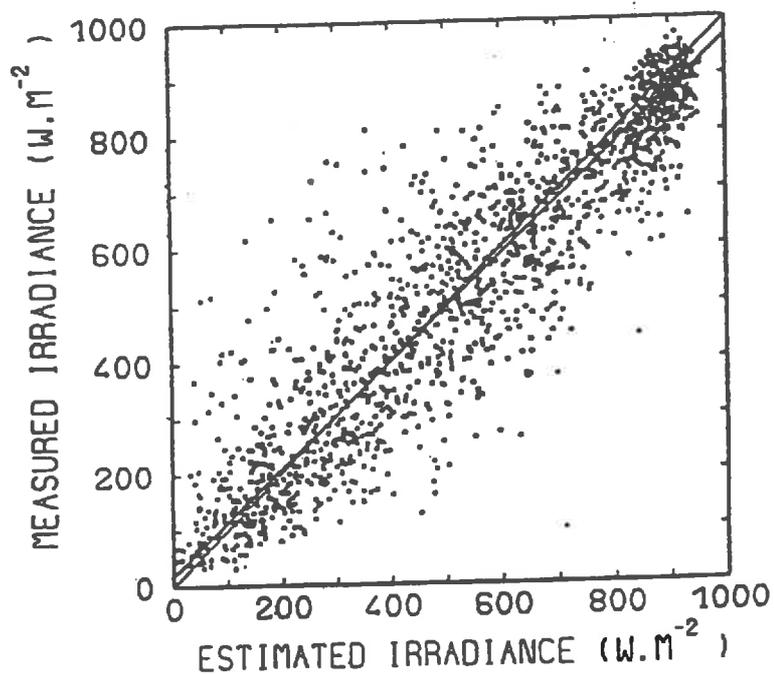


Figure 2.13: Comparaison des mesures horaires (11:00 à 13:00 TU) du rayonnement solaire à l'aide d'un pyranomètre avec celui estimé à l'aide des données Météosat ($n=1685$, $r=0.92$, $rms=109 \text{ W/m}^2$).

2.3.2 L'EFFICIENCE CLIMATIQUE

L'efficacité climatique ϵ_c est le rapport entre le Rayonnement Photosynthétiquement Actif (RPA) et le rayonnement global RG.

Le RPA est une variable rarement mesurée en station météorologique. On est donc amené à se baser sur les mesures de rayonnement global pour en déduire la fraction du RPA par l'intermédiaire de l'efficacité climatique ϵ_c .

La valeur moyenne de ϵ_c mesurée par Bégué (1991) sur Niamey pendant la saison des pluies est de 0.466 ± 0.006 . Les valeurs minimales (0.44 et 0.45) correspondent aux jours de forte brume sèche, composée de poussières, et diffusant les courtes longueurs d'onde (Monteny et Gosse, 1978; Faïzoun et al., 1994). Les valeurs maximales (0.481 et 0.483) sont enregistrées par jour couvert, car le rayonnement infrarouge est filtré par les nuages, ce qui augmente la proportion du RPA dans le rayonnement global.

Meek et al (1984) ont pu réaliser des mesures d'efficacité climatique en zone sub-humide (pour des jours dégagés et couverts) et en zone semi-aride (ciel clair et avec brume sèche). Les valeurs qu'ils ont trouvées sont respectivement de 0.46 pour la zone sub-humide et 0.43 pour la zone semi-aride. Si on assimile le Niger pendant la saison des pluies à une zone sub-humide, ces mesures sont en accord avec celles de Niamey.

L'efficacité climatique a une faible variabilité au cours de la saison des pluies au Sahel, et peut être considérée comme constante, égale à **0.466**.

2.3.3 L'EFFICIENCE D'ABSORPTION

De nombreux auteurs ont montré que l'on peut estimer ce paramètre à partir de mesures radiométriques dans le rouge (R) et le proche infrarouge (PIR), la combinaison de ces deux canaux permettant de calculer des "indices de végétation".

2.3.3.1 Indices de végétation

- Le SR (Simple Ratio) (Jordan, 1969):

$$SR = \left(\frac{PIR}{R} \right)$$

Cet indice de végétation est peu adapté à la zone sahélienne, car la relation qui le lie à ϵ_c présente un fort écart à la linéarité pour des sols clairs (Gallo et al., 1985, Bartholomé, 1989, Sellers, 1987).

- Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Deering et al., 1978):

$$NDVI = \frac{(PIR - R)}{(PIR + R)}$$

L'indice NDVI est caractérisé par une forte sensibilité à la couleur du sol. La meilleure linéarité avec l'efficience d'interception est obtenue dans le cas des sols clairs.

- Le MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index) (Qi et al., 1994):

$$MSAVI = \frac{PIR - R}{PIR + R + L} \cdot (1 + L)$$

avec

$$L = 1 - 2 \cdot NDVI \cdot (PIR - b \cdot R)$$

où **b** est un la pente de la droite du sol, et est fixé à 1.06 (Clevers, 1988).

Le MSAVI a été élaboré pour minimiser les effets du sol, qui sont très importants dans les zones sahéliennes en raison de la faible couverture du sol par la végétation. Il a été validé sur plusieurs types de sol très voisins de ceux du Sahel (Qi et al., 1994; Chehbouni et al., 1994).

Cet indice a été testé sur 12 sols (4 types de sol à 3 humidités différentes), et pour des taux de couverture du sol qui varient de 0 à 100% (culture de coton, Arizona). Le MSAVI a montré une forte dynamique, aussi importante que celle du NDVI (Figure 2.14). De plus, le NDVI est saturé quand le taux de couverture est de l'ordre de 75 %, alors que le MSAVI continue à augmenter.

On remarque aussi que pour une même valeur de l'indice NDVI, par exemple $NDVI = 0.25$, on peut lui associer un signal issu d'un sol sombre avec un taux de couverture de 20 %, et un signal issu d'un sol clair avec un taux de couverture égal à 25 %; alors que pour le MSAVI on a presque une bijection entre le taux de couverture et la valeur de l'indice.

Un autre avantage du MSAVI est son comportement directionnel. En effet le MSAVI présente une évolution quasi-symétrique en fonction de l'angle zénithal de visée (Figure 2.15b), alors que ce n'est pas le cas du NDVI (Figure 2.15a). Les valeurs du NDVI pour des angles zénithaux de visée positifs (direction opposée au soleil) sont systématiquement supérieures à celles des angles négatifs (même direction que le soleil). Le comportement symétrique du MSAVI en fonction de l'angle de visée est très important, car il va permettre une normalisation de l'indice au nadir. Par manque de temps, l'indice MSAVI ne sera pas utilisé dans le cadre de cette étude.

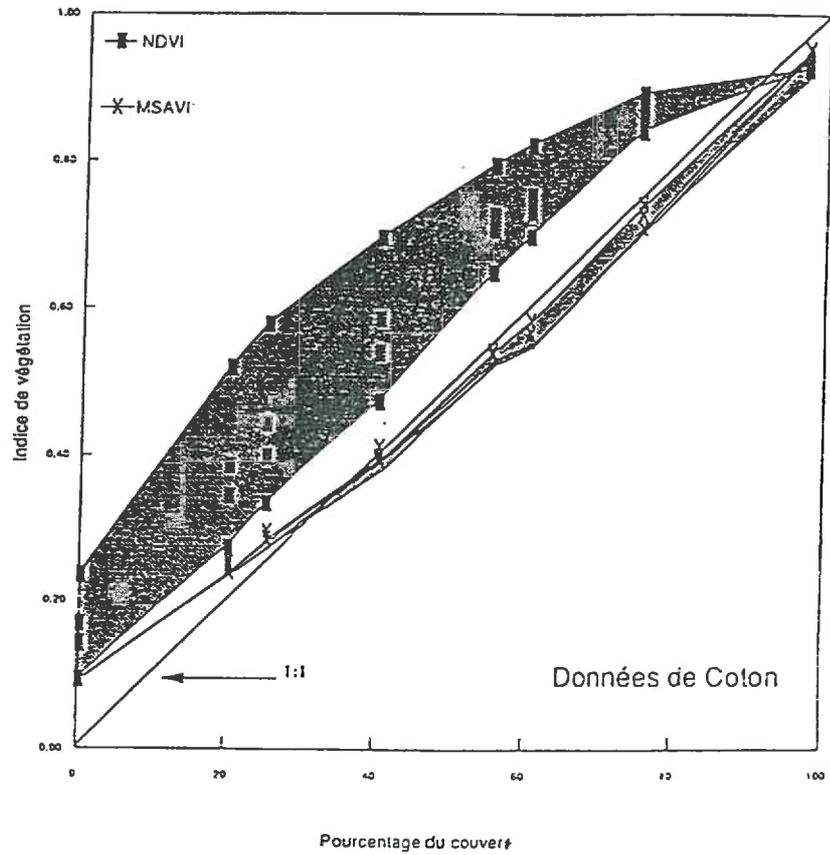


Figure 2.14: Comparaison entre le NDVI et le MSAVI pour 4 types de sol et pour différents pourcentage du couvert. (d'après Chehbouni et al., 1992).

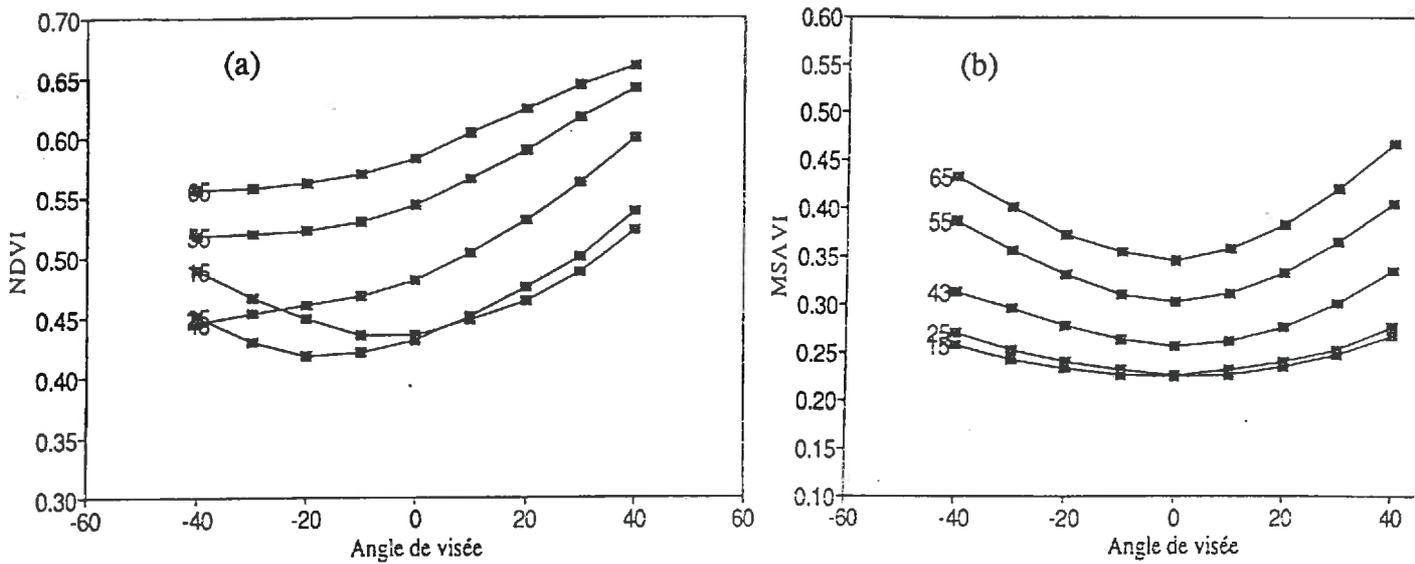


Figure 2.15: Comportement du NDVI (a) et du MSAVI (b) en fonction de l'angle zénithal de visée pour différents angles zénithaux solaire. (d'après (a) Huete et al., 1991 et (b) Chehbouni et al., 1992).

2.3.3.2 Relations empiriques

Avec les données radiométriques au sol

Bégué (1991) a pu réaliser des mesures de réflectance et de bilan radiatif sur des parcelles de culture de mil au Niger (AGRHYMET) au cours du cycle végétatif. Le dispositif expérimental consiste à mesurer les réflectances rouge et proche infrarouge au nadir avec un radiomètre Cimel (Guyot et al., 1983), pour calculer l'indice de végétation des parcelles.

Les mesures des termes du transfert radiatif: les rayonnements incident, transmis et réfléchi par le couvert végétal ont été effectuées avec des cellules photovoltaïques SLAM (Chartier et al., 1989) étalonnées dans le RPA. Ces mesures montrent une forte variabilité horaire du RPA_a, avec un maximum au midi solaire, qui peut s'expliquer par la structure du couvert végétal et le taux de couverture du sol.

La relation qui lie l'efficacité d'absorption journalière ϵ_a au NDVI est présentée dans la figure 2.16. Elle a été établie pour une visée au nadir et pour un angle zénithal solaire égal à 30° (Bégué, 1991). Dès qu'on s'éloigne de ces conditions, la relation ϵ_a -NDVI perd sa linéarité.

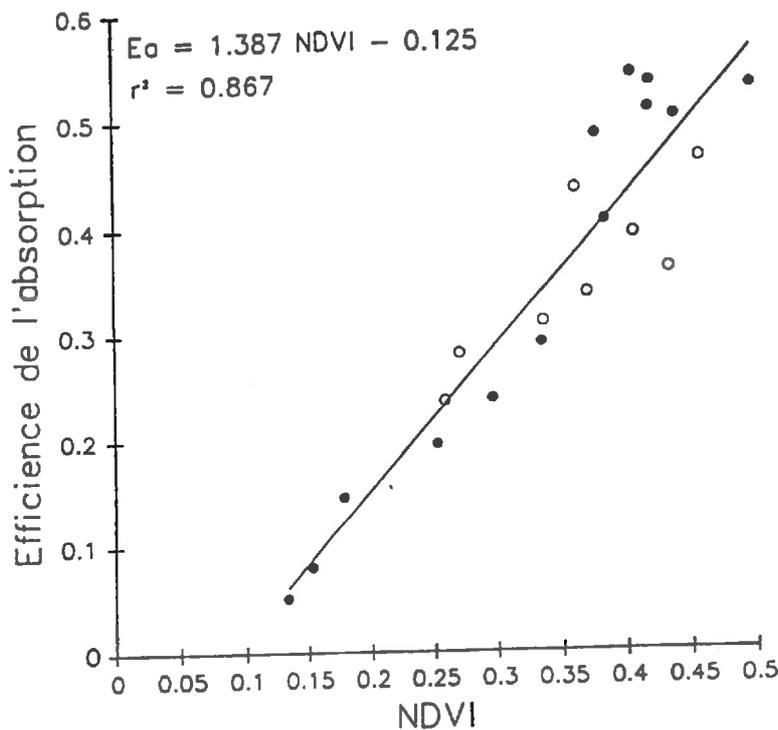


Figure 2.16: Relation entre l'indice de végétation normalisé et l'efficacité d'absorption, établie avec les données d'AGRHYMET: (●) : Phase de croissance - (○) : Phase de sénescence - (—) : Droite de régression établie sur l'ensemble du cycle végétatif. (d'après Bégué, 1991).

En utilisant le même jeu de données nous avons comparé les relations entre l'efficacité d'absorption journalière ϵ_a et les indices NDVI, NDVI corrigé de l'indice du sol nu NDVIs, et le MSAVI (Figure 2.17). On remarque une plus forte linéarité pour MSAVI ($r^2=0.91$) que pour NDVI ($r^2=0.86$) ou (NDVI-NDVIs) ($r^2=0.87$).

Cette comparaison a été effectuée aussi avec 3 angles zénithaux solaires (0° , 30° et 60°), pour 4 journées (JJ=230, JJ=240, JJ=264 et JJ=268) (Figure 2.18). La meilleure linéarité est obtenue avec le MSAVI. Ceci est sûrement dû au fait que le MSAVI minimise les différentes perturbations qui proviennent du sol sous-jacent au couvert végétal. De plus, l'écart des indices mesurés à 30° et à 60° pour une même journée est plus faible dans le cas du MSAVI, ce qui minimise l'erreur engendrée quand on utilise des mesures effectuées à des heures différentes de la journée.

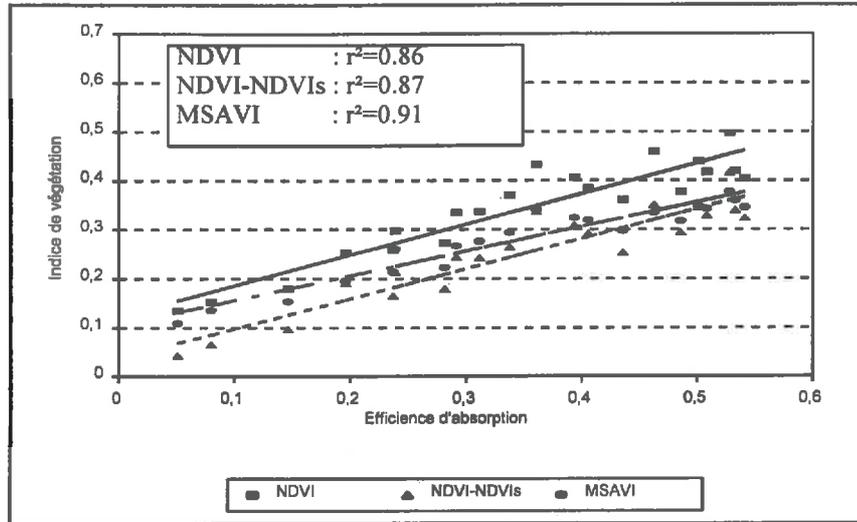


Figure 2.17: Relations entre ϵ_a et indices de végétation NDVI, NDVI-NDVIs et MSAVI, à partir des mesures d'AGRHYMET.

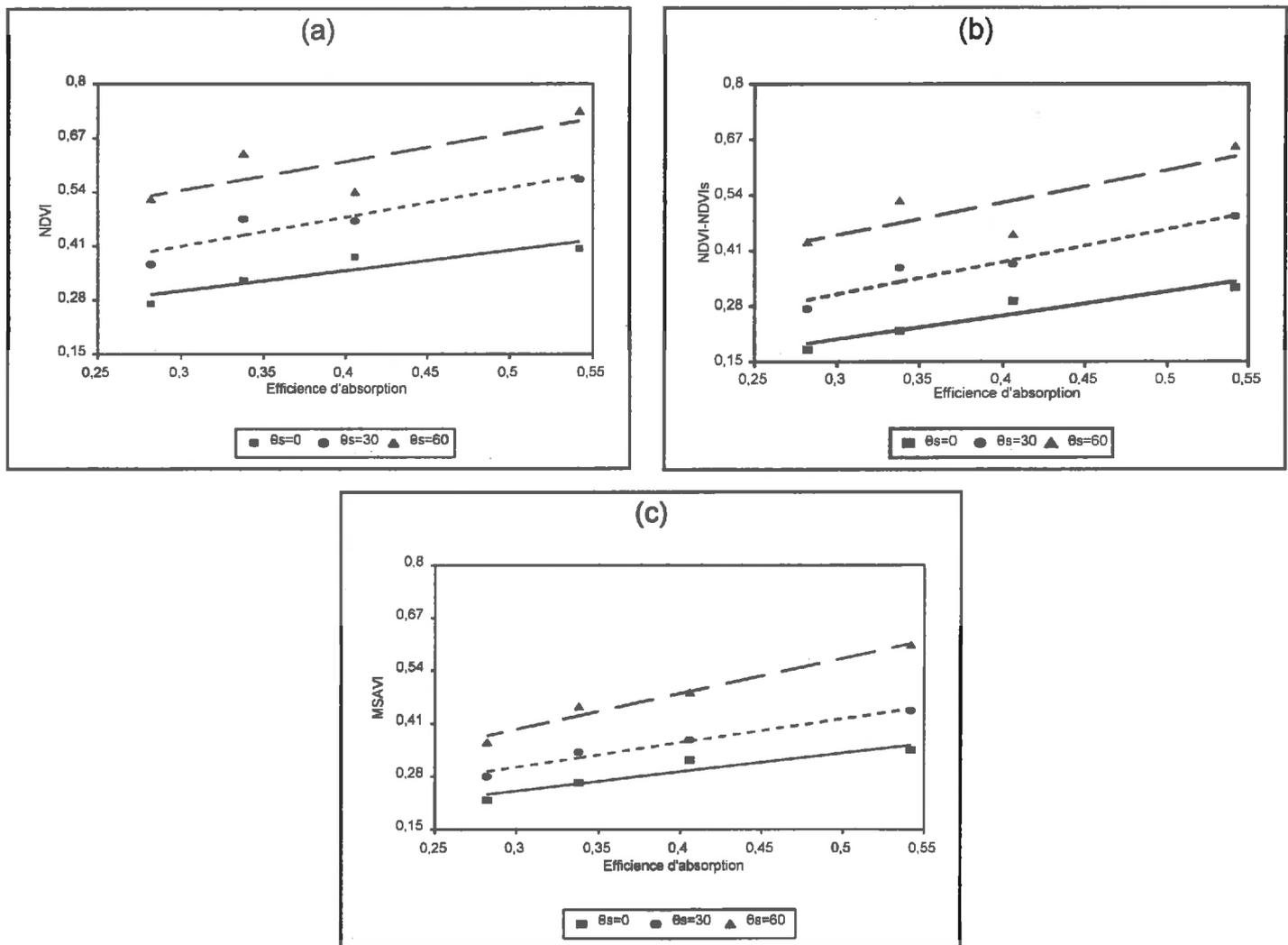


Figure 2.18: Comportement de la relation ϵ_a -indices de végétation, en fonction de l'angle zénithal solaire ($\theta_s=0$, $\theta_s=30$, $\theta_s=60$). a) NDVI, b) NDVI-NDVIs et c) MSAVI.

Relation globale entre ϵ_a et NDVI à l'échelle satellitaire

Plusieurs auteurs ont choisi d'utiliser une **relation globale** entre NDVI et ϵ_a pour estimer la production primaire nette (Heimann and Keeling, 1989; Ruimy, 1994; Loudjani, 1993) à l'échelle régionale (Figure 2.19).

Heimann et Keeling (1989) ont établi cette relation en faisant correspondre $\epsilon_a=0$ à un NDVI moyen des mois d'hiver en Alaska, et $\epsilon_a=1$ au maximum de NDVI donné par la théorie de Kubelka-Munk;

Ruimy (1994) a choisi $\epsilon_a=0$ pour un NDVI minimum moyen sur les déserts tropicaux, et $\epsilon_a=1$ pour le NDVI maximum sur la forêt amazonienne.

Enfin, Loudjani (1993) a fait correspondre $\epsilon_a=0$ au NDVI maximum sur les déserts tropicaux, et $\epsilon_a=1$ au NDVI maximum de la forêt équatoriale.

Toutefois ces relations très faciles d'utilisation sont sensibles aux types des couverts végétaux (structure, densité, ...), aux effets bidirectionnels, et niveau de traitement des images (étalonnage et corrections atmosphériques)

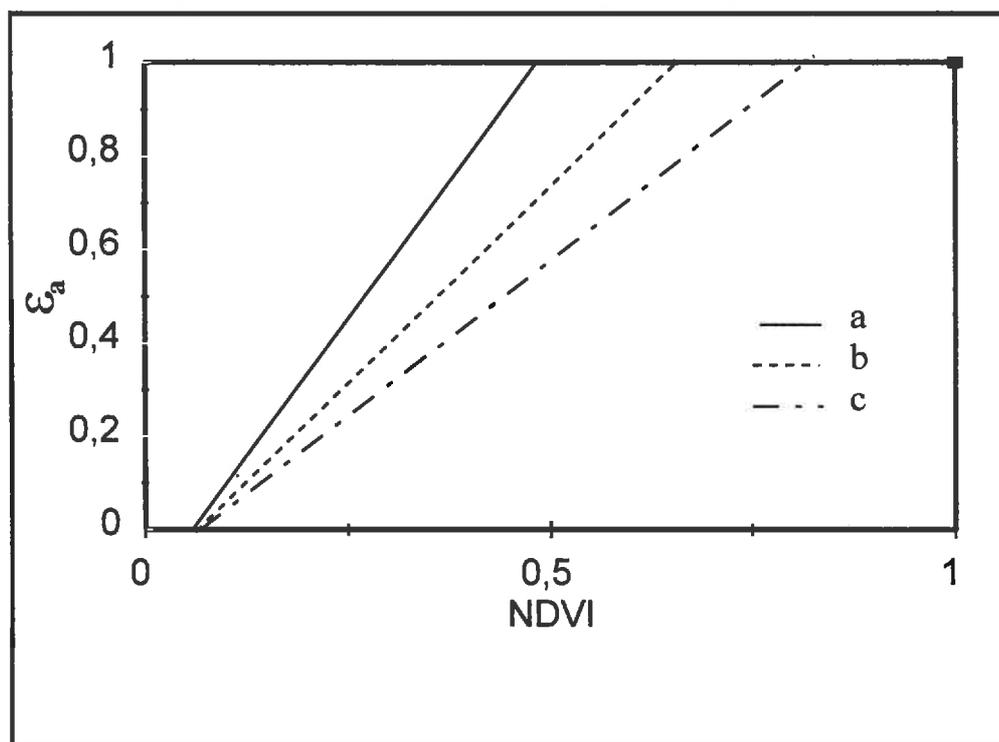


Figure 2.19: Relations entre ϵ_a et NDVI à l'échelle satellitaire. D'après (a) Loudjani (1993), (b) Heimann et Keeling (1989), (c) Ruimy (1994).

2.3.3.3 Simulations du transfert radiatif dans un couvert discontinu

La relation ϵ_a -indice de végétation peut être déterminée autrement que par des mesures expérimentales ou satellitaires, en faisant appel aux modèles de transfert radiatif dans un couvert (Asrar et al., 1984). Les analyses théoriques montrent la forte sensibilité de cette relation aux propriétés optiques du sol (Choudhury, 1987) et au port foliaire du couvert (Baret et Guyot, 1991). Le caractère curviligne de cette relation dans certains cas a été aussi souligné par les travaux de Sellers (1987).

Certaines catégories de couverts végétaux sont peu abordées dans ces travaux de simulation; c'est le cas des couverts "discontinus" à forte hétérogénéité horizontale (culture en rangs, végétation semi-aride en général). Le peu d'études consacrées à ce type de couvert peut s'expliquer par la difficulté à mesurer le rayonnement transmis au sol pour l'étalonnage, et la complexité à modéliser les transferts radiatifs au sein de tels couverts.

Des travaux récents (Bégué, 1993b) ont montré que la relation ϵ_a -IV est plus variable pour les couverts discontinus que pour les couverts dits "homogènes", en raison d'un nombre plus important de variables de structure, et d'une plus grande sensibilité à la géométrie de la mesure. Dans le cas où on s'intéresse à la production végétale, il est nécessaire de travailler avec l'absorption journalière, et non pas avec l'absorption instantanée comme pour les couverts homogènes.

Ainsi, pour toute application aux données satellitaires, on est encore réduit à utiliser des relations expérimentales ou théoriques établies sur couverts continus, ou construites à partir des NDVI maximum et minimum des images, sans tenir compte de la structure du couvert végétal.

Les simulations réalisées avec les modèles consistent à générer pour un jeu de paramètres biologiques réalistes, la relation indice de végétation-absorption. Ces simulations permettent par exemple, de choisir l'indice de végétation qui présente la meilleure linéarité pour un type de sol donné (Sellers, 1987).

Bégué (1993b) a montré, à partir de simulations sur un couvert discontinu de mil, que la relation indice-interception était très sensible au taux de couverture du sol et à la géométrie de l'éclairement, et que cette variabilité pouvait être diminuée par des relations individuelles établies pour chacune des configurations géométriques données.

Jusqu'à très récemment, il n'existait pas de modèle capable de simuler toutes les combinaisons possibles d'une strate discontinue et d'une strate continue comme c'est le cas de la plupart des couverts végétaux sahéliens. Les seuls modèles offrant cette possibilité, les maquettes 3D, sont difficiles à utiliser en raison de leur forte demande en temps de calcul. Les travaux de plusieurs chercheurs ont ainsi porté sur la validation de modèles de transfert radiatif déjà existants et le développement de modèles simples adaptés aux caractéristiques de la végétation du Sahel.

Parmi ces modèles, le modèle géométrique qui représente les protusions végétales par des cylindres, et qui a été couplé avec un modèle de transmittance (Bégué, 1992). Ce modèle a été validé sur le mil avec une répartition régulière des cylindres et sur savane dégradée avec une répartition aléatoire des cylindres (Bégué et al., 1993b).

Depuis quelque années, Myneni s'emploie au développement d'un modèle 3D de transfert radiatif permettant de simuler une très grande variété de couverts végétaux (Myneni et al., 1990 et 1992; Myneni and Williams, 1994).

Ce modèle peut être adapté à des couverts discontinus tel que le mil. Il repose sur la résolution numérique de l'équation de transfert radiatif, et intègre différents modules (hot-spot, modèle bidirectionnel de réflectance du sol, agrégation des feuilles, ...). Il ne permet pas pour l'instant la superposition de différentes strates de végétation ayant des propriétés optiques et des distributions angulaires différentes, mais l'intégration d'un tel module dans le programme est possible.

Les paramètres d'entrée du modèle sont la densité de surface foliaire, la distribution des angles foliaires, les propriétés optiques des feuilles et du sol, le taux de couverture du sol, la répartition spatiale de la végétation, et la géométrie du rayonnement incident (angle zénithal solaire et pourcentage du rayonnement diffus).

Les paramètres de sortie sont l'efficacité d'absorption et la réflectance bidirectionnelle.

2.3.4 L'INDICE DE STRESS HYDRIQUE SDD

L'utilisation de cet indice à une échelle régionale est maintenant possible, car d'une part on possède des algorithmes qui permettent d'estimer la température de surface à partir des données infrarouges thermiques, et d'autre part les Modèles de Circulation Générale (MCG) sont capables de cartographier la température de l'air sur de grandes zones.

2.3.4.1 Estimation de la température de surface avec les données AVHRR

Dans l'infrarouge thermique, la correction des effets atmosphériques est difficilement réalisable. Mais il existe la possibilité d'utiliser la méthode de Split-Window pour éliminer une partie des perturbations atmosphériques lorsqu'on dispose de mesures dans deux canaux thermiques comme c'est le cas pour le satellite NOAA-11 ($10.3 \mu\text{m}$ - $11.3 \mu\text{m}$, $11.5 \mu\text{m}$ - $12.5 \mu\text{m}$).

La température de surface est alors calculée à partir d'une combinaison linéaire des températures obtenues dans les deux bandes spectrales du satellite:

$$T_s = a + b.T_4 + c.T_5$$

où T_4 et T_5 sont les températures mesurées par le capteur; et a,b,c des coefficients d'étalonnage.

Différents coefficients ont été proposés, plus ou moins adaptés aux types de surfaces rencontrées (Deschamps et Phulpin, 1980; Price, 1983). Kerr et al. (1992) ont proposé deux jeux de coefficients pour calculer la température de surface d'un sol (Tss), et d'un couvert végétal (Tsv) (Tableau 2.3).

	a	b	c
Sol	3.085	3.126	-2.126
Végétation	-2.4	3.6	-2.6

Tableau 2.3: Coefficients utilisés dans la méthode Split-Window pour calculer Tss et Tsv (Kerr et al., 1992).

La température du surface estimée par AVHRR comporte généralement une composante issue du sol, et une autre issue de la végétation. Il est donc indispensable de tenir compte de ces deux composantes pour avoir une bonne précision sur les estimations de Ts. Kerr et al. (1992) ont proposé une combinaison linéaire de ces deux températures en utilisant le taux de couverture du sol C pour calculer la température de surface d'une zone partiellement couverte de végétation.

$$T_s = C \cdot T_{sv} + (1 - C) \cdot T_{ss}$$

Le taux de couverture du sol C a été estimé en utilisant l'indice de végétation:

$$C = (NDVI - NDVI_s) / (NDVI_v - NDVI_s)$$

où NDVI_s est l'indice du sol nu mesuré au début de la saison des pluies, et NDVI_v est l'indice du maximum de végétation possible (couvert 100%).

Cette approche a été validée sur deux sites: dans le sud-ouest de la France, et à Niamey au Niger (Kerr et al., 1992). Elle a permis de réduire l'erreur commise sur l'estimation de Ts de 4°C à 1.5°C.

L'utilisation du MSAVI permet de s'affranchir de cette dernière étape. Le MSAVI étant directement proportionnel au taux de couverture (HAPEX CDROM)

2.3.4.2 Estimation de la température de l'air

La faible densité du réseau de stations météorologiques au Sahel ne permet pas une bonne spatialisation de la température de l'air. Celle-ci peut être cartographiée sur de grandes zones à l'aide des Modèles de Circulation Générale qui ont une résolution de l'ordre de 100 km.

L'utilisation du modèle de Monteith simplifié pour estimer la production végétale du mil au Sahel à une échelle régionale est rendue possible grâce aux nouvelles méthodes d'estimation du Rayonnement Photosynthétiquement Actif absorbé et de l'efficacité de conversion.

Pour estimer le rayonnement global, nous pouvons adopter la méthode de Dedieu et al. (1987b) qui utilise les données Météosat, et qui permet de spatialiser le rayonnement global avec une bonne précision.

L'efficacité d'absorption peut être estimée à partir du NDVI calculé avec les réflectances corrigées des effets de l'atmosphère du capteur AVHRR. Deux approches sont possibles; l'une basée sur une relation globale entre le NDVI et ϵ_a , l'autre sur des relations NDVI- ϵ_a établies à partir de simulations de transfert radiatif dans un couvert de mil.

Enfin, il peut être tenu compte dans l'estimation de l'efficacité de conversion du mil de l'état hydrique du sol, en utilisant les canaux thermique du capteur AVHRR pour le calcul de T_s , et les données du Modèle de Circulation Générale (MCG) pour le calcul de T_a .

CHAPITRE 3:

CARACTERISTIQUES DE LA ZONE D'ETUDE ET DONNEES DISPONIBLES

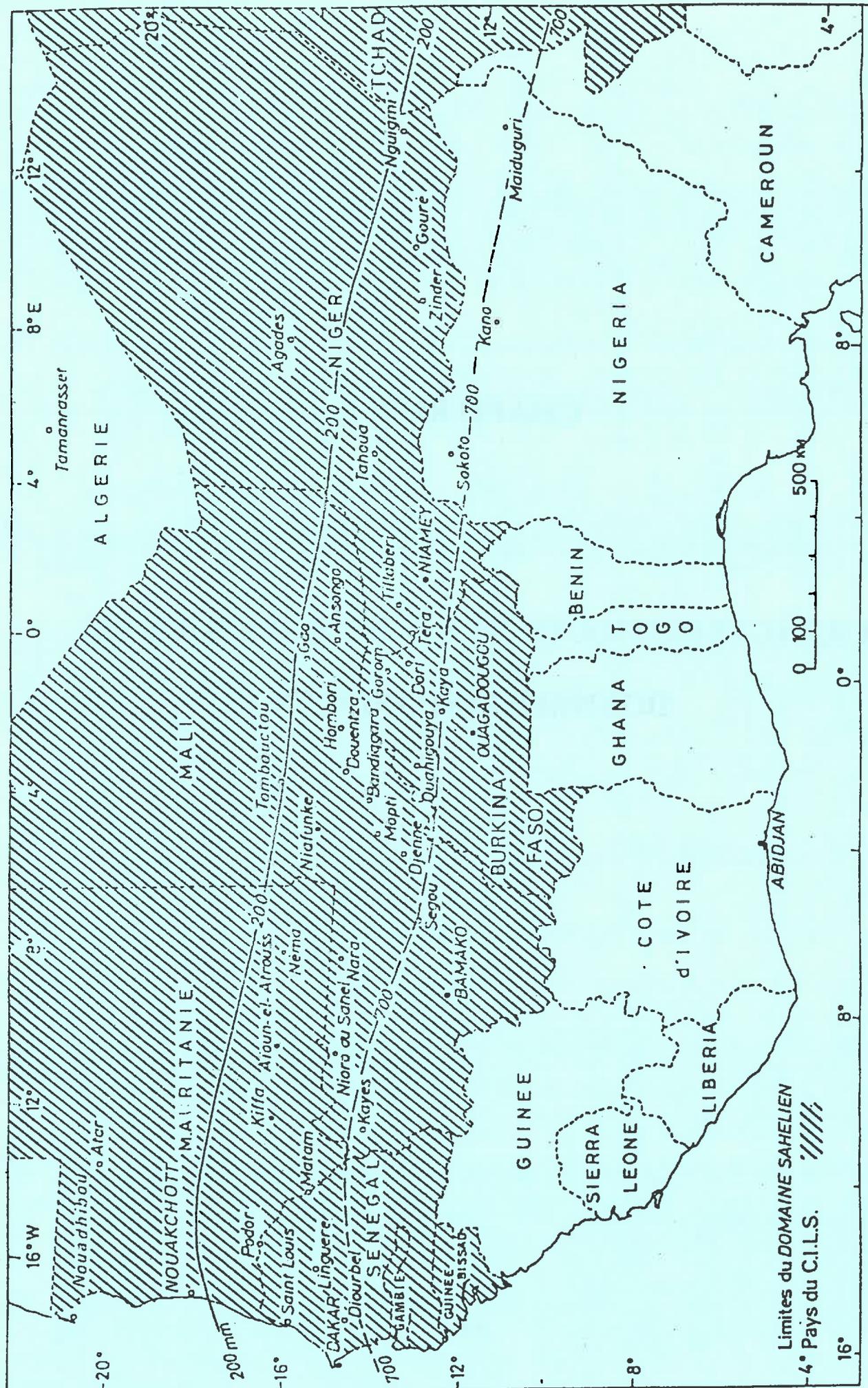


Figure 3.1: Carte générale du domaine sahélien.

CHAPITRE 3 :

CARACTERISTIQUES DE LA ZONE D'ETUDE ET DONNEES DISPONIBLES

De nombreux auteurs définissent le Sahel sur la base classique de la pluviométrie annuelle (Aubreville, 1948; Nicholson, 1982) (Figure 3.1). D'autres préfèrent l'utilisation d'indice d'aridité conjugué à une analyse fréquentielle (Franquin, 1969). Mais une définition largement acceptée est: "zone bioclimatique de graminées surtout annuelles mêlées à des buissons et des arbres, recevant en moyenne 150 à 700 mm de précipitations par an " (Hierneaux, 1984).

Le Sahel représente au minimum 1,5 million de km². Du sud au nord, les pluies diminuent sensiblement, tandis que la variabilité interannuelle s'accroît (Nicholson, 1982).

Il est délimité au nord par le Sahara et au sud par la région soudanienne. Toute cette zone a souffert ces 25 dernières années de périodes prolongées de sécheresse et elle subit actuellement une pression anthropique importante du fait de l'accroissement des populations et du cheptel.

Au cours de ces dernières années deux projets de recherche, P4AS (Projet Pilote de Prévision de Production Au Sahel) (CIRAD, 1991) et HAPEX-Sahel (Hydrologic and Atmospheric Pilote Experiment in the Sahel) (Goutorbe et al., 1994), ont été menés dans cette zone au Niger. Ils ont permis d'acquérir un important jeu de données qui sera utilisé pour partie dans la présente étude.

3.1 DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

3.1.1 LES CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES

Le Sahel est inscrit entre les isohyètes moyennes annuelles 200 et 700 mm. 95% des pluies sont enregistrées pendant la saison des pluies (Juin à Septembre inclus) qui fait suite à une très longue saison sèche.

Les précipitations annuelles sont caractérisées par une extrême variabilité interannuelle, et un coefficient de variation qui augmente du sud (20 à 30%) au nord (50%).

Dans la majorité des cas, le mois d'Août est celui dont le total pluviométrique est le plus important. Ce dernier représente à lui seul entre 30 et 45% du total annuel moyen.

Le nombre moyen de jours de pluie est de 65 dans le Sahel méridional et de 25 jours dans le Sahel septentrional. La durée cumulée des pluies passe de 140 heures au sud à 30 heures au nord en moyenne.

Le Sahel est compris grossièrement entre les parallèles 13° et 17° N. Il connaît le double passage zénithal du soleil comme le montre la figure 3.2 établie à Niamey (13°5 N). Le soleil est toujours haut dans le ciel, même en plein hiver ($\theta_s < 38^\circ$), et la durée du jour est peu variable (11,2 à 12,8 h à Niamey). De fait, le rayonnement global présente des valeurs moyennes annuelles élevées: 19.45 MJ à Niamey (1979/1988), avec respectivement 19.65 MJ et 19.36 MJ pendant la saison des pluies et la saison sèche.

De façon plus générale, RG est en moyenne égal à 40 % de la constante solaire (RG_0) en régions tropicales humides, et atteint 70 % dans les régions tropicales semi-arides. En valeur instantanée, il peut atteindre 1200 W/m² à midi et par ciel clair en zones tropicales, mais peut descendre à 50 W/m² sous l'effet d'un amas dense de nuages bas (Lémée, 1978).

La température moyenne annuelle est d'environ 29°C à Niamey. Les températures les plus élevées sont atteintes avant la saison des pluies (42.2°C en 1988), et les plus faibles sont atteintes en hiver (14.9°C en 1988). Pendant la saison des pluies, la température moyenne était de 28.6°C en 1988.

La majorité des plantes sahéniennes ont un cycle de photosynthèse en C₄, ce qui les rend plus résistantes aux températures élevées (activité optimale pour des températures comprises entre 30°C et 35°C).

3.1.2 LA GEOMORPHOLOGIE

Le Sahel peut être considéré comme une série de grandes dépressions qui se sont remplies avec des produits d'érosion du socle depuis le précambrien. Cela explique pourquoi le Sahel est plat dans l'ensemble. Les unités de paysage sahéniennes peuvent être classées en 3 ensembles (Penning de Vries et Djitéye, 1982) :

Ensemble sablonneux (Figure 3.3a). Cet ensemble occupe environ 50% du Sahel. Il est formé de sols sablonneux (S) ou sablo-limoneux (SL) éoliens, profond et uniformes sur de vastes régions qui dominent la partie nord du Sahel. Ils sont de couleur rouge ou jaune/blanc. La végétation sur cet ensemble est homogène.

Ensemble détritique sur grès ou latérite (Figure 3.3b). Il représente 30% du Sahel. Il est formé par des sols limoneux (L), peu profonds, avec des plages nues de grès ou de latérite (sols rouges). La brousse tigrée fait partie de cet ensemble. Les sols sont très hétérogènes avec un fort ruissellement et on y trouve parfois collecte et stagnation d'eau où se forment des mares (temporaires) ou des plaines d'inondation.

Ensemble fluviatile ou lacustre (Figure 3.3c). Cet ensemble occupe 20% du Sahel. Il reçoit souvent les écoulements d'eau de l'ensemble détritique. Les sols limono-argileux (LA) peuvent être hétérogènes à cause des dépôts fluviatiles.

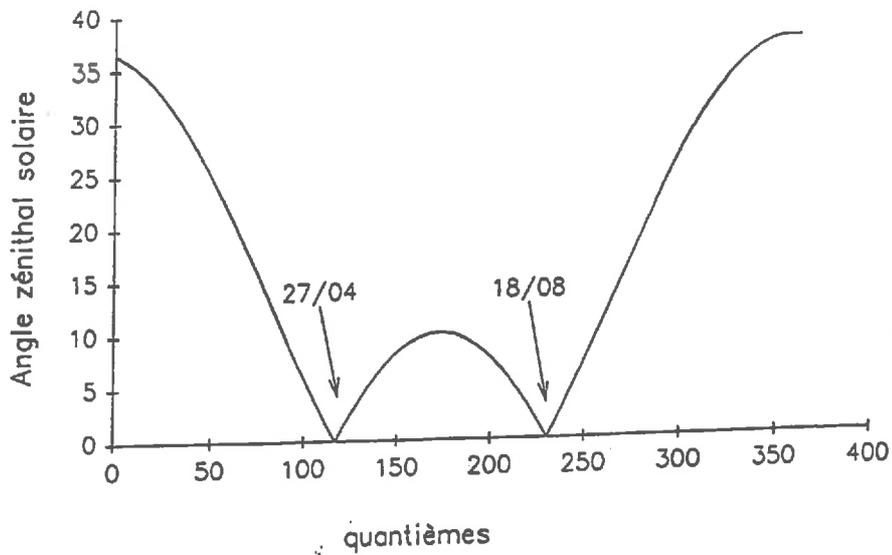


Figure 3.2: Angle zénithal solaire au midi solaire (Niamey, 13.5° N-2.1°E) (Bégué, 1991)

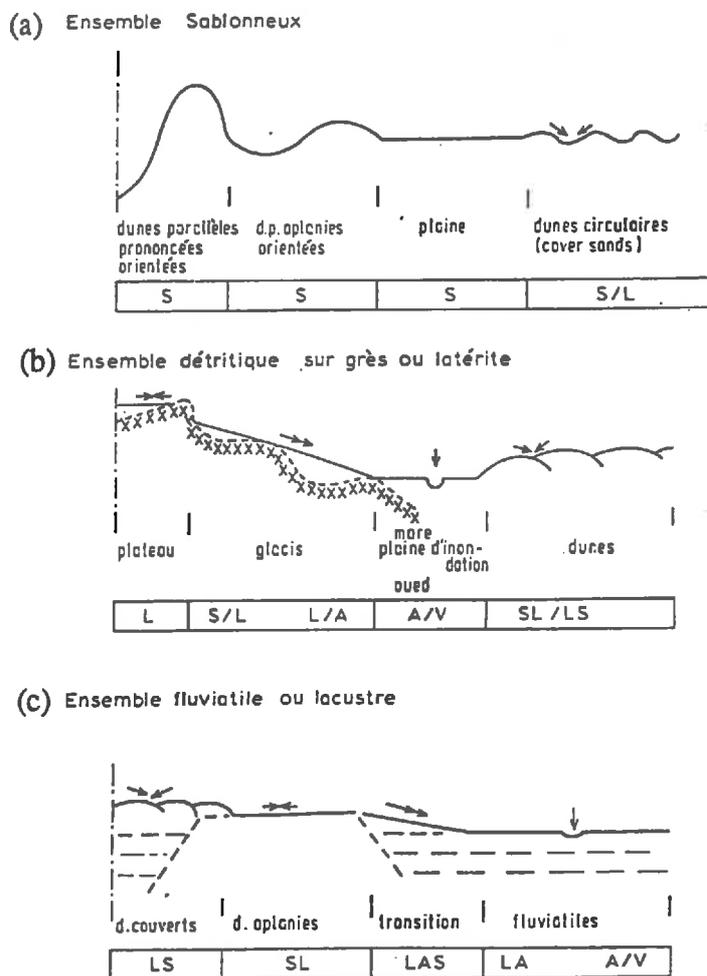


Figure 3.3: Principales unités de paysage sahélien (d'après Penning de Vries et Djitéye, 1982): (a) Ensemble sablonneux - (b) Ensemble détritique - (c) Ensemble fluvatile ou lacustre.

3.1.3 LES DIFFERENTS TYPES DE VEGETATION

3.1.3.1 La végétation naturelle

Le Sahel constitue la transition du Sahara sans végétation aux régions humides à végétation dense des zones soudano-sahéliennes et soudano-guinéennes. La végétation sahélienne est essentiellement formée de plantes herbacées annuelles de petite taille (des graminées en majorité), de graminées vivaces dispersées et de ligneux.

Cette végétation est caractérisée par une forte hétérogénéité, liée aux disponibilités en eau, à la nature du sol et à la topographie.

La biomasse produite par la végétation naturelle est caractérisée par une forte variabilité spatiale, liée à la pluviométrie et au sol sur lequel elle se développe. Dans le cas de sol sableux, la production végétale est estimée à quelques centaines de kilogrammes de matière sèche à l'hectare dans le secteur sahélo-saharien, à environ une tonne par hectare dans le secteur sahélien, et à 2 tonnes par hectare dans le secteur soudano-sahélien. Dans le cas d'une cuirasse, la végétation, connue sous le nom de "brousse tigrée", donne des rendements inférieurs à 1000 kg/ha (Gaston, 1992).

Les ligneux

Leur système racinaire comprend un réseau superficiel très étalé, permettant l'utilisation optimale de l'humidité fournie par les pluies et un réseau de racines profondes assurant l'alimentation permanente en eau.

Les organes aériens des arbustes sahéliens sont réduits. Leur feuillage est caduque, ce qui limite leur transpiration. Les feuilles sont découpées ou simples, de petite taille (acacia), réduites à l'état d'écailles ou même absentes, ou bien de taille moyenne, dures et vernissées. Fréquemment, feuilles et rameaux sont remplacés par des épines. Certaines plantes comme les Euphorbes accumulent l'eau dans des organes aériens charnus, et sont parfois dépourvues de feuilles.

La plupart des arbustes se dépouillent totalement de leurs feuilles pendant la saison sèche. Sur les sols détritiques, ils existent sous forme de bandes allongées de végétation, séparées par du sol nu. Cette structure, quand elle est répétée, est appelée "brousse tigrée".

La feuillaison, comme la floraison et la fructification sont fonction de la pluviométrie et des ressources en eau du sol. Ainsi en année très déficitaire, la feuillaison peut être réduite. Ceci explique les grandes variations interannuelles de la biomasse aérienne.

La reproduction des ligneux est assurée par les graines dont la germination est assujettie à de nombreuses conditions telles que l'enfouissement et l'humidité du sol.

Les plantes herbacées

Les espèces annuelles, qui pour la plupart sont des graminées, accomplissent leur cycle végétatif, plus ou moins long, pendant la saison des pluies. Les graminées ont des feuilles étroites qui en s'enroulant les protègent de la sécheresse. Après la fructification, les parties aériennes se dessèchent en se lignifiant. Les graines qui assurent la pérennité des espèces et la reconstitution du tapis herbacé sont petites, leur légèreté est favorable à leur dissémination.

Leur germination est plus ou moins rapide selon les espèces. Toutes les graines ne germent pas simultanément, ce qui explique l'épaississement progressif du tapis herbacé. Certaines d'entre elles peuvent ne pas germer et ce pendant plusieurs années consécutives (phénomène de dormance). Dans le cas où les pluies sont très espacées (parfois plus de 20 jours), plusieurs germinations peuvent être observées. Il semble malgré cela que le stock grainier se maintienne grâce à l'existence de graines reliques des années précédentes. Les espèces annuelles, qu'il s'agisse de graminées ou non, ont un système racinaire très développé et très dense.

Les plantes vivaces, quant à elles, subsistent pendant la longue saison sèche, grâce à des organes de résistance qui les maintiennent en état de vie latente: bulbes, tubercules, rhizomes ou souches pérennes.

3.1.3.2 La culture de mil

Milieu type

Bien que les meilleurs rendements soient obtenus dans les zones les plus méridionales, la fréquence de cette culture augmente vers le nord, où les conditions de sol et de pluviométrie limitent l'extension des autres céréales. Schématiquement, les paniculaires deviennent prépondérants en dessous de 600 mm de pluie, et exclusifs à partir de 400 mm (Charreau et Poulain, 1964). Ils sont réservés aux sols comportant moins de 7 % d'argiles.

Le soleil est constamment proche du zénith, et le rayonnement au sol est important, déterminant un climat chaud (autour de 30°C en moyenne) et un fort éclaircissement.

Le mil est une plante en C4, caractérisée par un taux de photosynthèse environ deux fois plus élevée que les plantes en C3. Elle utilise mieux l'eau, l'azote et le phosphore lorsque la température le permet (activité optimale pour des températures entre 30°C et 35°C). Elle est cultivée sur des sols qui sont en général sableux, avec un taux d'argile plus ou moins important. Ces sols ont été formés par des dépôts de sables éoliens sous forme de nappes ondulées et de cordons dunaires longitudinaux appelés localement "ergs".

Les cordons dunaires constituent un élément marquant du paysage au nord du 14ème parallèle. Ils s'estompent vers le sud où la nappe sableuse d'origine éolienne a été reprise par l'érosion hydrique et s'est mêlée aux matériaux locaux pour y former des "couvertures sableuses".

La rétention de l'eau des pluies par ces sols est faible. Mais le drainage externe et interne est bon et peut atteindre 50 à 250 mm/h (Hamon, 1978). L'intensité des pluies peut toutefois excéder momentanément la vitesse d'infiltration et entraîner un ruissellement. Les remontées capillaires sont faibles et deviennent nulles en saison sèche, créant un mulch qui protège une faible réserve d'eau que l'on peut retrouver à la saison suivante.

Les différentes phases du cycle

Une ou plusieurs dizaines de tiges se développent lors du tallage du mil. Ces tiges peuvent atteindre 1.5 à 3 m suivant les variétés. Les feuilles, plus étroites que celles du sorgho, sont longues de 60 à 100 cm, et larges de 5 à 7 cm. L'inflorescence se développe au sommet de

chaque tige. Dans le cas du mil, c'est un épi cylindrique long et mince (panicule ou chandelle) de taille très variable selon les variétés (de 20 à 100 cm).

Le mil est une graminée allogame. Son cycle cultural de 90 ou 120 jours généralement, peut être découpé en trois grandes phases (Figure 3.4) :

- La phase végétative : de la levée à l'initiation florale du maître brin. Cette phase est essentiellement caractérisée par un fort tallage qui varie entre 10 et 30 brins. L'accumulation de la matière sèche se fait dans les feuilles et dans les racines.
- La phase de développement de la panicule, de l'initiation florale à la floraison: c'est la montaison (élongation des internoeuds commençant à la base de la tige, et expansion des feuilles en surface). Le tallage est achevé, bien que pouvant redémarrer après une forte pluie, et l'accumulation de la matière sèche se fait dans les feuilles, tiges et racines. A la fin de cette phase, la surface foliaire et la hauteur du poquet ont atteint leur maximum, les feuilles du bas commencent à se dessécher et les talles à régresser.
- La phase de remplissage des grains : de la floraison à la fin de la maturité physiologique. L'accroissement de la matière sèche totale est dû surtout au remplissage des grains, mais aussi, encore, à l'élongation des tiges et des talles. A la maturité physiologique, les feuilles sont sénescentes, seules les dernières feuilles peuvent rester vertes.

Croissance et production végétale

La vitesse de croissance du mil dépend principalement des conditions variétales et de l'alimentation hydrique. En général, l'initiation du tallage commence 14 à 15 jours après le semis, la montaison 30 à 34 jours, l'épiaison 36 à 40 jours, et enfin le début de la floraison 45 à 55 jours après les semis.

Le tallage du mil est associé à une importante croissance en hauteur, jusque vers 55 à 60 jours après le semis. On distingue 4 phases dans les variations de la matière sèche (Siband, 1981) :

- croissance accélérée (une vingtaine de jours)
- croissance constante (durée variable)
- croissance ralentie
- diminution de poids d'importance très variable.

Des mesures réalisées sur trois variétés de mil ont montré qu'après fécondation, la croissance du grain de mil est quasiment linéaire jusqu'à la fin, avec un maximum compris entre 8 et 10 mg/grain atteint au bout de 24 jours après fécondation. La vitesse de croissance est la même pour les trois variétés, et n'accuse pas de fléchissement avant la fin du remplissage du grain (Siband, 1981).

Le remplissage du grain est assuré par une redistribution des minéraux provenant des talles. Sa durée est liée à la grosseur et au nombre de grains dans l'épi.

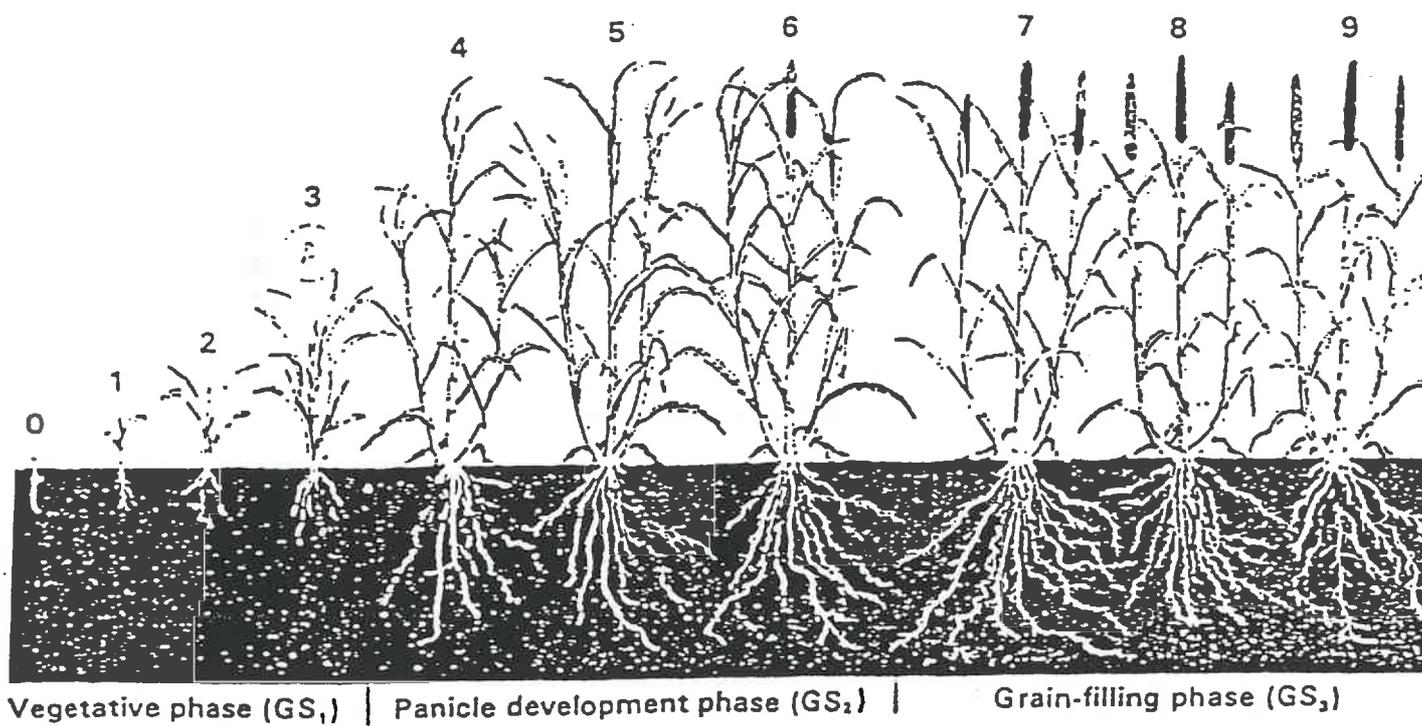


Figure 3.4: Cycle végétatif du mil (d'après Maiti et Bidinger, 1981)

Techniques culturales

La culture du mil est souvent conduite de la façon suivante :

- La préparation du terrain en début de saison des pluies, par un grattage superficiel.
- Le semis traditionnel, réalisé à la main, en lignes plus ou moins droites et régulières dès la première pluie. Le semis manuel implique souvent un nombre trop élevé de graines par poquet.
- Le démariage réalisé après la germination. S'il ne devrait laisser que trois à quatre tiges principales, en réalité 5 à 6 tiges sont conservées par les agriculteurs.
- Le sarclage généralement effectué une à deux fois au cours du cycle cultural, en fonction de la disponibilité en main d'oeuvre.

3.2 LES DONNEES DU PROJET P4AS

3.2.1 OBJECTIFS DU PROJET

Le principal objectif du projet P4AS (Projet Pilote de Prévision des Production Agricole Au Sahel) est de développer un système intégré de prévision des productions agricoles adapté aux spécificités de l'agriculture sahélienne. Le produit final escompté vise à accroître le rapport fiabilité-prix de l'estimation des productions des cultures pluviales en fin de campagne par rapport au système traditionnel des Statistiques Agricoles nationales.

Les images satellitaires occupent une place très importante dans ce projet, car d'une part elles facilitent la cartographie du domaine agricole sur des zones de grande dimension, d'autre part, elles permettent de spatialiser les estimations de rendements à l'aide de modèles.

L'estimation des rendements agricoles a été effectuée en utilisant deux méthodes; l'une est basée sur le calcul du bilan hydrique à travers la relation qui existe entre le rendement et un indice de stress hydrique; la deuxième est basée sur un modèle de production primaire, qui fera l'objet de notre étude.

Pour évaluer la production, le projet s'est également attaché à évaluer les superficies. Ces travaux sont ici brièvement présentés.

3.2.1.1 Estimation des surfaces

La démarche suivie est celle d'un découpage spatial sur quatre niveaux:

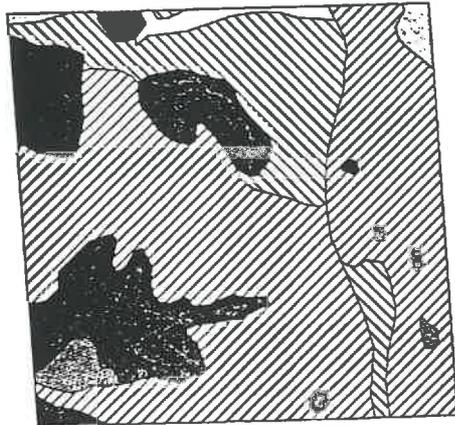
- la stratification en zones agro-climatiques par des procédures de compilation de données existantes et une analyse visuelle d'images Landsat TM.
- la détermination du domaine agricole par des traitements numériques sur des images Landsat couvrant tout un arrondissement.
- la détermination des faciès agricoles par des traitements sur des images SPOT sur une partie du territoire (zones échantillons).
- la détermination du parcellaire sur le terrain à l'aide de photographies aériennes et d'enquêtes terrain (segments).

SITE DE BENGOU
CARTE PEDOLOGIQUE

Echelle 1/50000

- | | |
|---|--|
| ■ SURFACE CORAASSET SOMMITALE
Sols peu évolués d'érosion | ▨ TERRASSE SUBRECENTE DE LA VALLEE FOSSILE
Sols peu évolués, ferrugineux très saboteux recouvrement éolien récent |
| ■ ESCARPMENT | ▩ TERRASSE RECENTE DE LA VALLEE FOSSILE
Sols peu évolués hydromorphes |
| ■ VERSANT DE RACCORDEMENT Versant rocheux
Sols minéraux bruts d'érosion | □ BAS FOND
Colls-d'érosion saboteux |
| ▨ GLAIS ANCIEN D'ACCUMULATION
Sols ferrugineux argile saboteux | ■ Village |
| ▨ GLAIS ANCIEN D'ACCUMULATION
Sols ferrugineux sable argileux | ■ Buis d'habitation |
| ▨ TERRASSE SUBRECENTE DE LA VALLEE FOSSILE
Sols peu évolués, ferrugineux très saboteux | |

(a)



SIRAO-SYRAME

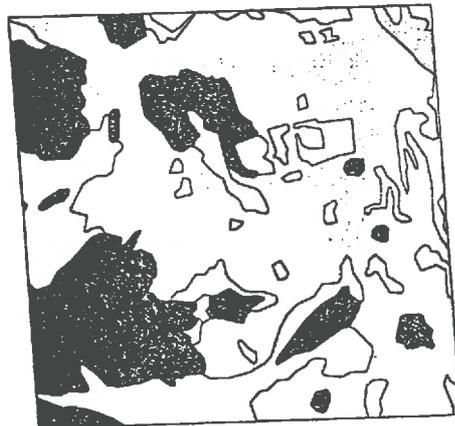
Projet P4AS

SITE DE BENGOU
OCCUPATION DES SOLS

Echelle 1/50000

- | | |
|---|--------------------|
| □ | NI |
| ▨ | Cultures |
| □ | Jachères |
| □ | Jachères anciennes |
| □ | Défilé |

(b)



SIRAO-SYRAME

Projet P4AS

Figure 3.5: Cartes réalisées dans le cadre du projet P4AS (Exemple de Bengou). (a) Carte pédologique - (b) Carte d'occupation du sol.

L'analyse des résultats montre l'intérêt de cette démarche pour l'estimation des superficies cultivées. Il a été ainsi possible de réaliser une carte des zones cultivées et un inventaire des surfaces suffisamment précis. La figure 3.5 montre la carte pédologique et la carte d'occupation du sol qui ont été réalisées pour le site de Bengou.

3.2.1.2 Estimation des rendements

La mise en place de 10 observatoires de 25 km² répartis suivant un gradient climatique rend disponible un jeu de données agronomiques de référence. Les observations y sont réalisées suivant un dispositif statistique qui permet d'aboutir à une bonne représentativité des informations et d'assurer la validation des modèles d'estimation des rendements.

L'intégration d'un modèle de production végétale utilisant des données NOAA-AVHRR est recherchée pour aboutir à une carte de production primaire, puis aux rendements en grain du mil par l'intermédiaire de l'indice de récolte.

3.2.2 LES SITES

La zone d'étude a une superficie de 275.000 km², et couvre deux départements du sud-ouest du Niger, Tillabéri et Dosso. Les dix sites du projet sont répartis sur toute la zone pour tenir compte des différentes situations écologiques (Tableau 3.1) (Figure 3.6).

Site	Latitude (° Nord)	Longitude (° Est)
Ouallam	14°18'	1°56'
Chikal	14°15'	3°27'
artiendé	13°51'	1°25'
Zebenfiti	13°47'	2°01'
Hamdallaye	13°33'	2°26'
Kouré	13°19'	2°35'
Harikanassou	13°14'	2°50'
Torodi	13°06'	1°49'
Dioundou	12°39'	3°34'
Bengou	11°58'	3°33'

Tableau 3.1: Localisation des 10 sites du projet P4AS

Les dix sites du projet ont été choisis en prenant comme critère principal la pluviométrie, celle-ci étant la principale variable explicative des rendements. Ainsi, ces dix sites se répartissent entre l'extrême sud de la zone du projet, dans la région de Gaya qui présente la plus forte pluviométrie annuelle du Niger (800 mm), et l'extrême nord qui constitue la limite septentrionale du domaine agricole, avec une pluviométrie annuelle de l'ordre de 400 mm.

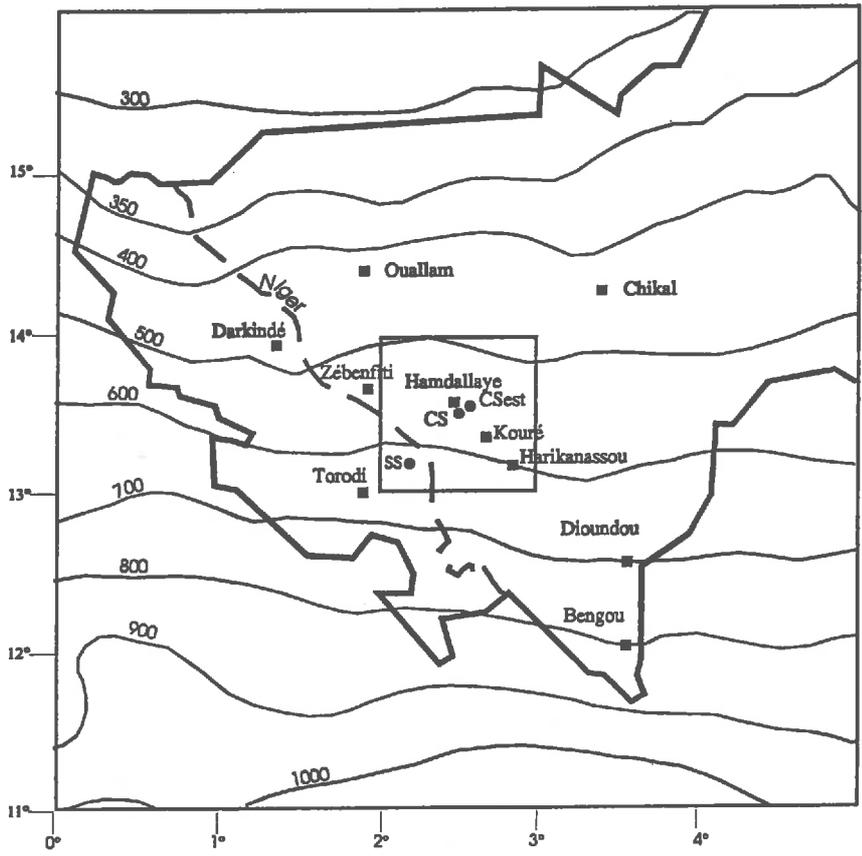


Figure 3.6: Carte de la zone du projet P4AS et le degré carré HAPEX. Les carrés pleins représentent les 10 sites P4AS et les cercles pleins représentent les 3 sites HAPEX-Sahel.

Au deuxième niveau, il a été tenu compte des situations agropédologiques en privilégiant celles qui d'après la carte des sols au 1/500.000 du Niger occidental (Gavaud et Boulet, 1967) paraissent les plus répandues et le plus contribuer à la production agricole dans la zone du projet.

Enfin, le choix des terroirs pour y implanter les sites tient compte bien évidemment de considérations pratiques telles que l'accessibilité.

La zone d'étude se présente comme une succession de vallées dominées par des plateaux et des buttes tabulaires cuirassées auxquelles se superposent au nord des formations dunaires.

Les sites de Bengou, Dioundou, Harikanasou et Chikal. Ils se situent le long d'un dallol qui est une vallée ancienne formée par un affluent du fleuve Niger, aujourd'hui inactif, remblayée d'alluvions et de dépôts éoliens, essentiellement sableux.

Les deux premiers sites font partie du dallol Maouri, les autres du dallol Bosso.

Les sites de Bengou, Dioundou et Chikal couvrent la toposéquence allant de la surface cuirassée sommitale tabulaire au dallol.

Les sites de Ouallam, Zebenfiti et Darkinde. Ils sont caractérisés par la présence d'accumulations éoliennes formant des cordons dunaires et des plaines sableuses se superposant à un modelé sculpté par les eaux.

A Ouallam, le site se trouve dans la vallée. Celle-ci est dominée par les buttes tabulaires, partiellement recouvertes par des dunes, au pied desquelles subsistent des lambeaux d'un glaciais cuirassé.

Le site de Zebenfiti s'appuie au sud sur la surface cuirassée sommitale. Celle-ci est recouverte d'un placage éolien discontinu. La plaine est formée de glaciais ensablés sur lesquels se sont mis en place des cordons dunaires dont l'un est compris dans l'emprise du site. Le fond de la vallée est constitué d'une plaine alluviale fossile semblable au dallol.

Le site de Darkinde est situé sur un socle à granites birimiens et les surfaces tabulaires cuirassées sont de faible extension, avec au sud des buttes hautes à versants raides culminant à 280 m. La région est caractérisée aussi par des interfluves à versants développés en vastes glaciais d'érosion. Les phases arides ont provoqué l'ensablement partiel des glaciais et la mise en place de cordons dunaires.

Les sites de Kouré et Hamdallaye. De part leur position en amont du bassin versant, les sites occupent toute la largeur de la vallée et débordent sur le plateau cuirassé. La vallée est formée d'un glaciais polygénique se raccordant au plateau par un versant concave. Les axes principaux du réseau hydrographique sont formés de gouttières ressemblant à des vallons et non par une plaine alluviale comme dans les autres sites. Les deux sites sont très semblables.

Le site de Torodi. Il se situe dans la vallée du Goroubi entre des plateaux cuirassés sommitaux qui l'encadrent à la côte 265 m. Le modelé de la vallée résulte de deux phases de creusement importantes ayant façonné des glaciais dont le plus ancien est cuirassé.

3.2.3 MESURES AU SOL

Sur ces 10 sites, deux types de mesures ont été réalisées au cours des deux hivernages 1991 et 1992, des mesures agronomiques et météorologiques.

3.2.3.1 Mesures agronomiques

Un suivi des cultures de mil a été réalisé tout au long du cycle cultural et pour chacun des sites. On a ainsi recueilli des informations caractérisant les différentes phases du développement des cultures depuis le semis jusqu'à la récolte.

Les observations et les mesures de rendement ont été réalisées grâce à un échantillonnage statistique. Ainsi, au niveau de chaque site, 30 champs ont été choisis de telle sorte qu'ils soient représentatifs du terroir villageois. Trois placettes de 5mx5m ont été choisies aléatoirement au niveau de chacun des 30 champs. Leur récolte a été séchée et pesée pour en déterminer le poids de la paille, des épis et des grains. Le rendement moyen du site est finalement la moyenne des rendements des 90 placettes (Tableau 3.2).

Nom site	Numéro champs	Cycle	Date levée	Date sarclage	Date maturité	Date récolte	Rt paille	Rt épis	Rt grain
Chikal	1	90	20/05/91	27/05/91	10/09/91	26/09/91	260	55	12
Chikal	2	90	18/05/91	10/06/91	29/08/91	23/09/91	450	170	90
.
.
.
Chikal	30	90	10/05/91	13/05/91	29/08/91	22/09/91	704	222	114

Tableau 3.2: Informations agronomiques de chaque site P4AS.

La matière sèche totale mesurée sur les 10 sites et pour les deux saisons 1991 et 1992 est présentée dans le tableau 3.3. Après analyse de ces mesures, trois sites présentent des estimations douteuses. En effet, en fin de saison 1991, le site Bengou a une quantité d'épis presque égale à celle de la paille, alors que le site Dioundou qui se trouve au sud présente un rendement très faible. Enfin, le site Ouallam qui se trouve au nord, présente une quantité de biomasse très importante en fin de saisons 1991 et 1992.

3.2.3.2 Mesures météorologiques

Sur chacun des 10 sites, on dispose d'un pluviomètre qui a permis de mesurer les précipitations journalières pendant tout le cycle des deux saisons 1991 et 1992 (Figure 3.7a et 3.7b). Les mesures de température de l'air et d'insolation journalière ont été acquises sur seulement 4 stations du réseau météorologique : Niamey, Tillabery, Birni N'kono et Gaya.

	1991			1992		
Site	Paille (Kg/ha)	Epis (Kg/ha)	Grains (Kg/ha)	Paille (Kg/ha)	Epis (Kg/ha)	Grains (Kg/ha)
Ouallam	4700	2176	835	2184	1045	682
Chikal	1258	383	212	658	267	139
Darkindé	2600	1325	802	2464	850	549
Zebenfiti	2433	842	496	2177	1080	692
Hamdallaye	1211	575	359	886	487	245
Kouré	2047	1125	659	2444	1164	611
Harikanassou	1348	930	493	697	371	217
Torodi	3223	1245	1373	2132	1418	1017
Dioundou	958	670	346	1844	811	441
Bengou	2054	2011	584	3184	1414	855

Tableau 3.3: Production du mil mesurée en fin de cycle pour les 10 sites P4AS (1991 et 1992). Les sites en gras présentent des mesures douteuses.

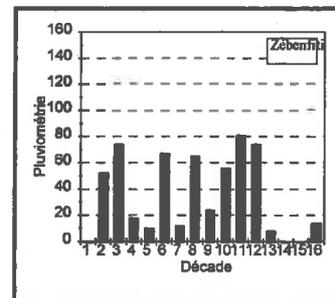
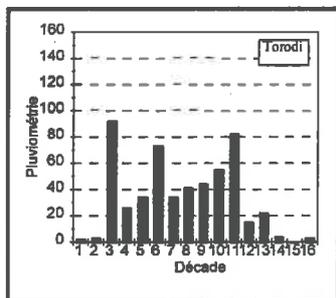
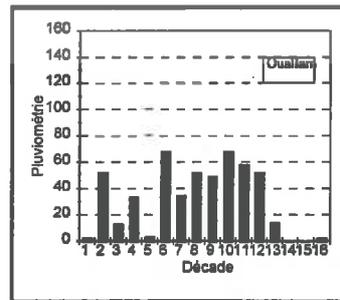
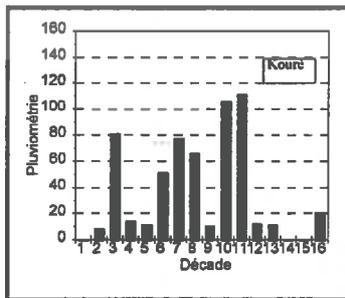
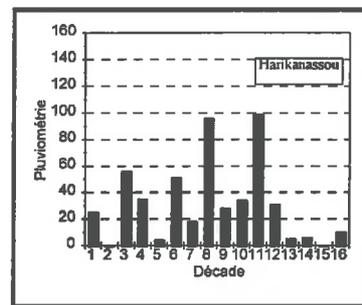
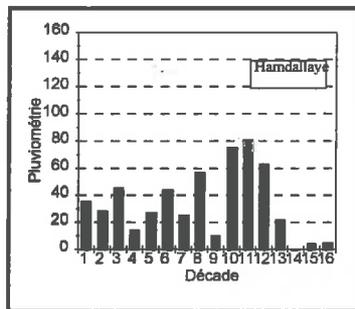
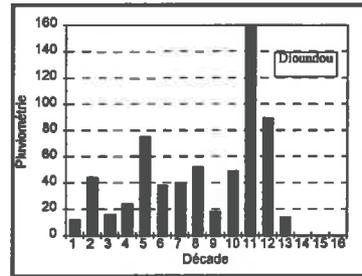
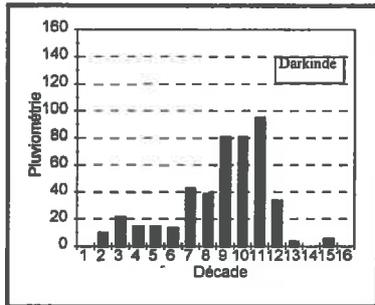
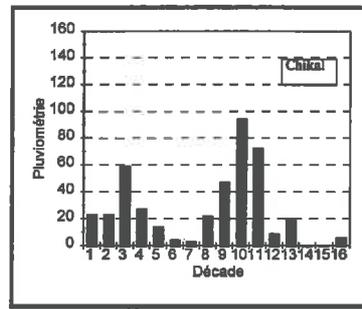
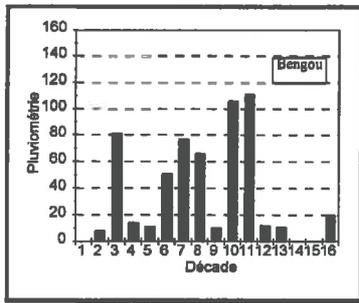


Figure 3.7a: Pluviométrie décadique des 10 sites P4AS (1er Mai au 21 Octobre 1991).

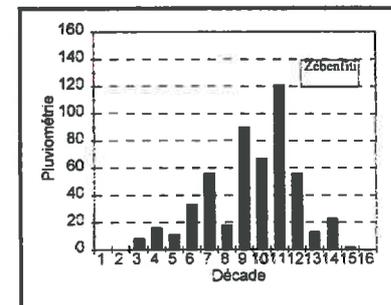
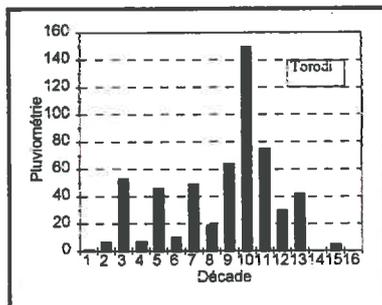
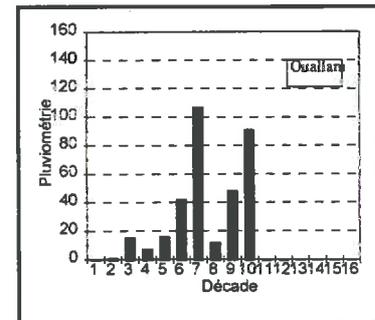
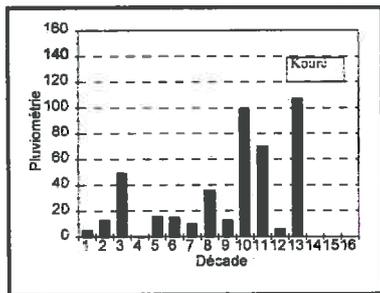
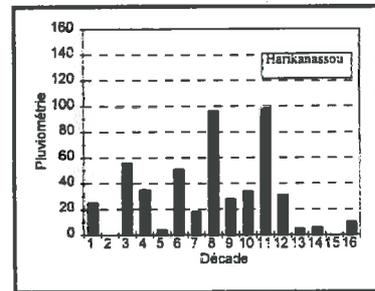
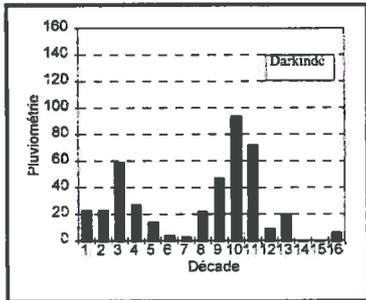
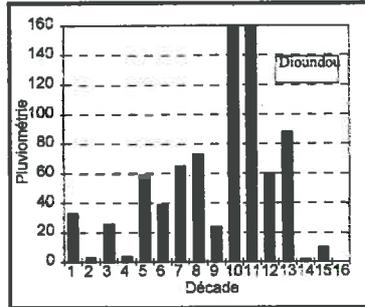
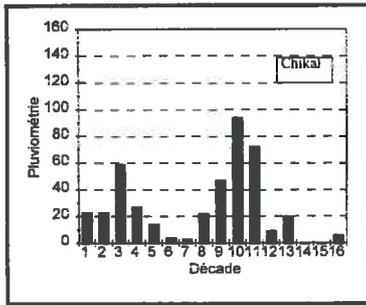
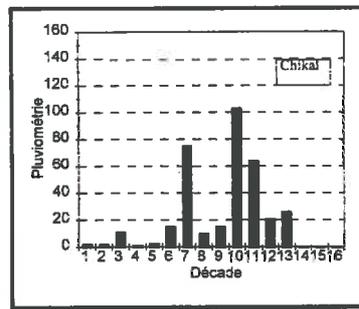
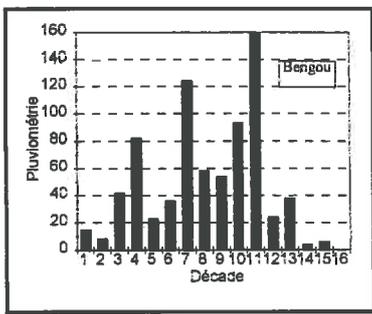


Figure 3.7b: Pluviométrie décaïdre des 10 sites P4AS (1er Mai au 25 Octobre 1992)

3.2.4 DONNEES SATELLITAIRES

Sur cette zone, on dispose des données qui sont issues de deux types de satellites. D'une part le satellite NOAA, et d'autre part les satellites d'observation de la terre SPOT et Landsat.

3.2.4.1 Données NOAA-AVHRR

Ces données sont constituées de 167 images pleine résolution (HRPT) d'une même scène de 512 x 512 pixels, centrée autour de Niamey (0°E-5°E, 11°N-16°N). Chaque image est composée de 4 canaux; les canaux rouge et proche infrarouge, et les deux canaux thermiques. Ces scènes couvrent la période du 1er Mai (JJ 122) au 21 Octobre (JJ 294) 1991, à raison d'une image par jour (parfois deux), acquises en milieu de journée (entre 12h et 15h30 TU) à la station du centre AGRHYMET de Niamey (Niger), où elles ont été corrigées géométriquement.

3.2.4.2 Données SPOT-HRV

Pour chacun des 10 sites du projet P4AS, on dispose d'une image SPOT acquise entre 1989 et 1991 (Tableau 3.4). Chaque image est composée des 3 canaux; vert, rouge et proche infrarouge.

3.2.4.3 Données LANDSAT

La seule image Landsat-TM utilisée a été acquise en 1990, et couvre la totalité de l'arrondissement de Birni (Tableau 3.4). Elle est formée par 4 canaux; bleu, vert, rouge et proche infrarouge.

Les bandes spectrales des capteurs AVHRR, HRV, et TM sont reportées sur le tableau 3.5.

	Scène	Date
SPOT XS		
Chikal	63/321	01/11/1990
	63/322	27/11/1990
Ouallam	60/321	08/12/1989
	61/321	06/11/1990
Darkindé	59/322	08/12/1989
Zebenfiti	60/322	08/12/1989
Hamdallaye	61/323	06/11/1990
Kouré	62/323	11/10/1990
Harikanassou	62/324	11/10/1990
Torodi	60/324	08/12/1989
Dioundou	64/325	01/11/1990
Bengou	64/326	01/11/1990
LANDSAT TM		
Birni	192/051	08/11/1990

Tableau 3.4: Images SPOT XS et LANDSAT TM disponibles sur la zone P4AS.

NOAA-AVHRR	SPOT-HRV	LANDSAT-TM
Rouge : 580-680 nm	Vert: 500-590 nm	Bleu : 450-520 nm
PIR : 725-1110 nm	Rouge : 610-690 nm	Vert : 530-610 nm
IRT : 10300-11300 nm	PIR : 790-900 nm	Rouge : 620-690 nm
IRT : 11500-12000 nm		PIR : 780-910 nm

Tableau 3.5: Bandes spectrales des capteurs AVHRR, HRV et TM.

3.3 LES DONNEES DE L'EXPERIMENTATION HAPEX-SAHEL

3.3.1 OBJECTIFS DE L'EXPERIENCE

Le projet HAPEX-SAHEL représente une partie des programmes internationaux WCRP (World Climate Research Program) et GEWE (Global Energy and Water Experiment), destiné à étudier les interactions entre la surface de la terre et l'atmosphère.

Ce type de projet a été mené dans un premier temps dans deux régions, au sud de la France en 1986 (HAPEX-MOBILY), et au Kansas (USA) en 1987 et 1989 (FIFE).

Le programme de recherche sur le climat global a recommandé que les études dans ce domaine soient menées dans différentes régions ayant des climats spécifiques, afin que la base de données finale soit représentative du climat du globe. Cette base de données permettra ensuite aux modèles de circulation générale de mieux décrire les processus régionaux et globaux.

De nombreuses mesures ont été réalisées sur une large gamme d'échelles temporelles et spatiales, et avec de nombreux instruments de télédétection, incluant les domaines de l'optique, de l'infrarouge, et des hyperfréquences (passives et actives). Toutes ces mesures ont été réalisées grâce à une étroite collaboration entre des équipes françaises, américaines, britanniques, danoises, hollandaises et nigériennes.

Dans le cas de notre étude, on s'intéressera plus particulièrement aux mesures faites sur les couverts, notamment leurs propriétés spectrales et radiatives.

3.3.2 LES SITES

La zone du projet HAPEX-SAHEL est située au sud-ouest du Niger (2° - 3° E, 13° - 14° N), et a une dimension de 1° en longitude et latitude. Elle présente un paysage très varié, avec des zones cuirassées (brousses tigrées), des zones cultivées (mil), et des zones de végétation naturelle (savannes).

Dans cette zone, trois sites (super-sites) ont été choisis pour réaliser les différentes mesures, le site central-ouest ($2^{\circ}33'$ E, $13^{\circ}31'$ N), le site central-est ($2^{\circ}42'$ E, $13^{\circ}31'$), et le site sud ($2^{\circ}12'$ E, $13^{\circ}12'$) (Figure 3.6).

Trois sites secondaires à l'intérieur de chacun des 3 sites ont été identifiés pour caractériser les différents couverts de la zone: le mil, la savane arbustive et la brousse tigrée.

3.3.3 LES MESURES AU SOL

Des mesures radiatives et physiologiques ont été réalisées pendant toute la saison des pluies 1992 sur le site central-ouest, sauf pour la brousse tigrée, car il est difficile de réaliser des mesures qui soient représentatives de ce type de couvert. Des transects passant par les 5 sites secondaires ont été effectués assez régulièrement en utilisant un Licor LAI 2000.

Les mesures de bilan d'énergie, de carbone, et de bilan hydrique ont été réalisées sur les 3 sites du degré carré HAPEX, en utilisant différents instruments au sol. Parallèlement, des mesures aéroportées et satellitaires ont été collectées dans le but de déterminer les variations spatiales caractéristiques de chacun des processus, et de tester la validité de l'inversion des modèles utilisant des données spatiales.

3.3.3.1 Mesures radiatives (site central-ouest)

Pour estimer le RPA (Rayonnement Photosynthétiquement Actif) de chaque type de couvert, des placettes de 10m x 10m ont été choisies pour effectuer des mesures du rayonnement incident, réfléchi et transmis par la végétation, et du rayonnement réfléchi par le sol nu (Bégué et al., 1994). Ces mesures ont été faites au niveau du couvert avec des capteurs fabriqués par la société SOLEMS-industrie, constitués de cellules photovoltaïques au silicium amorphe, ayant une réponse dans le visible, entre 400 et 700 nm (domaine du RPA).

3.3.3.2 Mesures biologiques

Pour mesurer la biomasse produite par le mil sur le site central-ouest, des relations allométriques liant le volume des poquets à la production végétale produite ont été établies pendant tout le cycle cultural, avec un pas de temps de quinze jours. Chaque relation nécessite 12 à 30 poquets choisis sur un transect pour mesurer leur volume et leur poids sec. La biomasse produite à l'échelle du champs est ensuite estimée à partir de ces relations grâce aux mesures de volume effectuées sur 8 placettes de 10 x 10 m² représentatives du couvert. L'estimation de la biomasse finale du mil sur la placette de mesure du bilan radiatif a permis l'estimation de l'efficacité de conversion du mil (Prince et al., 1993).

Dans le cas du site sud, la matière sèche du mil a été mesurée en fin de cycle sur 1 hectare à partir d'un échantillon de 400 carrés de rendement (5m x 5m) représentatif du champs.

3.3.4 DONNEES SATELLITAIRES ET AEROPORTEES

3.3.4.1 Données satellitaires

Pour chaque site, une image SPOT a été obtenue au cours de la saison 1992. De plus, une mosaïque SPOT acquise en 1988, couvre l'ensemble du degré carré.

En 1992, 160 images NOAA-AVHRR ont été acquises, couvrant la période du 1er Mai (JJ 121) au 25 Octobre (JJ 299). Les scènes sont identiques à celles du projet P4AS. Chaque image est composée des 2 canaux visible et proche infrarouge, et des deux canaux thermiques.

3.3.4.2 Données aéroportées

Les mesures aéroportées ont été réalisées avec le radiomètre Exotech 100AX pour le rouge (630-690 nm) et le proche infrarouge (760-900 nm), et le radiomètre thermique Everest 4000A pour l'infrarouge thermique (10.5-12.5 μ m). Ces mesures ont été effectuées à 200 m d'altitude, avec une résolution au sol de 52.7 m pour le radiomètre Exotech, et 70.5 m pour le radiomètre Everest. Les vols ont été réalisés suivant des transects représentatifs des couverts de chacun des sites secondaires.

CHAPITRE 4:

CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES DES DONNEES

NOAA-AVHRR

CHAPITRE 4 :

CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES DES DONNEES NOAA-AVHRR

Les canaux du capteur AVHRR ont été choisis à l'origine pour étudier les nuages et les glaces, et pour les recherches sur le bilan radiatif de la terre. Actuellement on constate que ce capteur est très utilisé pour le suivi de la végétation. Malheureusement le signal de la végétation est généralement "contaminé" par l'atmosphère, entraînant une baisse du signal dans le proche infrarouge due à l'absorption par la vapeur d'eau et une augmentation du signal dans le rouge due à la diffusion des aérosols et des molécules. Il est donc nécessaire de corriger ces effets atmosphériques pour toute analyse multitemporelle des données, et pour toute analyse "physique" du signal de la cible.

Dans ce chapitre sont décrits les différentes caractéristiques du capteur AVHRR, et l'algorithme de correction des effets perturbateurs de l'atmosphère. Les données AVHRR sont alors corrigées des effets de la vapeur d'eau, en utilisant les sorties du Modèle de Circulation Générale du CEPMMT (Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme) qui a une résolution de 1° en longitude et latitude, et les effets des aérosols et d'ozone en utilisant la climatologie.

4.1 LES CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES

Les mesures de rayonnement réalisées par les capteurs AVHRR dans les courtes longueurs d'onde sont perturbées de façon plus ou moins importante par la présence de l'atmosphère (Tanré et al., 1979, 1983; Slater et Jackson, 1982; Kaufman, 1985; Duggin, 1985; Fraser et Kaufman, 1985). Cette influence de l'atmosphère est essentiellement due à la diffusion et à l'absorption du rayonnement, et dépend de la longueur d'onde considérée. Il est de ce fait nécessaire de corriger le signal si l'on désire avoir une information représentative de la surface terrestre.

Plusieurs méthodes de correction sont proposées dans la littérature (Kawata et al., 1983; Steven et Rolin, 1986; Khosraviani et Cracknell, 1987; Kaufman et Sendra, 1988, Basu et al., 1990, Paltridge et Mitchell, 1990; Koepke, 1989; Tanré et al., 1991). La plupart de ces méthodes consistent à estimer la réflectance de surface à partir de la solution de l'équation de transfert radiatif dans l'atmosphère. La difficulté que rencontrent ces méthodes réside dans la variabilité spatiale et temporelle de la composition de l'atmosphère, essentiellement celle qui correspond aux aérosols, à l'ozone et à la vapeur d'eau.

Au cours des paragraphes suivants, on discutera l'impact de l'atmosphère sur les réflectances mesurées, et leur correction grâce au modèle 5S simplifié.

4.1.1 LE MODELE DE CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES

4.1.1.1 Bases physiques:

L'interaction du rayonnement électromagnétique avec l'atmosphère se traduit par deux effets principaux : l'absorption et la diffusion.

* L'absorption du rayonnement par les molécules de l'atmosphère résulte, dans les domaines du visible et de l'infrarouge thermique, de phénomènes relativement complexes que l'on peut résumer par des transitions électroniques, vibrationnelles et rotationnelles des molécules. De ce fait, l'absorption sera non seulement fonction de la structure de la molécule et des atomes qui la constituent, mais aussi de l'énergie des photons incidents d'après la loi de Planck:

$$E_i - E_f = h \cdot \nu$$

avec E_i l'énergie incidente, E_f l'énergie finale, h la constante de Planck, et ν la fréquence.

La conséquence de l'absorption est que l'énergie transmise par la couche de gaz est inférieure à l'énergie incidente mais possède la même longueur d'onde. On caractérise globalement l'absorption totale de cette couche de gaz par sa fonction de transmission $T_g(\lambda)$:

$$T_g(\lambda) = E_t(\lambda)/E_i(\lambda)$$

avec

$E_t(\lambda)$: énergie transmise par la couche de gaz à la longueur d'onde λ

Le calcul de cette fonction de transmission est relativement complexe. La modélisation de la transmission prend en compte différents paramètres dont la concentration du gaz absorbant en fonction de l'altitude ainsi que la longueur d'onde et le spectre d'absorption du gaz.

* La diffusion est à la fois le fait des molécules gazeuses et des particules. Dans le cas des molécules qui ont une taille inférieure aux longueurs d'ondes du rayonnement, la modélisation est relativement bien connue. Les molécules sont alors assimilées à des dipôles et leurs propriétés de diffusion sont décrites par le modèle de Rayleigh.

Dès que la dimension des particules devient comparable à la longueur d'onde du rayonnement incident, une partie du rayonnement passe à travers les particules tandis que l'autre partie ne rencontre que la surface extérieure. Ce type de diffusion est appelé diffusion de Mie, et sa modélisation est beaucoup plus complexe que dans le cas précédent.

4.1.1.2 Le modèle "5S"

Le modèle "5S" (Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire) permet de simuler le signal capté par le satellite dans le domaine spectral compris entre 0.25 et 4 μm (Tanré et al., 1979, 1983, 1990). Ce modèle est présenté en annexe A.

4.1.2 LE MODELE "5S" SIMPLIFIE

Le modèle "5S" a été codé en langage Fortran par le Laboratoire d'Optique Atmosphérique de Lille. Ce programme présente un inconvénient non négligeable qui est de nécessiter un temps de calcul qui peut aller jusqu'à 3 minutes pour un seul point sur un ordinateur type PC 386/33 Mhz.

Dans certaines situations, et notamment dans des procédures opérationnelles de correction du signal, ceci devient vite très pénalisant. C'est dans ce but que des modèles simplifiés des différentes fonctions caractérisant la solution de l'équation de transfert radiatif dans l'atmosphère ont été développés au LERTS (Rahman et Dedieu, 1994) sur la base du modèle 5S.

La correction réalisée avec le modèle simplifié est 1325 fois plus rapide que dans le cas du modèle 5S.

Formulation

La réflectance au sommet de l'atmosphère ρ^* est donnée par :

$$\rho^* = T_g \cdot \left(\rho_a + \frac{\rho \cdot T}{1 - \rho \cdot S} \right)$$

avec T_g la transmission gazeuse totale, T la transmission diffuse totale, S l'albédo sphérique atmosphérique, ρ_a la réflectance atmosphérique et ρ la réflectance réelle de la cible.

A partir des simulations réalisées à l'aide du logiciel 5S et des équations du modèle, les différents termes de cette équation peuvent être représentés par des fonctions analytiques simples. Les paramètres de ces fonctions sont ajustés pour chaque capteur, compte tenu de l'intégration spectrale.

Transmission gazeuse "tg"

Le terme de transmission gazeuse est le produit des transmissions gazeuses tg sur le double trajet de chacun des gaz considérés : ozone, gaz carbonique, vapeur d'eau, et oxygène :

$$\prod_{i=1}^4 tg_i$$

avec

$$tg_i = \exp [a \cdot (m \cdot U_i)^n]$$

où a et n sont des constantes qui dépendent de la bande spectrale, U est le contenu en gaz de

l'atmosphère, et m la masse d'air, calculé suivant la formule:

$$m = \left(\frac{1}{\mu_s} \right) + \left(\frac{1}{\mu_v} \right)$$

où

$$\mu_s = \cos(\theta_s)$$

$$\mu_v = \cos(\theta_v)$$

θ_s et θ_v sont les angles zénithaux solaire et d'observation, respectivement.

Pour certaines bandes spectrales, l'absorption d'un ou plusieurs gaz est nulle. Les coefficients a et n sont alors nuls.

La réflectance atmosphérique ρ_a

La réflectance atmosphérique est représentée par la somme de la réflectance atmosphérique due à la diffusion de Rayleigh (molécules) ρ_{aR} et de la réflectance atmosphérique due à la diffusion de Mie (aérosols) ρ_{aP} :

$$\rho_a = \rho_{aR} + \rho_{aP}$$

La réflectance atmosphérique des molécules peut être formulée par:

$$\rho_{aR} = \frac{\tau_R \cdot P_R(\xi)}{4 \cdot \mu_s \cdot \mu_v}$$

où τ_R est l'épaisseur optique Rayleigh dans la bande spectrale considérée, et $P_R(\xi)$ est la fonction de phase pour la diffusion Rayleigh, fonction de l'angle de diffusion ξ , et qui s'écrit:

$$P_R(\xi) = 0.75 \cdot (1 + \cos^2(\xi))$$

avec

$$\cos(\xi) = -[\mu_s \cdot \mu_v + \sqrt{(1 - \mu_s^2) \cdot (1 - \mu_v^2)} \cdot \cos(\phi_s - \phi_v)]$$

avec ϕ_s et ϕ_v les angles azimutaux solaire et d'observation.

La réflectance atmosphérique des aérosols s'écrit:

$$\rho_{aP} = \frac{\tau_P \cdot P_P(\xi)}{4 \cdot \mu_s \cdot \mu_v}$$

τ_P : l'épaisseur optique des aérosols dans la bande spectrale considérée.

$P_P(\xi)$: la fonction de phase pour la diffusion des aérosols, fonction de l'angle de diffusion ξ .

$P_p(\xi)$ est fourni sous la forme d'un polynôme du second degré en ξ (ξ en degré décimaux):

$$P_p(\xi) = a_0 + a_1 \cdot \xi + a_2 \cdot \xi^2$$

avec a_0 , a_1 et a_2 des constantes qui dépendent de la bande spectrale.

Pour la diffusion par les aérosols, la longueur d'onde de référence dans le modèle 5S est 550 nm. L'épaisseur optique moyenne des aérosols sur la bande est une fonction linéaire de la valeur τ_{p550} :

$$\overline{\tau_p} = b_0 + b_1 \cdot \tau_{p550}$$

avec

τ_{p550} : épaisseur optique des aérosols à 550 nm.

b_0 et b_1 des constantes qui dépendent de la bande spectrale.

La transmission totale T

La transmission totale est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$T(\theta) = a_0 + \frac{a_1 \cdot \tau_{550}}{\cos(\theta)} + \frac{a_2}{(1 + \cos(\theta))}$$

avec

$\theta = \theta_s$ ou θ_v

et

a_0 , a_1 , a_2 des coefficients spécifiques à une bande spectrale.

L'albédo sphérique atmosphérique S

Il est calculé à l'aide de la relation suivante :

$$S = \frac{b \cdot \tau \cdot (1 + e^{-b \cdot \tau})}{(2 + b \cdot \tau)}$$

où $b = (b_m \cdot \tau_m + b_p \cdot \tau_p) / \tau$

et

$\tau = \tau_m + \tau_p$

b_m : coefficient d'anisotropie des molécules.

b_p : coefficient d'anisotropie des aérosols.

Les coefficients de chaque fonction ont été calculés pour les bandes spectrales du capteur AVHRR-11.

4.1.3 SENSIBILITE AUX PARAMETRES ATMOSPHERIQUES

Cette partie est consacrée à l'analyse des effets des différentes composantes de l'atmosphère, tout particulièrement la vapeur d'eau et les aérosols, sur le signal mesuré dans les bandes rouge et proche infrarouge du capteur AVHRR, ainsi que sur le NDVI correspondant.

L'influence des autres éléments qui composent l'atmosphère (ozone, dioxyde de carbone, oxygène ...) ne sera pas analysée, leur influence étant très faible dans le visible et le proche infrarouge.

Effets dus à la vapeur d'eau

L'augmentation de la concentration d'un gaz absorbant tel que la vapeur d'eau va se traduire par une diminution de la transmission gazeuse de l'atmosphère. Cette diminution dépend de la bande spectrale (Goody, 1964; Rothman et al., 1982). Les simulations faites avec 5S montrent que l'intégration sur une large bande atténue l'influence de l'absorption sur les mesures (Faizoun et al., 1994).

Dans le canal rouge du capteur AVHRR (0.58 μm - 0.68 μm), les bandes d'absorption de la vapeur d'eau sont très rares (Figure 4.1a). Il en résulte une faible diminution du signal : environ 3 % pour une atmosphère sèche et 5 % pour une atmosphère humide en valeur relative (Figure 4.2).

Par contre, dans le proche infrarouge du capteur AVHRR (0.725 μm - 1.100 μm), les réflectances mesurées sont affectées par l'absorption d'une façon importante (Figure 4.1b). Les écarts relatifs de celles-ci sont de l'ordre de 12 % pour une atmosphère sèche, et atteignent 25 % quand l'atmosphère est humide (Figure 4.2).

En plus de l'absorption, les molécules de vapeur d'eau sont responsables de la diffusion de Rayleigh. Elle se manifeste par la diffusion d'une partie du rayonnement vers le capteur, alors que l'autre partie est diffusée vers la surface de la terre. La diffusion par les molécules est modélisée dans 5S par la réflectance atmosphérique et la transmission diffuse des molécules. Elle est très importante dans les courtes longueurs d'onde, car ses variations suivent une loi en λ^{-4} .

Enfin, l'influence totale des molécules de l'atmosphère (absorption et diffusion) est liée à la fois à la bande spectrale et à la valeur de la réflectance de la cible. Suivant ces deux facteurs, la réflectance apparente pourra être supérieure ou inférieure à la réflectance réelle de la cible.

De manière générale, le canal rouge du capteur AVHRR est très peu perturbé par la vapeur d'eau. Ceci est dû d'une part aux faibles bandes d'absorption dans ce canal.

Ces perturbations se retrouvent au niveau de l'indice NDVI calculé à partir des deux canaux (Tanré et al., 1992). En effet, les variations qui en résultent atteignent 15 % dans le cas d'une atmosphère humide, pour un indice de végétation égal à 0.5, et 35 % pour un indice égal à 0.25.

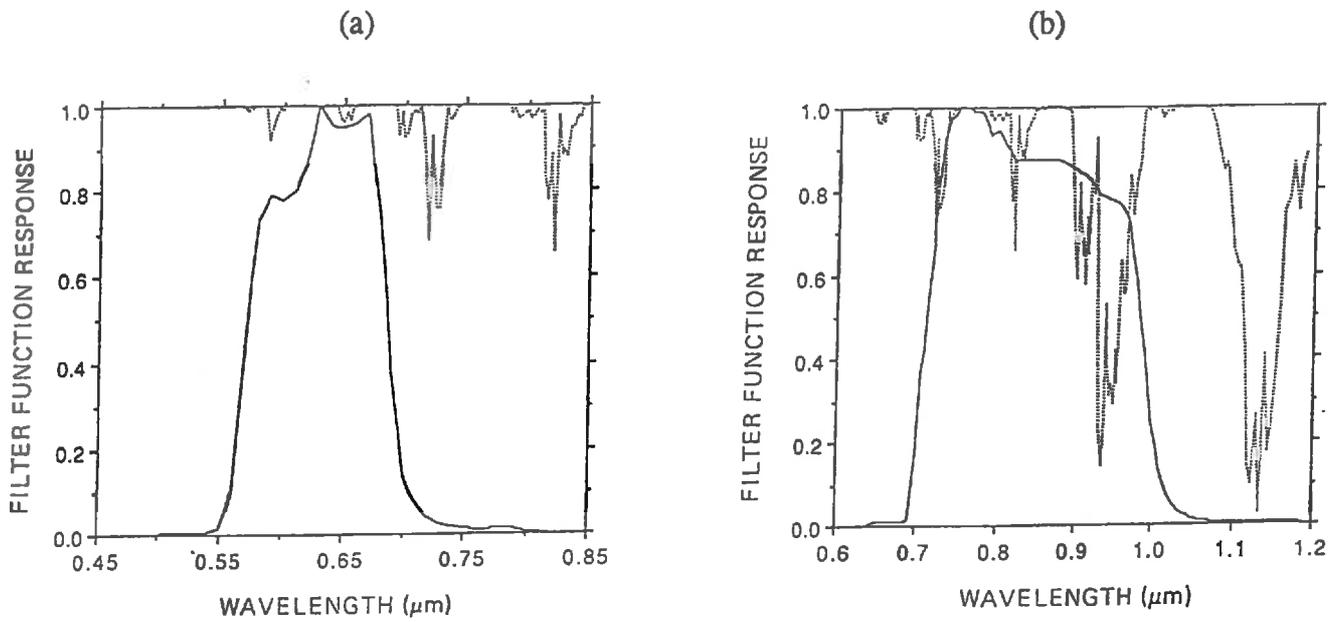


Figure 4.1: Bandes spectrales du capteur AVHRR (—) a) rouge et b) proche infrarouge, et les bandes d'absorption de la vapeur d'eau (.....) (d'après Justice et al., 1991).

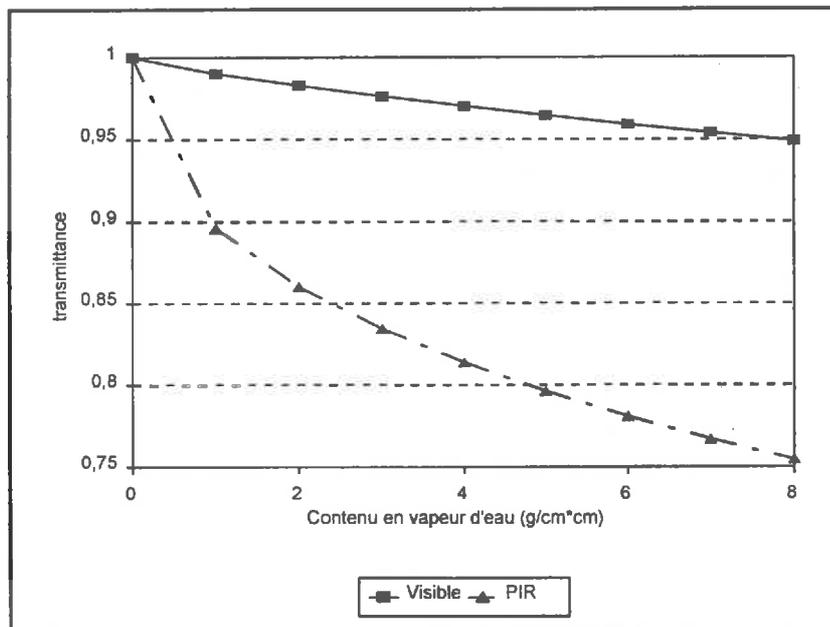


Figure 4.2: La transmittance de la vapeur d'eau en fonction du contenu en vapeur d'eau dans les deux canaux AVHRR rouge et proche infrarouge ($m=3$).

Effets dus aux aérosols

L'influence de l'augmentation de l'épaisseur optique des aérosols sur le signal mesuré par AVHRR va se traduire de deux manières (Chandrasekhar, 1960; Lenoble, 1977; Deschamps et al., 1983) :

- une augmentation de la réflectance apparente liée à la réflectance atmosphérique.
- une diminution de la réflectance de surface due à la diminution de la transmission atmosphérique.

Cette augmentation et diminution de la réflectance dépendront entre autres paramètres :

- de l'épaisseur optique
- de la réflectance de surface
- de la bande spectrale
- des conditions géométriques d'observation

Les simulations effectuées avec 5S (en prenant une valeur de l'albédo de diffusion simple ω_0 constante) ont montré que dans le cas du capteur AVHRR, les aérosols engendrent des perturbations plus importantes que les molécules. L'écart relatif entre la réflectance au sommet de l'atmosphère et la réflectance de surface atteint 18 % dans le canal rouge, et 13 % dans le proche infrarouge. L'erreur sur le NDVI peut atteindre 26 % (Faizoun, 1991).

Ces résultats ont été obtenus pour une valeur constante de l'albédo de diffusion simple ω_0 . Une autre valeur de ω_0 va modifier les caractéristiques d'absorption des aérosols, et donc les résultats précédents.

De manière générale, pour une valeur de l'épaisseur optique des aérosols, la réflectance atmosphérique et la transmission atmosphérique des aérosols diminuent lorsque l'albédo de diffusion simple diminue, c'est à dire lorsque l'absorption par les aérosols augmente.

Selon Kaufman (1987), il existe pour chaque bande spectrale et pour un type d'aérosol donné, une valeur de réflectance dite "réflectance critique" pour laquelle les deux effets caractérisant l'influence des aérosols (augmentation de la réflectance atmosphérique et diminution de la réflectance de surface) se compensent. Quand on s'éloigne de cette réflectance critique, les perturbations dues à l'atmosphère deviennent plus importantes. Les réflectances de surface inférieures (respectivement supérieures) à la réflectance critique donneront une réflectance apparente plus élevée (respectivement plus faible).

4.2 LES DONNEES NOAA-AVHRR

Le capteur AVHRR est embarqué sur les satellites héliosynchrones polaires NOAA, en orbite à 825 km d'altitude. Actuellement il existe 4 satellites NOAA opérationnels (Tableau 4.1).

Mission	Date de mise en service	Période (mn)	Périgée (km)	Apogée (km)	Inclinaison (°)	Instruments
NOAA-9	02/12/84	102.00	841.0	862	98.90	AVHRR, TOVS, SEM, DCS, SAR, SBUV, ERBE
NOAA-10	17/09/86	101.27	803.0	824	98.66	AVHRR, TOVS, SEM, DCS, SAR, ERBE
NOAA-11	29/04/88	102.14	845.0	863	98.91	AVHRR, TOVS, DCS, SAR, SBUV
NOAA-12	14/05/91				98.70	AVHRR, TOVS, DCS, SAR, SBUV

Tableau 4.1: Les satellites NOAA en fonction et leurs caractéristiques.

Le miroir du module AVHRR est en rotation à la vitesse de 360 tours/mn. Le signal recueilli par les capteurs au cours d'une phase de balayage utile de 110° ($\pm 55^\circ$) est numérisé en 2048 mesures qui couvrent une largeur de 2500 km environ, perpendiculaire à la trace du satellite. Le champ de la mesure au nadir est de l'ordre de 1100 m. La longueur des scènes transmises au sol dépend des positions respectives de la station de réception et du satellite. Lorsque la trace du satellite recoupe la position géographique de la station, la transmission peut atteindre 16 mn et l'étendue de la scène enregistrée peut atteindre 6000 km.

Les données acquises par le radiomètre AVHRR peuvent être transmises en temps réel à haute résolution (HRPT: High Resolution Picture Transmission), ou avec une résolution réduite (APT: Area Picture Transmission). Les données peuvent être enregistrées à bord, puis transmises à haute résolution (LAC: Local Area Coverage) ($1.1 \times 1.1 \text{ km}^2$) et à basse résolution (GAC: Global Area Coverage) ($4 \times 4 \text{ km}^2$).

Les images NOAA-11-AVHRR de notre zone d'étude ont été acquises à la station d'AGRHYMET, en haute résolution (HRPT). Les analyses concernant leur acquisition et leur prétraitement seront discutées dans les paragraphes qui vont suivre.

4.2.1 RAPPELS DES CARACTERISTIQUES SPECTRALES

Le capteur AVHRR de NOAA-11 possèdent 5 bandes spectrales (une dans le visible, une dans le proche infrarouge, une dans le moyen infrarouge, et deux dans l'infrarouge thermique) (Tableau 4.2).

NOAA-11		
Canaux	Bande Spectrale (μm)	
Canal 1	0.58-0.68	Visible
Canal 2	0.725-1.10	Proche infrarouge
Canal 3	3.55-3.93	moyen infrarouge
Canal 4	10.3-11.3	Infrarouge thermique
Canal 5	11.5-12.5	Infrarouge thermique

Tableau 4.2: Caractéristiques spectrales des satellites NOAA.

Le codage de chaque mesure spectrale nécessite deux octets, l'équivalent de 16 bits, mais seuls les 10 bits de faible poids sont employés pour représenter leur dynamique allant de 0 à 1023.

4.2.2 CONFIGURATION GEOMETRIQUE

Pour les zones sahéniennes, les satellites NOAA dont le numéro est impair présentent l'avantage de passer au noeud ascendant l'après-midi, alors que les autres passent au lever et au coucher du soleil. Ils passent au dessus du même point tout les neuf jours environ (à moins d'un degré de longitude près). Cependant, le champs de l'instrument est suffisamment large pour permettre une observation quotidienne de la zone choisie, les angles de prise de vue étant très larges. Il arrive que lorsque la zone observée est tout à fait au bord du champs, une partie seulement de la zone qui nous intéresse soit présente dans l'image. Cette situation est très fréquente en zone sahénienne (faibles latitudes).

Les variations des angles zénithaux et azimutaux de visée des deux jeux de données AVHRR 1991 et 1992 sont données en figure 4.3. Les variations de l'angle zénithal d'observation sont assez importantes, elles se situent entre 0 et 70°. La résolution effective du radiomètre évolue en conséquence, de 1.1 km au nadir à 4.8 km au bord du champs de visée. Les valeurs de l'angle azimuthal de visée se répartissent en deux classes dont les valeurs sont très voisines de 80° et 260° (par rapport au nord).

4.2.3 HEURE DE PRISE DE VUE

Les passages du satellite NOAA-11 sur la zone sahénienne se situent au voisinage de 13h30. Mais l'heure de prise de vue varie d'un jour à l'autre, et on observe en conséquence des valeurs d'angles solaires zénithaux et azimutaux très variables. La figure 4.4 montre la valeur de ces angles pour les 2 jeux de données AVHRR. L'angle zénithal solaire varie entre 13° et 60°, alors que l'angle azimuthal solaire varie entre 240° et 295°.

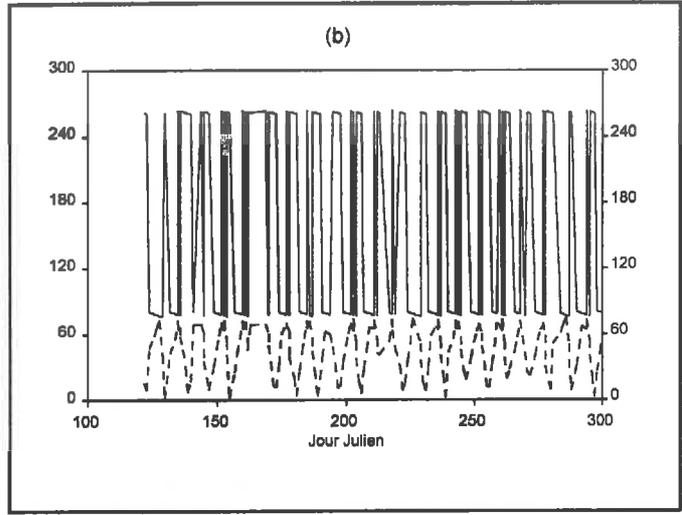
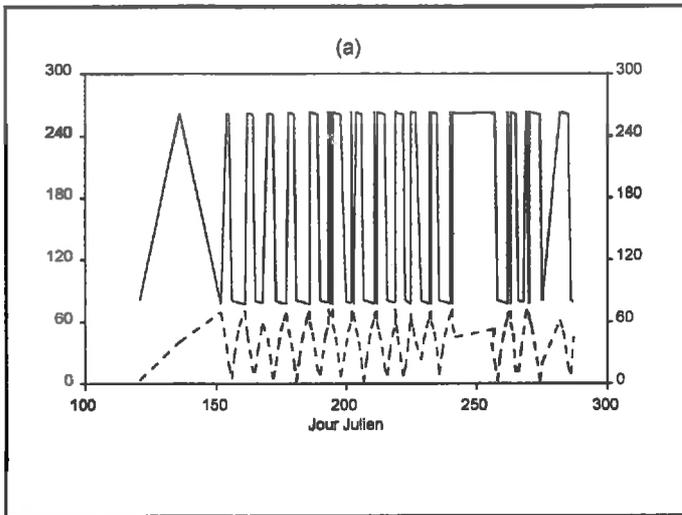


Figure 4.3: Angles zénithaux (---) et azimutaux (—) de visée correspondants au pixel central des images AVHRR pour les saisons a) 1991 et b) 1992.

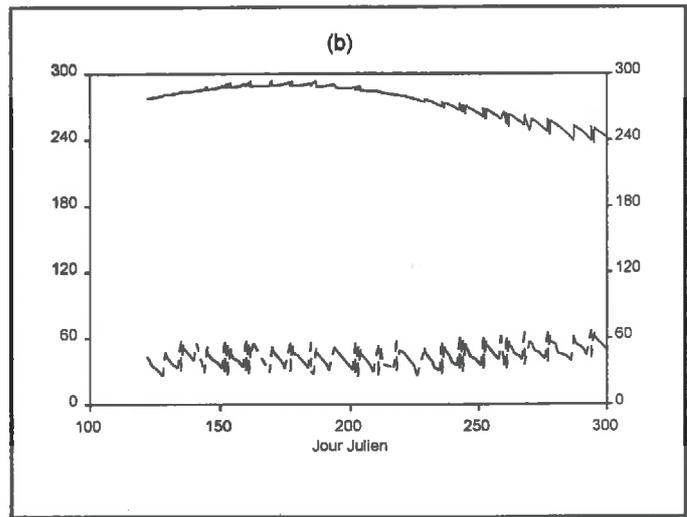
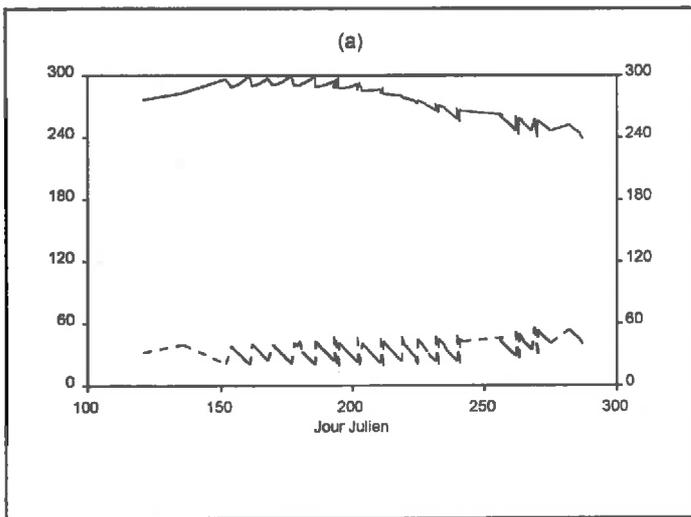


Figure 4.4: Angles zénithaux (---) et azimutaux (—) solaires correspondants au pixel central des images AVHRR pour les saisons a) 1991 et b) 1992.

Les variations d'heures de prise de vue sont présentées sur la figure 4.5. Elles varient entre 13h00 et 15h30 TU. Ces fluctuations sont dues au fait que les images correspondent à des orbites différentes.

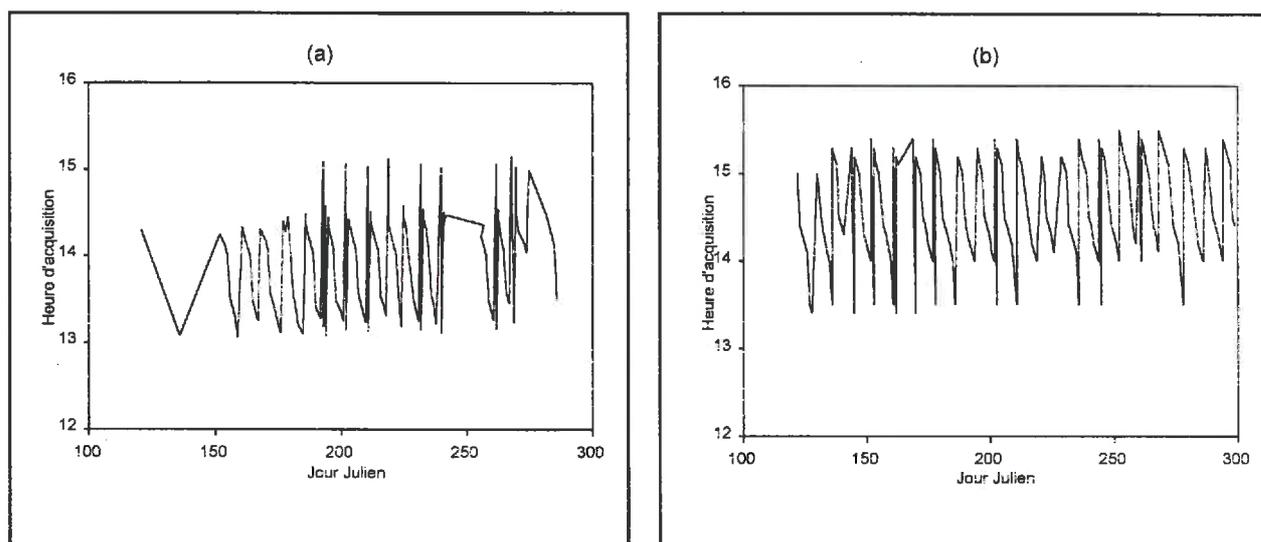


Figure 4.5: Heures d'acquisition (TU) des images AVHRR pour les deux saisons a) 1991 et b) 1992.

4.2.4 PARAMETRES D'ETALONNAGE

Les comptes numériques transmis par AVHRR sont transformés en réflectances équivalentes suivant la formule :

$$\rho^* = \frac{\pi \cdot (CN - CN_0)}{E_s \cdot \cos(\theta_s) \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^2} \cdot G$$

où ρ^* est la réflectance au sommet de l'atmosphère, CN est le compte numérique de la luminance, CN_0 est le compte numérique du courant d'obscurité, G est le gain, E_s est l'éclairement extra-terrestre moyen du soleil (Tableau 4.3), θ_s est l'angle zénithal solaire, d est la distance terre-soleil, et d_0 est la distance moyenne entre la terre et le soleil.

Date effective	Rouge	PIR
01/01/1991	1660	1051
01/01/1992	1629	1053

Tableau 4.3: Valeurs des rayonnements solaires extra-terrestres ($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$) dans les deux canaux 1 et 2 d'AVHRR-11.

Teillet and Holben (1993) donnent des relations permettant de calculer le gain et le courant sombre en fonction du nombre de jours après le lancement du satellite, afin de s'affranchir des effets de vieillissement du capteur (Tableau 4.4).

Date effective NOAA-11	Jours après lancement	A (CN)/jour		B (CN)	
		Rouge	PIR	Rouge	PIR
Courant sombre (CN ₀)					
01/01/1991	829	-1.429E-04	-3.062E-04	40.12	40.22
01/01/1992	1194	-2.435E-04	-4.842E-04	40.24	40.43
Gain (G)					
01/01/1991	829	1.300E-06	4.419E-05	1.689	2.397
01/01/1992	1194	2.010E-05	3.288E-05	1.666	2.410

Tableau 4.4: Coefficients des relations linéaires reliant le courant sombre (CN₀) et le gain (G) au nombre de jours après le lancement du satellite (NJ). (CN₀=A*NJ+B; G=NJ*A+B).

4.3 LES DONNEES ATMOSPHERIQUES

Les 2 jeux de données AVHRR correspondant aux saisons 91 et 92 (§ chapitre 3) représentent une quantité importante de données. Les canaux rouge et proche infrarouge occupent à eux seuls 180 Mo. Leurs corrections des effets de l'atmosphère ont nécessité pas moins de 12 heures de temps CPU d'une station SUN LX.

Les entrées du modèle 5S simplifié (Rahman et Dedieu, 1994) sont les contenus en vapeur d'eau et en ozone de l'atmosphère, l'épaisseur optique des aérosols à 550 nm et les conditions géométriques au moment de l'acquisition par le satellite.

Les données atmosphériques sont issues des mesures, de la climatologie et des estimations du Modèle de Circulation Générale (MCG).

4.3.1 L'OZONE : CLIMATOLOGIE

Les valeurs de l'ozone sont issues de mesures effectuées entre l'année 1957 et 1967, et qui ont été recensées par London et al. (1976). Ces valeurs sont des valeurs moyennes annuelles et constantes en longitude par bandes de 10° de latitude.

4.3.2 LES AÉROSOLS : MESURES

Pour l'épaisseur optique des aérosols, une seule valeur a été utilisée pour les deux années et pour toute la zone. Cette valeur est égale à 0.25 (à 550 nm) et correspond à une visibilité de 20 km à l'horizontale (conditions de bonne visibilité). Mais les mesures effectuées pendant la campagne HAPEX avec l'instrument POLDER montrent d'une part que l'épaisseur optique peut être considérée comme stable pendant la journée, et d'autre part qu'elle peut atteindre des valeurs élevées, de l'ordre de 0.8 en milieu de saison des pluies.

La valeur que l'on a choisie pour représenter l'épaisseur optique aura donc tendance à sous-estimer la concentration en aérosols de l'atmosphère. Cependant, l'erreur due à cette sous-estimation sera beaucoup moins forte dans le cas d'une analyse multitemporelle que si on sur-estime les aérosols. En effet, les valeurs faibles de NDVI qui sont dues à l'absorption des aérosols vont être en partie éliminées lors du filtrage par la méthode du Maximum Value Composite (MVC) (Holben, 1986).

4.3.3 LE CONTENU EN VAPEUR D'EAU : RADIOSONDAGES ET MCG

Habituellement, le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère est mesuré par les radiosondages. En région sahélienne, ces mesures sont peu nombreuses. Seules quelques stations météorologiques (Niamey, Bamako et Dakar) très éloignées les unes des autres comportent ce type de mesures en permanence. Il est donc difficile d'avoir une bonne représentativité spatiale sur toute la zone sahélienne du contenu en eau de l'atmosphère. D'autant plus que les problèmes d'inter-étalonnage des appareils de mesures ne sont pas toujours bien résolus. Oort (1983) a pu compiler les données de vapeur d'eau atmosphérique enregistrées entre 1958 et 1973. Mais ces données sont sous forme de valeurs moyennes mensuelles avec une maille de 5° en longitude et 2.5° en latitude. Elles ne peuvent pas représenter les variabilités journalières du contenu en eau dans l'atmosphère, qui peuvent être très importantes pendant la saison des pluies.

Dans le cas de notre zone, seuls les radiosondages de Niamey ont pu être considérés. Ils ont été effectués à Niamey-aéroport (2° 10E, 13° 29N), quotidiennement à 11h, entre le 1er Juin et le 30 Septembre 1991. Certains font défaut à quelques périodes, la plus importante ayant duré 18 jours entre le 05/07 et le 22/07. Ces radiosondages donnent le profil vertical de la vapeur d'eau dans la couche inférieure de l'atmosphère, entre les pressions moyennes 10 hPa et 1000 hPa, où se concentre le maximum de la vapeur d'eau. Ces mesures sont faites à 12 niveaux d'altitude, que l'on intègre par la suite pour avoir des valeurs de contenu en eau moyen dans l'atmosphère.

Une troisième méthode, plus originale celle-ci, consiste à utiliser les sorties du Modèle de Circulation Générale (MCG).

En effet, la disponibilité des calculateurs vectoriels a permis l'élaboration de Modèles de Circulation Générale qui donnent une description tridimensionnelle des phénomènes et qui rendent compte des principales caractéristiques du climat.

Au stade actuel, deux modèles pour les simulations climatiques sont disponibles en France: le modèle de CEPMMT de Reading (R.U) installé aussi au Centre National de Recherches Météorologiques de la Direction de Météo-France (CNRM/DMN), et le modèle du Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS (LMD).

Le modèle du CEPMMT de Reading que l'on va utiliser peut fournir plusieurs types de données, en particulier le profil de vapeur d'eau, la température à 2m et au sol, le vent à 10m. La résolution spatiale du modèle du CEPMMT est de 1° en latitude et longitude, et 4 échéances par jour. Le découpage vertical comporte 14 niveaux (1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50 et 30 hPa) pour l'humidité spécifique. Les niveaux supérieurs ne nous sont pas nécessaires, la quantité de vapeur d'eau contenue dans la stratosphère étant très faible.

Pour améliorer la correction des données AVHRR, l'échéance a été choisie en fonction de l'heure de prise de vue des images, et les données ont été interpolées linéairement pour lisser le champs spatial du contenu en eau.

4.4 ANALYSE DES DONNEES DU MCG ET DES RESULTATS DES CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES

4.4.1 COMPARAISON DES CONTENUS EN VAPEUR D'EAU ATMOSPHERIQUE

Dans une première étape, le contenu en vapeur d'eau obtenu par radiosondage à Niamey a été comparé à celui calculé par le modèle de CEPMMT sur la même zone. On peut constater la cohérence des évolutions temporelles du contenu en eau (Figure 4.6), avec toutefois une légère différence pour les fortes valeurs. On a ensuite comparé les données climatologiques avec les moyennes mensuelles des contenus en eau issus des radiosondages et du modèle (Figure 4.7). On observe une évolution comparable du contenu en eau, avec cependant une différence assez importante pour le mois de Septembre où les radiosondages et le modèle décrivent une décroissance plus rapide que la climatologie. Il faut enfin noter que certains radiosondages font défaut, notamment pendant les mois de Juillet et Octobre.

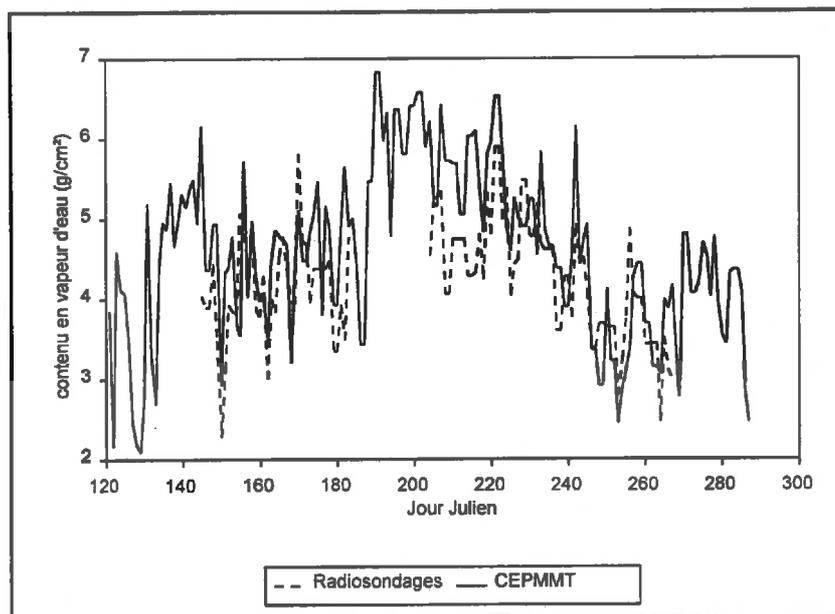


Figure 4.6: Comparaison du contenu en eau mesuré par radiosondage à Niamey et estimé par le modèle du CEPMMT.

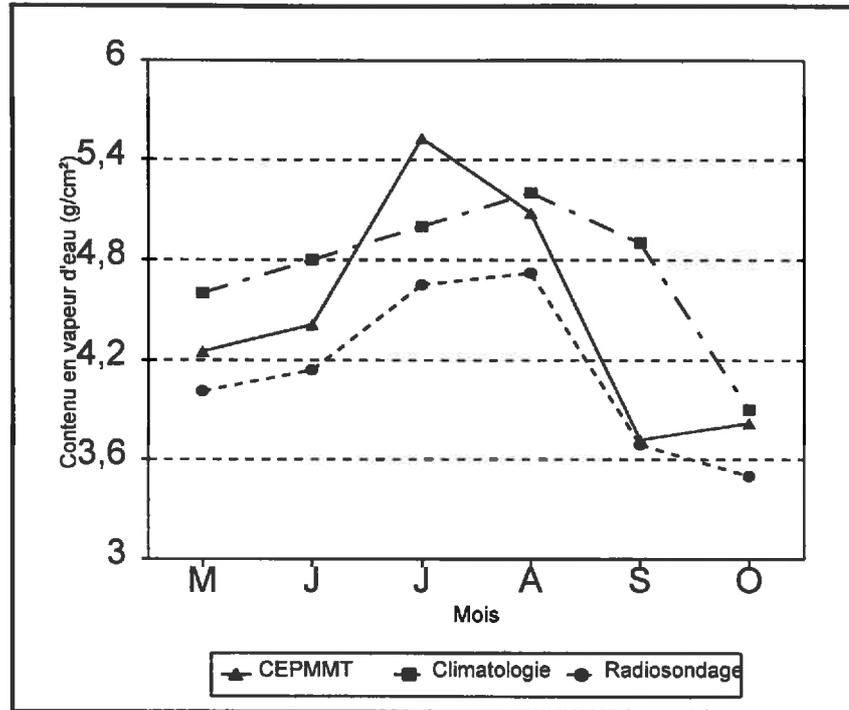


Figure 4.7: Comparaison du contenu en vapeur d'eau mensuel estimé par le modèle du CEPMMT, issu de la climatologie et mesuré par radiosondage.

4.4.2 VARIABILITE SPATIALE DES REFLECTANCES ET DU NDVI

Sur un transect Nord-Sud des contenus en vapeur d'eau dans l'atmosphère, issus du modèle du CEPMMT en début (1er Mai, JJ 121), milieu (3 Juillet, JJ 184), et fin de saison (21 Octobre, JJ 294) (Figure 4.8a), on constate une variation assez importante en fonction de la latitude en début et fin d'hivernage, avec une différence entre le Nord et le Sud de $3\text{g}/\text{cm}^2$. Par contre on observe une variation très faible en milieu de saison de l'ordre de $0.5\text{g}/\text{cm}^2$. Ces variations sont caractéristiques du climat subtropical, très fortement régi par les oscillations de la ZITC (Zone Inter-Tropicale de Convergence). Selon Garnier (1976), la ZITC représente en Afrique Occidentale l'Equateur Météorologique, et sa trace au sol est appelée le FIT (Front Inter-Tropical). L'Equateur Météorologique est par définition la zone limite ou zone de convergence entre les flux de vents alizés issus des hautes pressions subtropicales et originaires d'hémisphères différents. En Afrique de l'ouest, le FIT sépare les masses d'air sèches sahariennes au Nord (harmattan) des masses d'air humides au Sud (mousson).

Pour chaque transect, la transmission "réelle" dans le proche infrarouge est représentée sur la figure 4.8b. La variation relative entre le Nord et le Sud est assez importante en début et fin de saison (8% le 1er Mai, et 6% le 21 Octobre), alors qu'elle est très faible en milieu de saison quand le FIT est bien installé (inférieure à 2%).

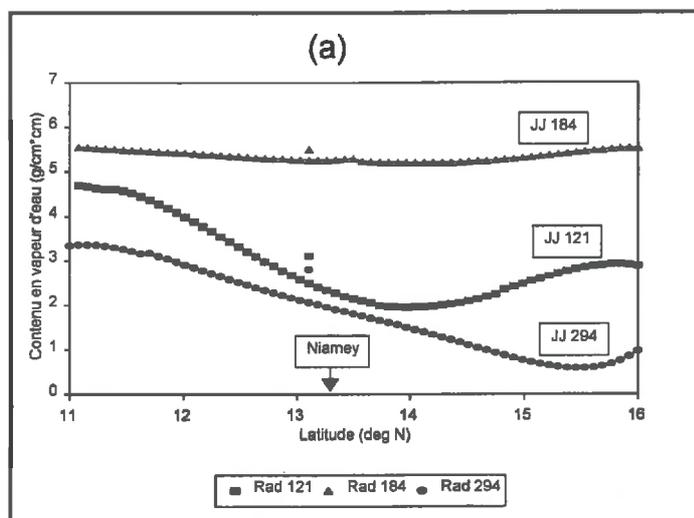


Figure 4.8a): Contenus en vapeur d'eau estimés par le modèle CEPMMT sur un transect nord-sud pour 3 journées, en début de saison des pluies (1er Mai), au milieu (3 Juillet) et en fin de saison (21 Octobre), et les 3 mesures de radiosondage correspondantes.

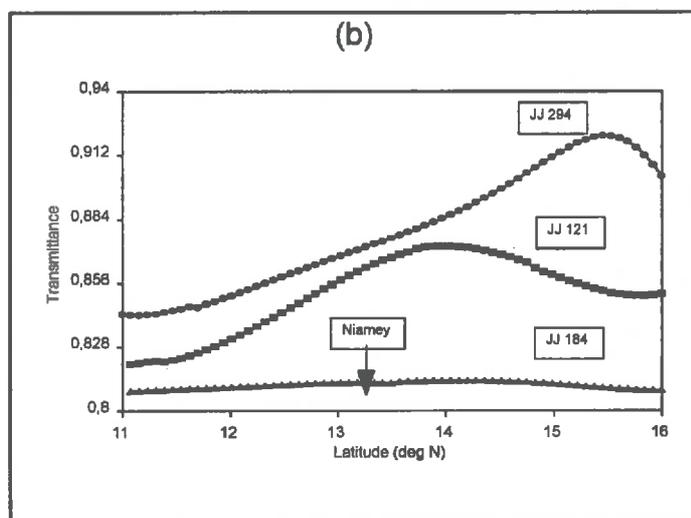


Figure 4.8b): Transmittances dans le canal proche infrarouge sur un transect nord-sud pour 3 journées, en début de saison des pluies (1er Mai), au milieu (3 Juillet) et en fin de saison (21 Octobre), calculées avec les données du CEPMMT.

Pour évaluer l'impact de la spatialisaton de l'eau atmosphérique, on a calculé sur le même transect les réflectances dans le proche infrarouge non corrigées, corrigées avec le radiosondage, et corrigées avec le modèle du CEPMMT, puis les indices NDVI correspondants.

Pour le 1er Mai (JJ 121), les contenus en eau issus du modèle du CEPMMT présentent un assez fort gradient et varient entre 4.7g/cm^2 au Sud et 3g/cm^2 au Nord en passant par un minimum à 2g/cm^2 , alors que le radiosondage de Niamey donne pour cette journée un contenu en eau de 3.1g/cm^2 . Ceci entraîne une surestimation des réflectances PIR au Nord (latitude supérieure à $12^\circ 8$) quand on corrige les images AVHRR avec les radiosondages (Figure 4.9a). L'erreur relative maximale entre les réflectances corrigées avec le radiosondage et celles corrigées avec le modèle est égale à 12%.

L'indice NDVI calculé sur ce transect est présenté sur la figure 4.9b, et on peut constater une bonne similitude des valeurs de l'indice jusqu'à une latitude de $12^\circ 5$. Aux latitudes supérieures, les variations sont sensibles et peuvent atteindre 16% à certains endroits.

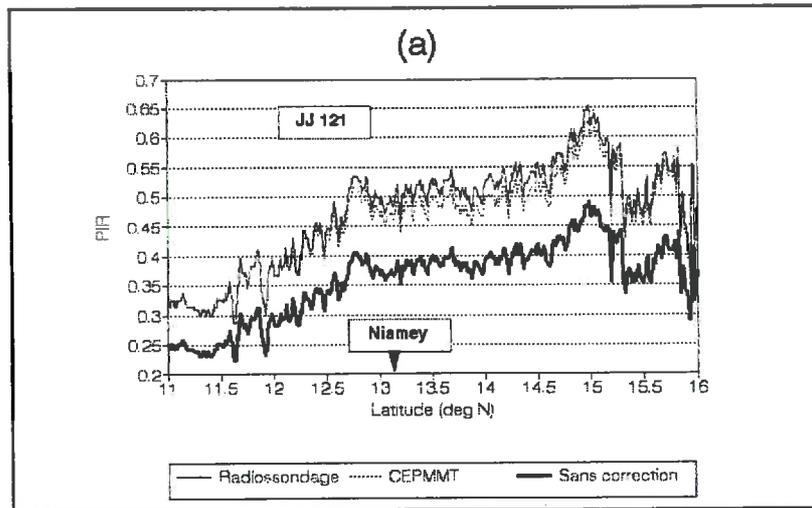


Figure 4.9a): Réponse PIR non corrigée et corrigée des effets de la vapeur d'eau mesurée par radiosondage et estimée avec le modèle du CEPMMT, sur le transect nord-sud en début de saison des pluies (1er Mai).

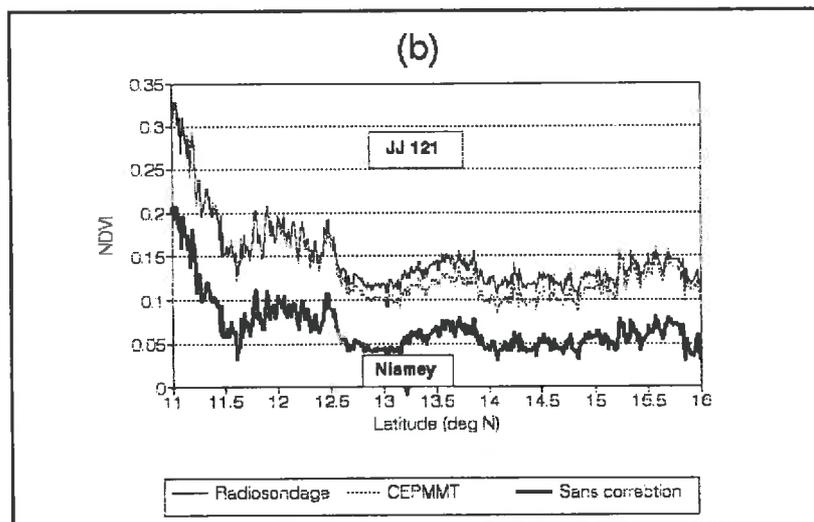


Figure 4.9b): NDVI non corrigé et corrigé des effets de la vapeur d'eau mesurée par radiosondage et estimée avec le modèle du CEPMMT, sur le transect nord-sud en début de saison des pluies (1er Mai).

Le transect du 3 Juillet (JJ 184) calculé à partir du modèle ne présente pas de gradient Nord-Sud et le contenu en eau reste quasiment constant à 5.5 g/cm^2 . Toutefois pour certaines périodes de l'hivernage, on observe des fluctuations de ce contenu tout en restant à des niveaux très élevés (maximum à $6,5 \text{ g/cm}^2$).

Comme on l'a vu ci-dessus, la transmission gazeuse dans le canal PIR sature très vite. Dès que l'on dépasse 3 g/cm^2 , la variation de la transmission n'est que de 5% pour une variation de 3 g/cm^2 d'eau. Sur la figure 4.10a les réflectances corrigées avec le radiosondage et corrigées avec le modèle sont presque identiques, et par voie de conséquence les valeurs de l'indice NDVI sont très voisines (Figure 4.10b).

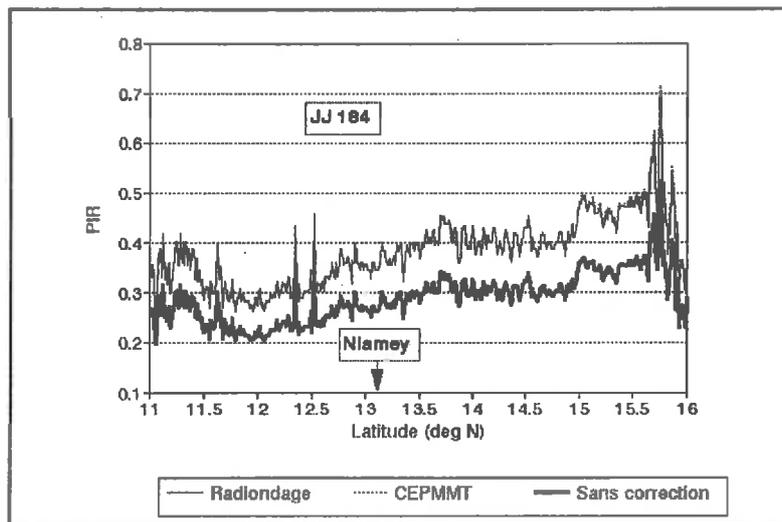


Figure 4.10a): Réponse PIR non corrigée et corrigée des effets de la vapeur d'eau mesurée par radiosondage et estimée avec le modèle du CEPMMT, sur le transect nord-sud en milieu de saison des pluies (3 Juillet).

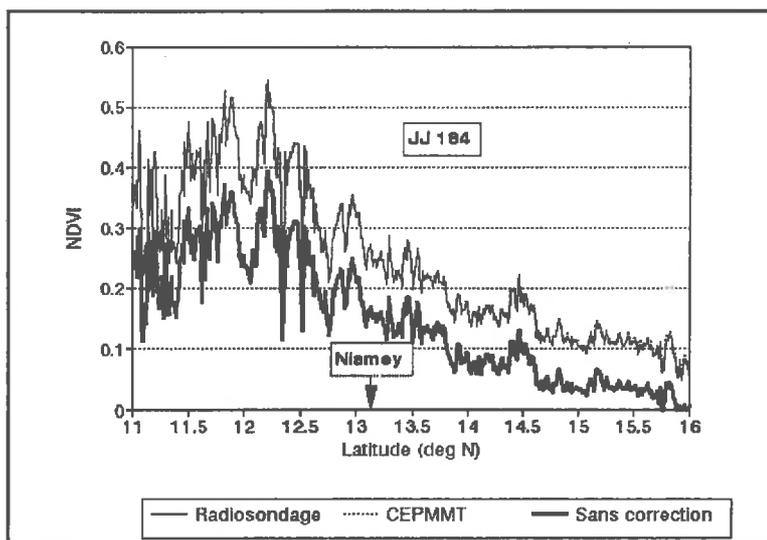


Figure 4.10b): NDVI non corrigé et corrigé des effets de la vapeur d'eau avec les données du radiosondage et estimées avec le modèle du CEPMMT, sur le transect nord-sud en milieu de saison des pluies (3 Juillet).

Sur le transect du 21 Octobre (JJ=294), on observe une distribution du contenu en eau qui ressemble à celle du 1er Mai, traduisant cette fois-ci la descente du FIT vers les basses latitudes, et le début de la saison sèche. Ce contenu en eau varie entre 3.5g/cm^2 au Sud et 0.5g/cm^2 au Nord, alors que le radiosondage de Niamey donne 2.8g/cm^2 . La réflectance PIR est donc encore une fois surévaluée au Nord (latitude supérieure à 13°) pour les données corrigées avec le radiosondage (Figure 4.11a), et l'erreur relative par rapport aux réflectances corrigées avec le modèle atteint 12%. Pour l'indice NDVI calculé sur ce transect, l'erreur relative maximale est plus forte, de l'ordre de 30% (Figure 4.11b).

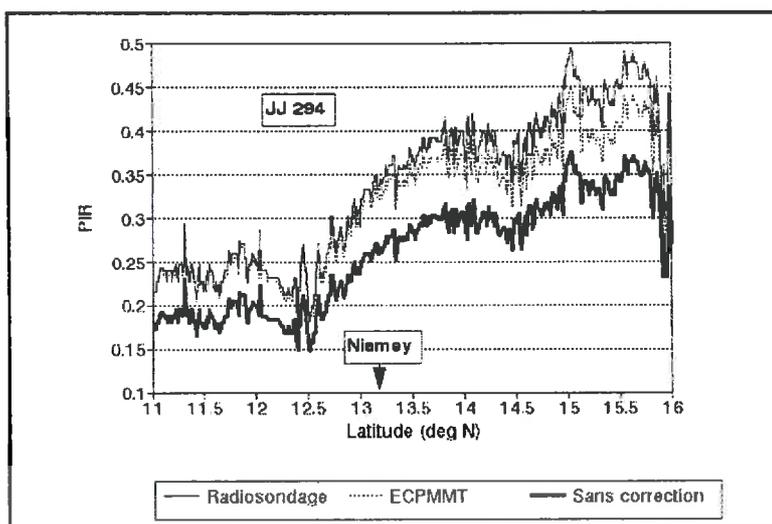


Figure 4.11a): Réponse PIR non corrigée et corrigée des effets de la vapeur d'eau avec les données du radiosondage et estimées avec le modèle du CEPMMT, sur le transect nord-sud en fin de saison des pluies (21 Octobre).

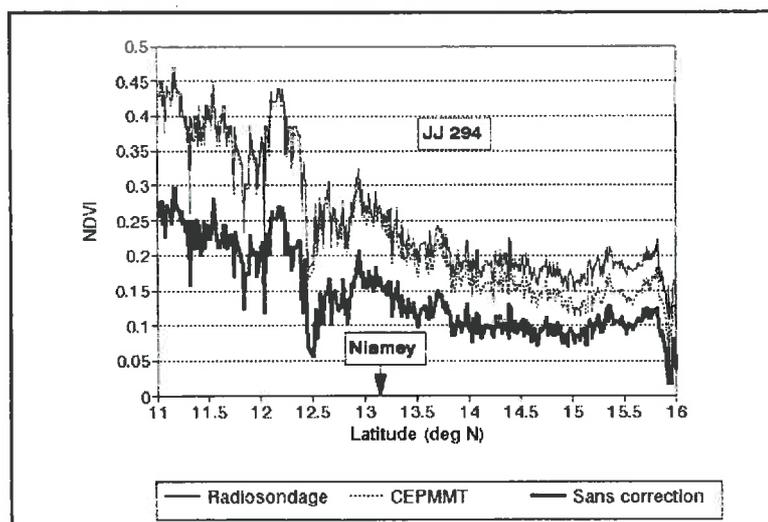


Figure 4.11b): NDVI non corrigé et corrigé des effets de la vapeur d'eau mesurée par radiosondage et estimée avec le modèle du CEPMMT, sur le transect nord-sud en milieu de saison des pluies (21 Octobre).

4.4.3 ANALYSE TEMPORELLE DU NDVI

Dans notre démarche nous ne nous limiterons pas à étudier une seule valeur de NDVI à un stade précis du développement du couvert, mais son évolution temporelle ou profil spectral. Deux sites ont été choisis pour cette analyse. Le premier est situé dans la région de Niamey (13°10 N, 2°10 E), où le couvert végétal est assez bien développé. Le deuxième est situé au Nord de la zone (15°03 N, 3°66 E), centré sur une zone de sols nus, où le climat est plus aride.

Cette analyse a été faite à partir des synthèses décennales du NDVI réalisées avec la méthode MVC, et qui permettent de s'affranchir des couvertures nuageuses, et des problèmes liés aux forts angles de visée et aux aérosols.

La figure 4.12a présente les évolutions temporelles sur le premier site du NDVI non corrigé, corrigé avec le radiosondage, et corrigé avec les données du modèle du CEPMMT. On remarque que les deux types de correction donnent des résultats comparables, en accord avec les données du contenu eau.

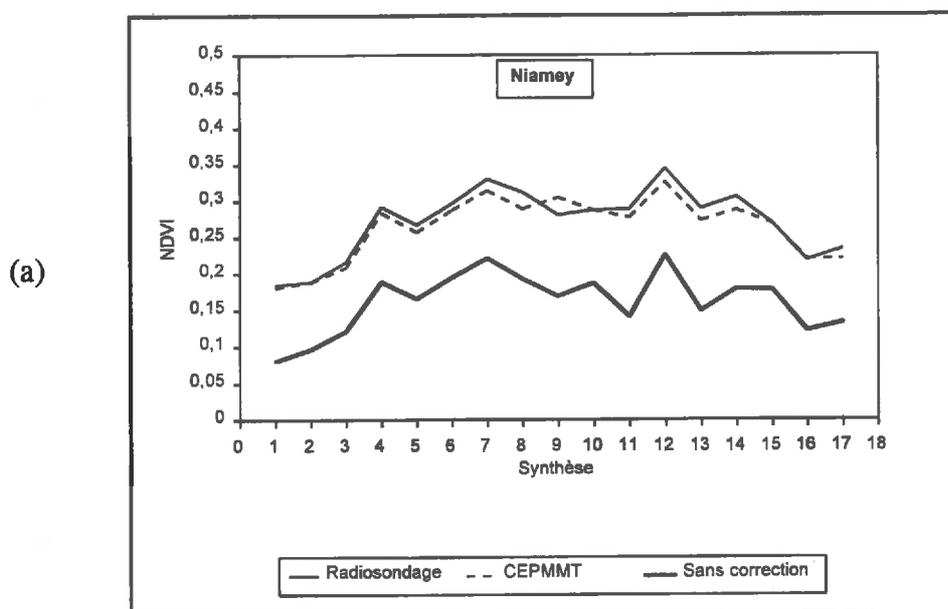


Figure 4.12a): Evolution temporelle du NDVI d'un site proche de Niamey (13°10 N, 2°10 E) à partir de synthèses, en utilisant des réflectances non corrigées, corrigées avec les radiosondages et corrigées avec le modèle du CEPMMT.

La figure 4.12b présente les profils temporels du NDVI mesurés cette fois-ci sur le deuxième site choisi au Nord (sol). Dans ce cas là, on note une différence entre les deux types de correction en début et fin de cycle, et une erreur qui atteint 25 %. Ceci montre encore une fois que le problème de la représentativité spatiale des radiosondages se pose lorsqu'on s'éloigne de Niamey.

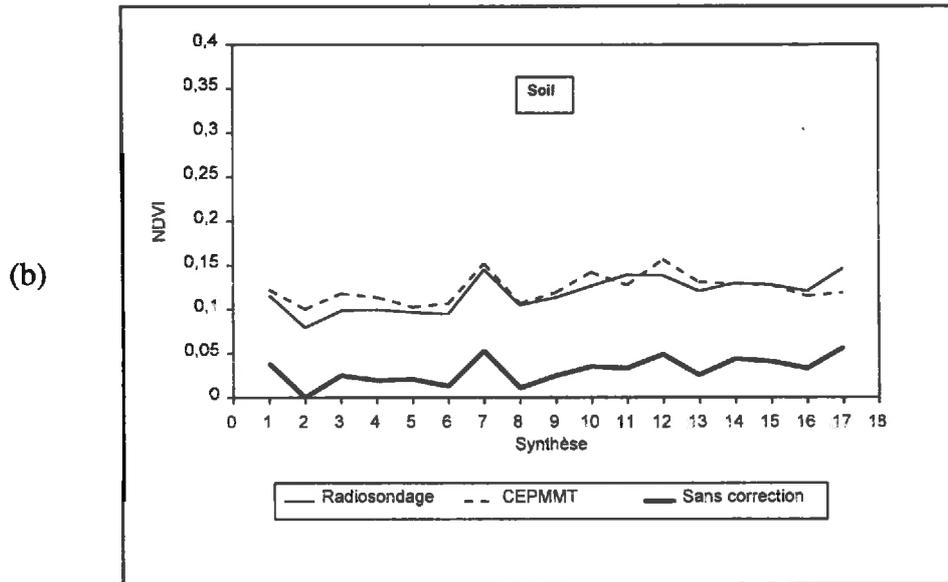


Figure 4.12b): Evolution temporelle du NDVI d'un site localisé au nord (sol quasiment nu) ($15^{\circ}03$ N, $3^{\circ}66$ E) à partir des synthèses, en utilisant des réflectances non corrigées, corrigées avec les radiosondages et corrigées avec le modèle du CEPMMT.

4.5 CONCLUSION

Les effets de l'atmosphère se traduisent au niveau du signal mesuré en télédétection par des perturbations plus ou moins importantes en fonction de la longueur d'onde.

Actuellement, on dispose de moyens méthodologiques et technologiques pour corriger le signal mesuré par le satellite NOAA. Le modèle 5S simplifié (Rahman et Dedieu, 1992) possède des qualités suffisantes pour rendre ces corrections précises et opérationnelles.

Le modèle 5S simplifié nécessite comme entrée le contenu des principales composantes de l'atmosphère qui affectent le signal AVHRR, comme l'ozone, les aérosols et la vapeur d'eau.

L'ozone peut être déduit de la climatologie, sa variabilité spatiale et temporelle affectant peu le signal.

Très peu de mesures d'épaisseur optique des aérosols sont réalisées au Sahel. Celles effectuées pendant l'expérimentation HAPEX-Sahel en 1992 ont montré une forte variabilité de l'épaisseur optique pendant la saison des pluies.

En attendant les données d'épaisseur optique du réseau Photon en cours d'installation, le seul moyen disponible pour filtrer leurs effets sur le signal AVHRR est d'utiliser une épaisseur optique minimale dans le modèle de correction, et d'utiliser ensuite la méthode MVC pour la synthèse d'images.

Enfin, la vapeur d'eau est traditionnellement mesurée par les radiosondages. Cette méthode est efficace dans les régions tempérées où le réseau de stations de mesures est assez dense, et la variabilité spatiale et temporelle n'est pas très forte.

Au Sahel, seulement 3 radiosondages sont effectués régulièrement pour couvrir une zone où règne un fort gradient nord-sud de la vapeur d'eau, lié au mouvement du FIT.

Dans le cas de notre zone (275.000 km²), seul le radiosondage de Niamey est disponible pour couvrir un large gradient nord-sud, et dont l'heure de mesure est parfois très différente de l'heure d'acquisition des images AVHRR.

Pour améliorer la correction des effets de la vapeur d'eau, nous avons utilisé une méthode originale pour mieux spatialiser le contenu en eau de l'atmosphère, basée sur les données du Modèle de Circulation Générale du CEPMMT, qui a une résolution de 1° en longitude et latitude, et une résolution temporelle de 6h.

Les profils temporels du contenu en eau mesuré par radiosondage et estimée par le modèle sur Niamey montrent une similitude satisfaisante, et justifient donc l'utilisation des données du modèle pour spatialiser le contenu en eau.

L'analyse spatiale du contenu en eau estimé par le modèle montre que le gradient nord-sud est bien décrit par le modèle. Ces données montrent que l'erreur qu'on risque de commettre si on n'utilise que le radiosondage de Niamey peut atteindre 12 % sur les réflectances et 30 % sur le NDVI.

CHAPITRE 5:

EXTRACTION DE LA REFLECTANCE PURE DES UNITES DE PAYSAGE COMPOSANT LE PIXEL NOAA-AVHRR

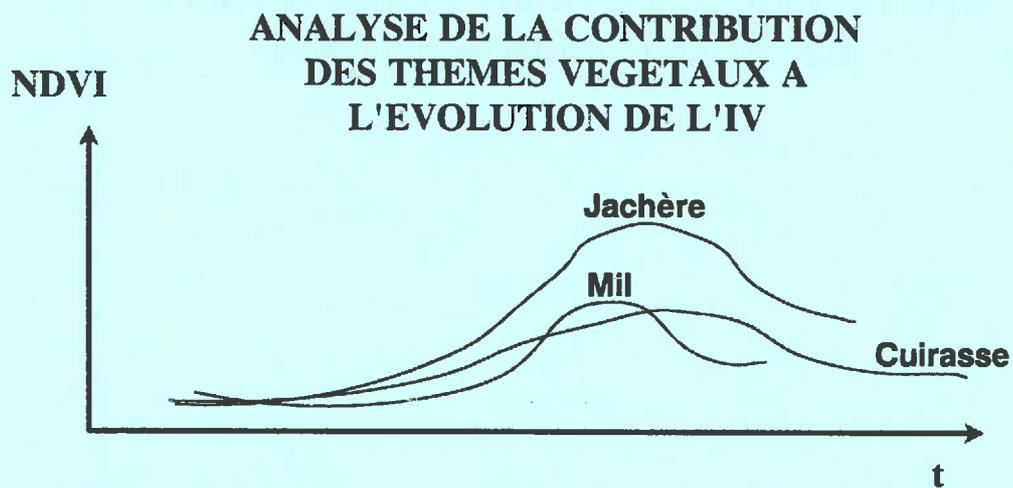
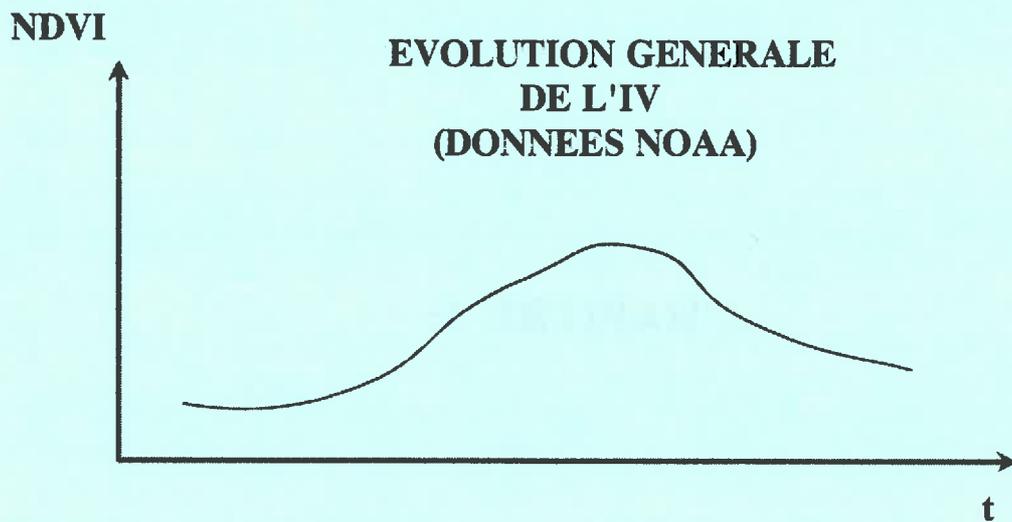


Figure 5.1: Signification de l'indice de végétation à faible résolution (AVHRR).

CHAPITRE 5:

EXTRACTION DE LA REPONSE SPECTRALE PURE DES UNITES DE PAYSAGE COMPOSANT LE PIXEL NOAA-AVHRR

L'indice NDVI a pu être corrélé à plusieurs variables caractéristiques du couvert végétal, notamment le RPA (Goward, 1989; Prince and Justice, 1991; Begue, 1991). Or les relations basées sur le NDVI dérivé des données AVHRR présentent une grande dispersion, du fait entre autres que la réponse spectrale mesurée par ce capteur est en réalité une combinaison de plusieurs réponses correspondant aux différentes unités de paysage composant le pixel NOAA-AVHRR (Figure 5.1).

Plusieurs auteurs ont développé des méthodes pour éliminer les perturbations dues à l'hétérogénéité de surface dans le signal AVHRR.

Parmi les quelques études qui se rapportent à ce problème, on peut citer celle menée en Algérie par Guérif et al. (1993), qui consiste à repérer grâce à des images SPOT les pixels présentant une dominance de culture de blé, afin d'établir des estimations de rendement en fin de saison.

Plus récemment, Vignolles et al. (1993) ont mené des travaux sur l'extraction de la signature spectrale propre à huit cultures dans la région de Montauban et Orthez, sur la base de classifications d'images SPOT décrivant l'occupation du sol, et en dégradant la résolution à 1.1 km par une simple moyenne pour simuler le signal NOAA-AVHRR. Cette méthode, basée sur une régression linéaire multiple, s'est avérée efficace tant que le problème de superposition ne se pose pas. Elle a montré que l'incertitude devient très importante dès que l'erreur sur la localisation atteint 120 m (communication personnelle, 1993).

De son côté Fisher (1994) utilise des données SPOT pour suivre la croissance des cultures d'hiver (blé) et des cultures d'été (maïs) d'un site choisi dans la Beauce, en complément aux données NOAA-AVHRR. L'approche suivie est différente des deux précédentes, car d'une part elle fait appel à des modèles de fonctionnement de chaque culture, et d'autre part l'information recherchée n'est plus une réflectance, mais un indice de végétation (NDVI). La méthode utilisée est une simple déconvolution du signal AVHRR en ajustant une somme de deux fonctions doubles logistiques (blé, maïs) à 10 paramètres. Cette méthode donne de bons résultats, mais elle présente un handicap d'ordre méthodologique, car elle ne s'applique qu'à des cycles de culture bien différenciés dans le temps.

L'étude que nous avons menée vise à extraire des réflectances pures de chaque unité de paysage, en combinant des données à haute résolution fournies par le satellite SPOT-HRV, et une série d'images NOAA-AVHRR centrées sur Niamey, couvrant la saison des pluies 1992 (Mai à Octobre).

Caractéristiques dominantes	Classe*	Densité de végétation	Utilisation dominante	Superficie (en ha)
Bordure de cuirasse	C	Nulle à faible	Sylvo-pastorale	1617
Plateau	C	Nulle	Nulle	5459
Plateau	C	Nulle	Nulle	9232
Sable diffus sur plateau	C	Nulle à faible	Agro-sylvo-pastoral	9028
Azonal	M	-	Agricole, urbain	12820
Dépôts sableux éoliens	J	Moyenne à dense	Jachère (agro-pastorale)	6330
Azonal	J	Dense	Sylvicole, rizière	7037
Dépôts sableux éoliens	0.5M+0.5J	Moyenne à nulle	Agro-pastorale	18542
Dépôts sableux éoliens	M	Nulle à faible	Agricole	15592
Fonds de vallées, plaines sableuses	0.5M+0.5J	Moyenne à nulle	Agro-pastorale	23500
Azonal	0.5M+0.5J	Faible à moyenne	Agro-pastorale	8860
Eau libre	-	-	-	610

* : M pour le mil, J pour la jachère et C pour la cuirasse.

Tableau 5.1: Les 12 états de surface de la classification SPOT du degré carré HAPEX (D'herbes et al., 1992).

Une mosaïque de 6 images SPOT réalisée dans le cadre du projet HAPEX-SAHEL a été utilisée. Elle couvre une zone d'un degré carré (13°N-14°N, 2°E-3°E) centrée sur le site de Hamdallaye, et a été ensuite classée pour cartographier les états de surface (D'Herbes et al., 1992). Cette classification fournit des informations sur la structure du paysage, et permet de connaître la proportion de chaque unité de paysage dans le pixel AVHRR.

La méthode adoptée pour déconvoluer le signal AVHRR est basée sur un modèle linéaire de mélange. On s'attachera au cours de cette étude à analyser la sensibilité de cette méthode, d'une part à partir de simulations des réflectances AVHRR, et d'autre part à partir de données AVHRR réelles. Nous analyserons en particulier les profils temporels de réflectances et d'indices obtenus.

5.1 LES DONNEES

5.1.1 LA CARTE DES UNITES DE PAYSAGES

Ces données ont été acquises dans le cadre du Projet HAPEX-SAHEL. Ce sont six images SPOT acquises en Octobre 1988 et corrigées géométriquement qui ont été utilisées pour former une mosaïque de 1°x1°. Cette mosaïque a ensuite été classée avec la méthode du maximum de vraisemblance pour cartographier l'occupation du sol, puis elle a été validée par des enquêtes de terrain. Cette carte comporte 12 classes (Tableau 5.1), représentant les différentes unités de paysage de la zone qui vont du plateau de cuirasses dépourvu de toute végétation, à la plaine sableuse favorable aux cultures de mil.

Après avoir analysé cette carte, il nous a semblé préférable de la simplifier, en fusionnant certaines classes qui ont des caractéristiques voisines. Trois grandes classes ont été définies:

* La "cuirasse" : cette classe regroupe les sols formés par des bordures cuirassées, des plateaux, ou des sables diffus sur des plateaux, avec une densité de végétation nulle à faible. Cette classe occupe 21 % du degré carré.

* La "jachère" : cette classe se situe sur des dépôts sableux éoliens, des fonds de vallée et des plaines sableuses, avec une végétation nulle à dense. Elle regroupe les classes de la jachère, la moitié du domaine agro-pastoral, et le domaine sylvicole. Cette classe occupe 27 % du degré carré.

* Le "mil" : cette classe regroupe les surfaces cultivées, présentes essentiellement sur des dépôts sableux éoliens, et la moitié du domaine agro-pastoral. Elle occupe 52 % du degré carré.

La carte résultante est représentée par la figure 5.2.

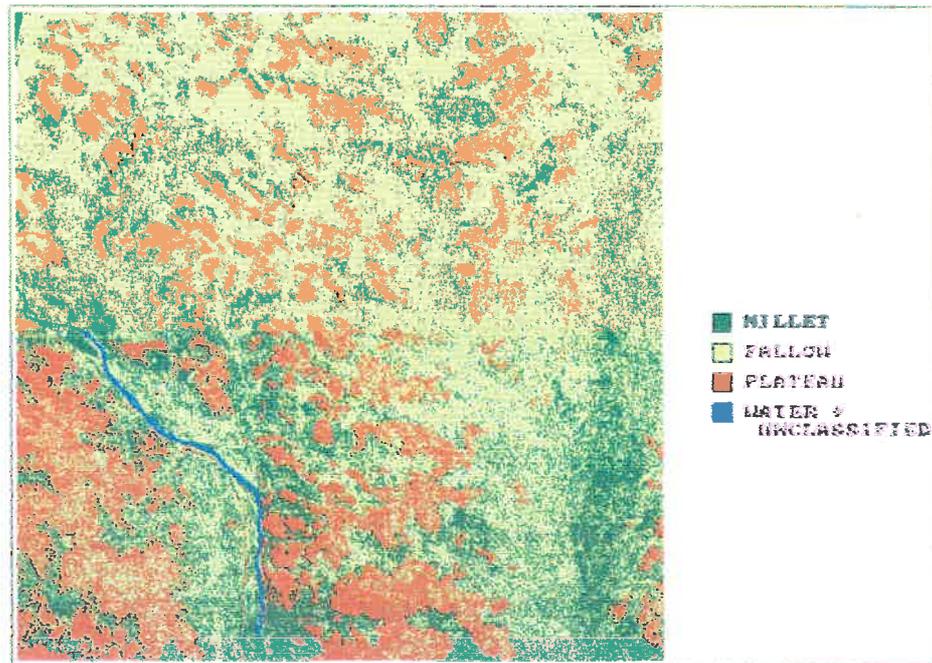


Figure 5.2: Carte des états de surface du degré carré HAPEX réalisée à partir de celle de D'Herbes et al. (1992).

5.1.2 LES MESURES RADIOMÉTRIQUES

Durant la campagne de mesure de 1992, les mesures de réflectance dans le visible et le proche infrarouge ont été obtenues à partir d'un avion sur des transects passant au dessus de trois sites (Hanan et al., 1992). Les trois sites ont été identifiés à l'intérieur du degré carré HAPEX-Sahel, et ont une dimension de 20 km x 20 km environ. Les deux sites localisés au centre du degré carré sont formés par des plateaux cuirassés de faibles dimensions séparés par des zones agro-pastorales, alors que le site du sud est composé par de larges plateaux cuirassés orientés nord-sud.

Les luminances ont été mesurées dans les mêmes bandes que l'instrument Thematic Mapper (TM3: 630-690 nm et TM4: 760-900 nm) avec un radiomètre Exotech 100AX, et avec une résolution au sol de 52.7 m. Les mesures ont été effectuées généralement vers 10h du matin.

Les rayonnements visible et proche infrarouge incidents ont été mesurés à la surface avec un autre radiomètre Exotech. Ces mesures ont permis de calculer les réflectances de la surface le long des transects.

Pour la suite de cette étude, deux sites ont été retenus. Le premier est à l'intérieur du site central-ouest (13°30' N - 2°28' E), l'autre est à l'intérieur du site du sud (13°11' N - 2°19' E). Ces sites vont être référencés dans la suite du chapitre par SC (site Central) et SS (site Sud) respectivement.

5.1.3 LES IMAGES NOAA-AVHRR

Les perturbations dues à la vapeur d'eau, l'ozone, et les aérosols qui caractérisent les canaux rouge et proche infrarouge du capteur AVHRR ont été corrigées par le modèle 5S simplifié (Rahman et Dedieu, 1994), mais il reste les problèmes d'ennuage qui qu'on évite souvent en ayant recours à des synthèses d'images. Cette méthode nécessite, pour garder la forme exacte des unités de paysages, une très bonne superposition des images considérées, ce qui n'est pas le cas pour les images HRPT de Niamey utilisées. En effet, le décalage géométrique entre les images est au moins d'un pixel.

La méthode de synthèse d'images a donc été rejetée, mais on a pu extraire 16 images du jeu de données AVHRR de la saison 1992 qui présentent la zone du degré carré totalement dégagée de couverture nuageuse. Ces images couvrent deux périodes du cycle végétal: la première est représentée par les jours juliens 139, 163, 173, 174, 183, 190, et la deuxième par les jours juliens 232, 239, 247, 262, 266, 271, 272, 287, 295, 299. Une longue période de 40 jours située en pleine phase de montaison du mil (mi-juillet à fin août) n'a pu être prise en compte, faute d'images dégagées.

5.1.4 SUPERPOSITION DES IMAGES NOAA AVEC LA CARTE

Les images fournies par les deux capteurs AVHRR et HRV ont été corrigées suivant une même projection plate carré. Pour superposer les images acquises avec ces deux capteurs, l'image SPOT a été dégradée à 1.1 km par une simple moyenne (Justice et al., 1989; Woodcok, 1987).

La superposition des images AVHRR avec la carte d'occupation du sol nécessite deux étapes. La première a été d'effectuer une autocorrélation entre les images NOAA et la carte dégradée. La localisation obtenue n'est pas parfaite, car après analyse visuelle on a pu remarquer l'existence de décalages assez importants à certains endroits. On a donc réalisé un deuxième traitement pour remédier à cela en prenant des points d'amer sur le fleuve Niger et sur les bordures de cuirasse, et en appliquant un polynôme de déformation. De cette manière, la superposition s'est avérée satisfaisante.

5.2 METHODOLOGIE D'EXTRACTION

5.2.1 LE MODELE LINEAIRE DE MELANGE

L'hypothèse principale sur laquelle est basée le modèle linéaire de mélange est que les réflexions multiples entre les différents types de couverts est négligeable. Ainsi le signal mesuré par le capteur peut être considéré comme une simple somme des signaux réfléchis par chaque unité paysage.

Sous cette condition, et pour une bande spectrale donnée, la réflectance R d'une surface composée de N types de couverts s'écrit

$$R = \sum_{i=1}^N P_i \cdot \rho_i$$

Où P_i et ρ_i sont respectivement la proportion et la réflectance du couvert i .

L'hypothèse de la linéarité de la réflectance est parfaitement justifiée à l'échelle des paysages sahéliens. En effet la dimensions de ceux-ci est assez grande pour qu'ils n'interagissent que très peu.

5.2.2 LE SYSTEME D'EQUATIONS

Notre modèle est basé sur la résolution de systèmes de trois équations, utilisant la proportion d'occupation du sol des thèmes mil, jachère, et cuirasse retenus:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \Psi_{m1} \cdot \rho_m + \Psi_{j1} \cdot \rho_j + \Psi_{c1} \cdot \rho_c \\ \rho_2 &= \Psi_{m2} \cdot \rho_m + \Psi_{j2} \cdot \rho_j + \Psi_{c2} \cdot \rho_c \\ \rho_3 &= \Psi_{m3} \cdot \rho_m + \Psi_{j3} \cdot \rho_j + \Psi_{c3} \cdot \rho_c \end{aligned}$$

où ρ_1 , ρ_2 , et ρ_3 représentent les réflectances des pixels 1, 2 et 3 d'AVHRR; ρ_m , ρ_j , et ρ_c , sont respectivement les réflectances mil, jachère, et cuirasse à estimer, alors que Ψ_m , Ψ_j et Ψ_c , représentent respectivement la proportion de mil, jachère et cuirasse à l'intérieur des pixels AVHRR.

5.2.3 RESOLUTION DES SYSTEMES D'EQUATIONS

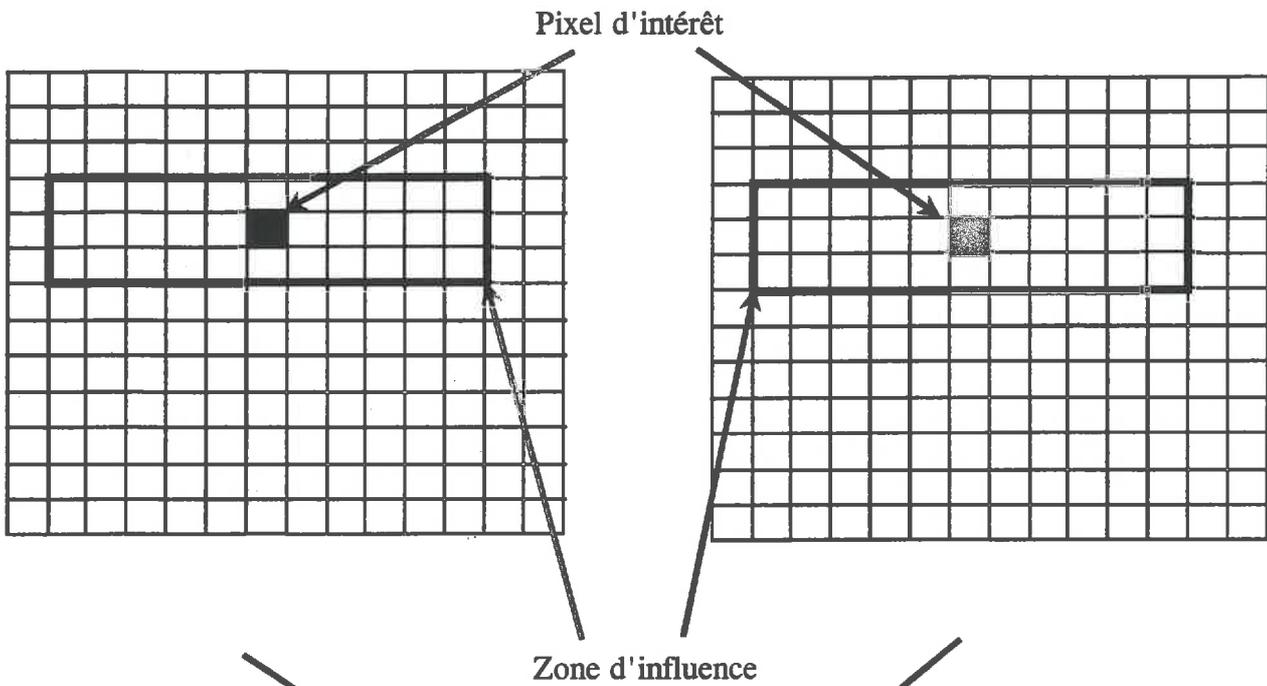
La qualité de la superposition entre les différents plans d'information (image classée et images AVHRR) constitue une source de variation dans la précision et la stabilité de l'inversion. Pour diminuer l'erreur due à la localisation, on a diminué la résolution des images et de la carte, en travaillant avec des blocs de pixels, c'est à dire le nombre de pixels que l'on regroupe et qui constitue l'unité statistique élémentaire. La réflectance du bloc sera la moyenne des réflectances qui forment ce bloc. Le choix de la taille des blocs est un élément primordial dans la méthodologie. Il sera analysé plus tard.

La position des 3 blocs de pixel NOAA a été choisie en fonction du gradient de l'image. En effet les réflectances des images NOAA montrent un gradient nord-sud, conséquence directe du gradient pluviométrique. La résolution des systèmes a ainsi été faite dans le sens est-ouest, pour avoir des réflectances de chaque unité de paysage les plus homogènes possibles. La juxtaposition des 3 blocs de pixels côte à côte sera appelée par la suite "fenêtre".

La résolution s'effectue par fenêtre glissante (Figure 5.3). Le système est dans un premier temps résolu en positionnant la fenêtre en haut et à gauche de l'image. Ensuite la fenêtre est décalée d'un pixel AVHRR vers la droite, et le nouveau système est résolu. Cette procédure

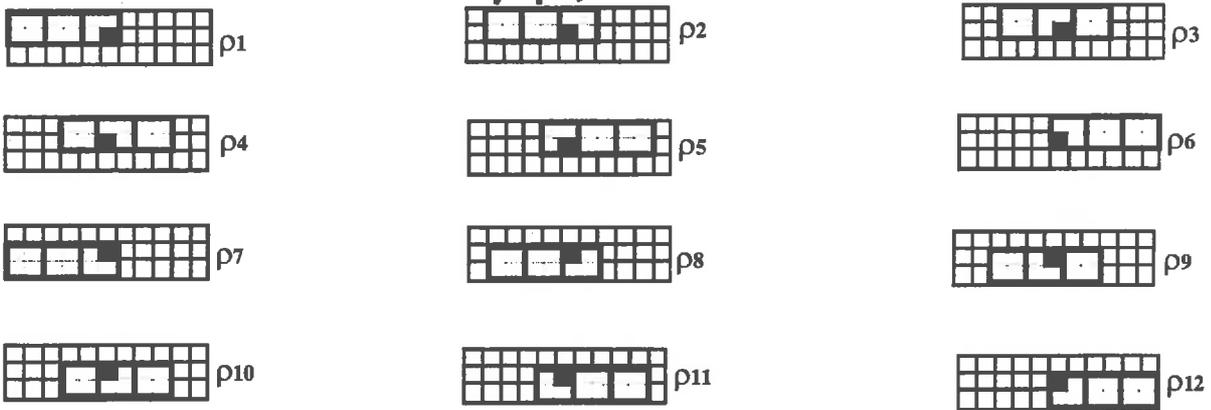
Image NOAA:
Canaux 1 ou 2

Classification SPOT dégradée
à la résolution NOAA



Les 12 systèmes d'équations de la zone d'influence

Les 3 blocs de taille 2 qui composent la fenêtre glissante



Pour une unité de paysage et pour le pixel d'intérêt :

Réflectance moyenne: $\rho = 1/12 \sum_{i=1}^{i=12} \rho_i$

Variance : $\text{Var} = 1/12 \sum_{i=1}^{i=12} (\rho_i - \rho)^2$

Figure 5.3: Scénario de la résolution des systèmes d'équations pour une taille de bloc égale à 2.

est répétée jusqu'au bord droit de l'image. La fenêtre est ensuite décalée d'une ligne vers le bas à partir du coin supérieur gauche de l'image, et on résoud les nouveaux systèmes en se décalant à chaque fois d'une colonne vers la droite. La fenêtre est déplacée de cette manière jusqu'à ce qu'elle explore la totalité de l'image.

Chaque pixel AVHRR participe à plusieurs systèmes à la fois. La réflectance d'une unité de paysage sur un pixel est alors la moyenne de toutes les solutions auxquelles ce même pixel a contribué. Cette méthode permet de minimiser les incertitudes dues à la localisation.

Le nombre de systèmes N auxquels participe un même pixel varie suivant la taille des blocs b (figure 5.4) :

$$N = b \cdot b \cdot 3$$

La zone balayée par la fenêtre après les N systèmes auxquels participe un même pixel est appelée "zone d'influence". Sa dimension dans les deux directions est-ouest (D_x , en pixels) et nord-sud (D_y , en pixels) varie aussi en fonction de la taille du bloc (figure 5.4):

$$D_x = 6 \cdot b - 1$$

$$D_y = 2 \cdot b - 1$$

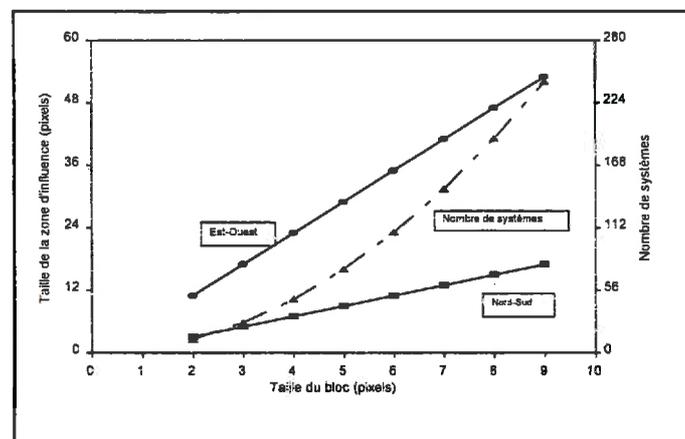


Figure 5.4: Dimension de la zone d'influence et nombre de systèmes d'équations en fonction de la taille des blocs (en pixels).

La figure 5.3 illustre cette technique de calcul pour des tailles de blocs de 2 pixels. Les nouveaux pixels élémentaires ou pseudo pixels ont maintenant une résolution de 2.2 Km (4.84 km²). L'imagerie représente la zone d'influence ($D_x = 11$, $D_y = 3$), et la position de la fenêtre du système d'équations, suivant 12 configurations différentes ($N = 12$). Les réflectances pures étant une moyenne des 12 solutions pour chacune des 3 unités de paysage. Cette technique permet de calculer aussi un coefficient de variation de ces réflectances. En itérant sur les pixels suivants, cela nous permettra d'avoir une image en réflectances de chacune des unités de paysage.

5.3 ETUDE DE SENSIBILITE AVEC DES DONNEES SIMULEES

Une image de réflectances AVHRR simulée va nous permettre d'étudier la sensibilité du modèle linéaire de mélange au décalage spatial et à la taille des blocs.

5.3.1 SIMULATION DES DONNEES AVHRR

Les données AVHRR sont simulées en utilisant la carte des états de surface (Ψ_i , i=mil, jachère, cuirasse), et les mesures aéroportées de réflectance sur le mil, la jachère, et la cuirasse, au-dessus du site central du degré carré HAPEX. Les mesures de réflectance réalisées par avion dans le proche infrarouge en milieu de saison des pluies (Hanan et al., 1992) sont proches de 0.5 pour le mil, 0.4 pour la jachère et 0.3 pour la cuirasse.

Les réflectances ρ_1 , ρ_2 et ρ_3 s'écrivent:

$$\rho_1 = \Psi_{m1} \cdot 0.5 + \Psi_{j1} \cdot 0.4 + \Psi_{c1} \cdot 0.3$$

$$\rho_2 = \Psi_{m2} \cdot 0.5 + \Psi_{j2} \cdot 0.4 + \Psi_{c2} \cdot 0.3$$

$$\rho_3 = \Psi_{m3} \cdot 0.5 + \Psi_{j3} \cdot 0.4 + \Psi_{c3} \cdot 0.3$$

Cette hypothèse de réflectance constante par thème sur toute la zone n'est pas réaliste, mais elle permettra de tester la sensibilité du modèle à la taille des blocs et à la qualité de la superposition entre image et carte.

Pour illustrer l'effet de la taille des blocs sur la structure du paysage, l'image AVHRR simulée et la carte d'occupation du sol ont été dégradées à plusieurs résolutions spatiales (égales à la taille du bloc x 1.1 km). La dégradation spatiale de la carte d'occupation du sol nous a permis de générer trois nouvelles cartes, qui correspondent aux proportions du mil, de la jachère et de la cuirasse à l'intérieur de chaque bloc de l'image. La figure 5.5 présente l'exemple de la carte des proportions du mil pour différentes tailles de bloc. Sur cette figure, les limites de la zone d'influence sont représentées par une ligne blanche.

Les erreurs de localisation ont été simulées pour 1, 2 et 3 pixels de décalage entre la carte et l'image NOAA, et pour des tailles de bloc allant de 2 à 9 pixels.

Les critères choisis pour tester l'inversibilité seront le nombre de solutions acceptées, et l'écart relatif entre la réflectance calculée et la réflectance réelle pour chaque thème.

5.3.2 NOMBRE DE SOLUTIONS ACCEPTEES

Comme on l'a déjà mentionné, la résolution des N systèmes d'équations nous fournit N ensembles de 3 réflectances, qui correspondent aux 3 unités de paysage. En réalité, seules les solutions comprises entre 0 et 1 sont moyennées pour le calcul de la réflectance pure du mil, de la jachère et de la cuirasse. En effet, dans certains cas, les systèmes d'équations n'ont pas de solution, ou engendrent des solutions aberrantes (inférieures à 0 ou supérieures à 1). Ces situations sont rencontrées quand on est en présence de deux ou trois équations très proches, ou quand les proportions des unités de paysage sont fausses.

Dans le cas d'un paysage naturel qui ne présente pas de structures géométriques, c'est plutôt l'erreur sur les proportions des unités de paysage qui est en cause. Ceci est illustré par la figure 5.6 où le pourcentage de solutions acceptées est de 100 % quand il n'y a pas de décalage entre la carte et l'image AVHRR simulée (Dec=0 pixel).

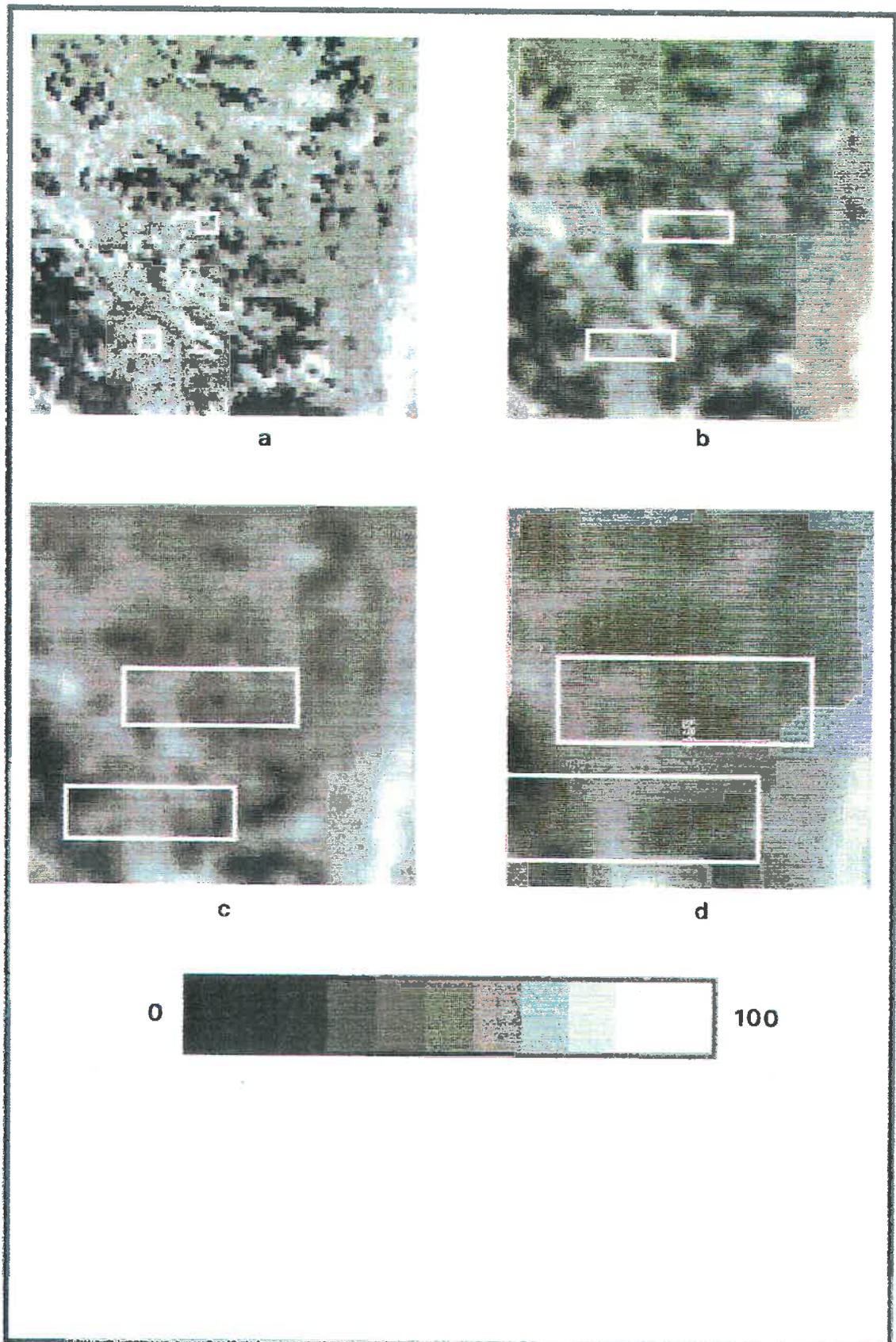


Figure 5.5: Proportions du mil (%) sur le degré carré pour 4 tailles de bloc: (a) $b=1$, (b) $b=3$, (c) $b=6$ et (d) $b=9$ pixels. La limite de la zone d'influence des deux sites SC et SS est délimitée par une ligne blanche.

Les modifications du plan d'occupation du sol expliquent facilement la baisse du pourcentage de solutions acceptées avec le décalage spatial et son augmentation avec la taille des blocs (Figure 5.6). En effet, le décalage spatial a un effet plus faible sur les proportions des unités de paysage d'un bloc de grande taille que sur celles d'un bloc de petite taille. Pour les tailles de bloc inférieures à 4 pixels, le nombre de solutions acceptées est inférieur à 9. Ces tailles ne seront pas considérées dans la suite des discussions.

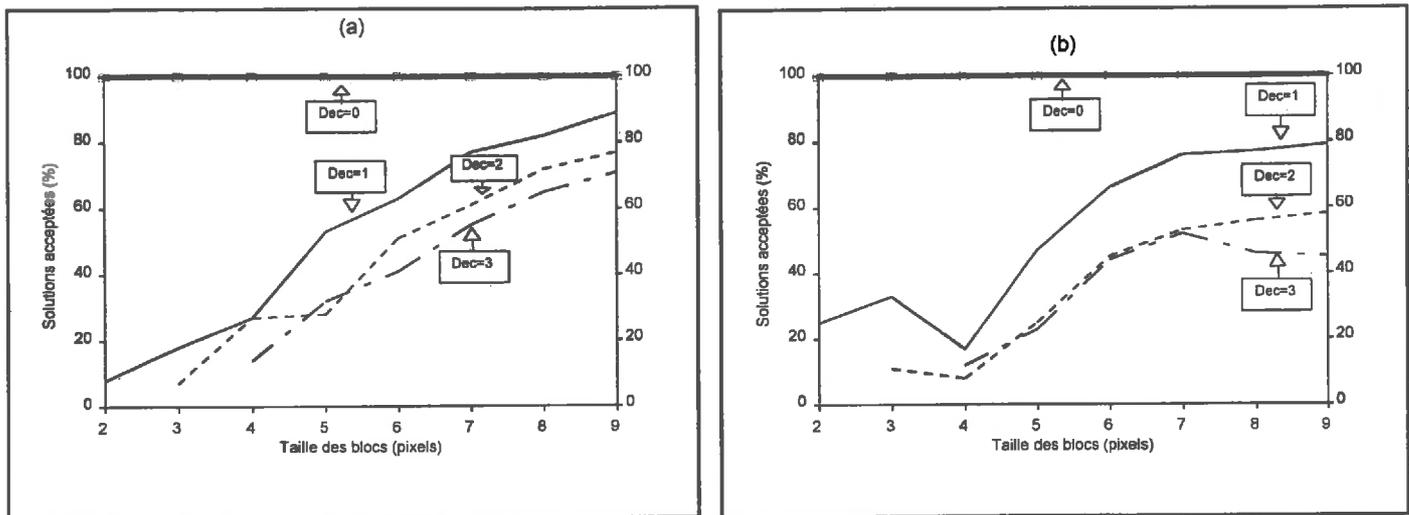


Figure 5.6: Proportion des solutions acceptées en fonction de la taille des blocs (2 à 9 pixels) et du décalage spatial (Dec=0,1,2,3 pixel), pour les deux sites a) SC et b) SS.

Les résolutions effectuées sur le site SC montrent un pourcentage de solutions acceptées qui augmente continuellement avec la taille des blocs jusqu'à 90 % pour un décalage de un pixel, et à plus de 70 % pour un décalage de 2 et 3 pixels, alors que pour le site SS, ce pourcentage augmente jusqu'à une taille de bloc égale à 7, et reste ensuite quasiment constant aux alentours de 80 % pour un décalage de 1 pixel, et inférieur à 60 % pour un décalage plus important.

Cette différence entre les sites SC et SS est essentiellement due à la structure du paysage à l'intérieur de la zone d'influence de chacun des deux sites (Figure 5.7). Le site SC présente des structures de paysage de faibles dimensions et régulièrement réparties. De plus, la proportion de la jachère est constante quelle que soit la taille du bloc (environ 25 %), et les proportions du mil et la cuirasse varient peu (de 10 % environ entre la taille 2 et la taille 9) (Figure 5.7a). Ainsi le décalage spatial entre la carte et l'image n'a pas une conséquence grave sur l'inversion, car l'erreur sur les proportions n'est pas très importante. Par contre dans le site SS, les proportions des unités de paysage subissent des changements importants quand on augmente la taille des blocs, comme il est illustré par la figure 5.7b. La proportion de la cuirasse est quasiment nulle pour une taille de bloc égale à 2, et atteint environ 30 % pour une taille de bloc égale à 9. Ceci est dû au fait que la zone d'influence du site SS augmente avec la taille du bloc, pour englober de larges unités contrastées de cuirasse qui rendent le système sensible au décalage.

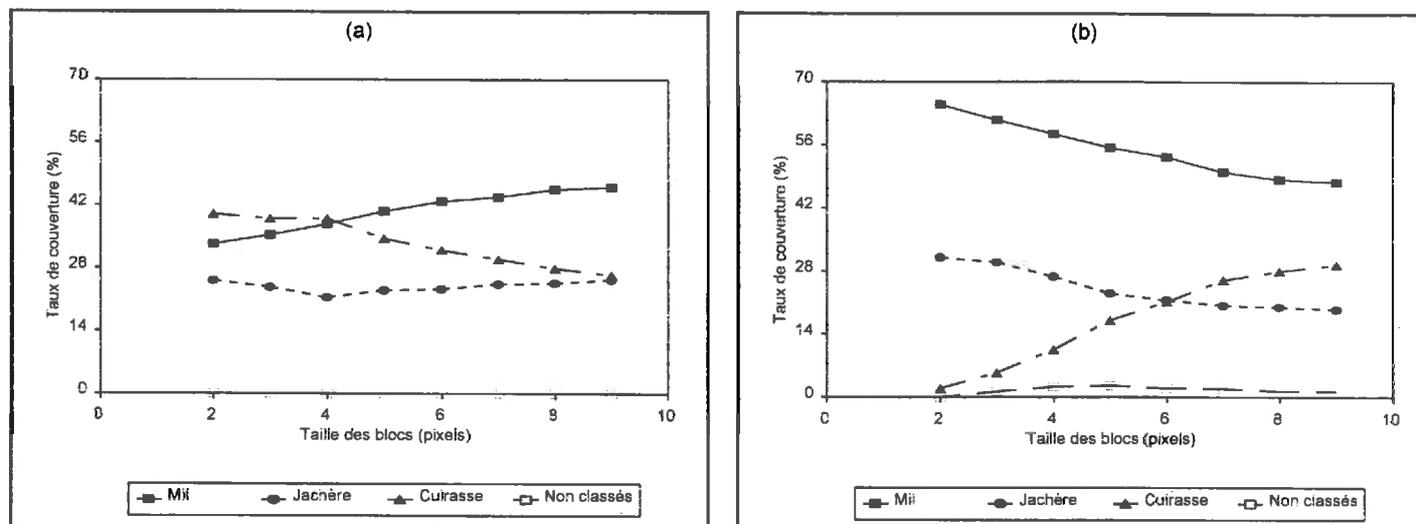


Figure 5.7: Proportions des unités de paysages (mil, jachère, cuirasse et pixels non classés) à l'intérieur de la zone d'influence pour les deux sites a) SC et b) SS.

5.3.3 ERREUR SUR LE CALCUL DES REFLECTANCES

Le tableau 5.2 montre l'erreur relative commise sur l'estimation des réflectances après inversion du modèle pour les sites SC et SS. Cette erreur est représentée par la différence entre la valeur estimée et la valeur vraie de la réflectance, puis normalisée par la valeur vraie. Cette erreur représente un bon indicateur de la sensibilité du modèle au décalage spatial et à la taille des blocs.

Comme on s'y attendait, l'erreur tend à croître avec le décalage spatial et à décroître avec la taille des blocs. Pour le site SC, les réflectances estimées sont très proches des réflectances mesurées quand le décalage est de 1 pixel. Pour les décalages 2 et 3 pixels, les réflectances du mil et de la jachère sont mal estimées. Sur le site SS, les réflectances estimées du mil sont proches des réflectances mesurées de la jachère, et inversement, alors que la réflectance de la cuirasse est assez bien estimée. Ces résultats sont liés aux conclusions précédentes sur le nombre de solutions acceptées.

		Taille du bloc b (en pixels)						ρ^*
		4	5	6	7	8	9	
Site SC :								
Mil	0**	0	0	0	0	0	0	0.500
	1	8	10	2	8	6	6	0.467
	2	28	18	4	12	8	6	0.437
	3	18	22	26	14	14	10	0.413
Jachère	0	0	0	0	0	0	0	0.400
	1	5	18	5	10	13	8	0.438
	2	13	25	18	18	18	15	0.470
	3	13	33	30	23	25	18	0.477
Cuirasse	0	0	0	0	0	0	0	0.300
	1	10	3	3	0	0	0	0.308
	2	33	13	10	3	3	3	0.333
	3	50	13	23	7	3	7	0.352
Site SS :								
Mil	0	0	0	0	0	0	0	0.500
	1	18	14	12	14	8	6	0.440
	2	18	12	18	14	14	8	0.430
	3	8	14	20	18	16	10	0.428
Jachère	0	0	0	0	0	0	0	0.400
	1	28	28	23	25	15	15	0.488
	2	23	15	23	18	23	18	0.478
	3	8	18	28	20	20	13	0.470
Cuirasse	0	0	0	0	0	0	0	0.300
	1	20	10	7	7	3	0	0.323
	2	20	10	13	13	10	3	0.335
	3	7	10	17	19	13	10	0.338

* : Moyenne des réflectances estimées.

** : Nombre de pixels de décalage spatial.

Tableau 5.2 : Erreurs (%) et moyennes des réflectances estimées des sites central (SC) et sud (SS) pour les 3 unités de paysage, en fonction de la taille des blocs et du décalage spatial.

L'autre indicateur de sensibilité de la méthode est le coefficient de variation des réflectances estimées (Tableau 5.3). Encore une fois, la sensibilité tend à diminuer quand on augmente la taille des blocs, sauf pour la jachère et la cuirasse du site SS qui atteignent un minimum pour une taille de bloc égale à 7 (Figure 5.8). Les coefficients de variation ne montrent pas une forte sensibilité au décalage spatial. Ceci est dû probablement au filtrage qu'on applique aux solutions, et qui ne garde que les solutions comprises entre 0 et 1.

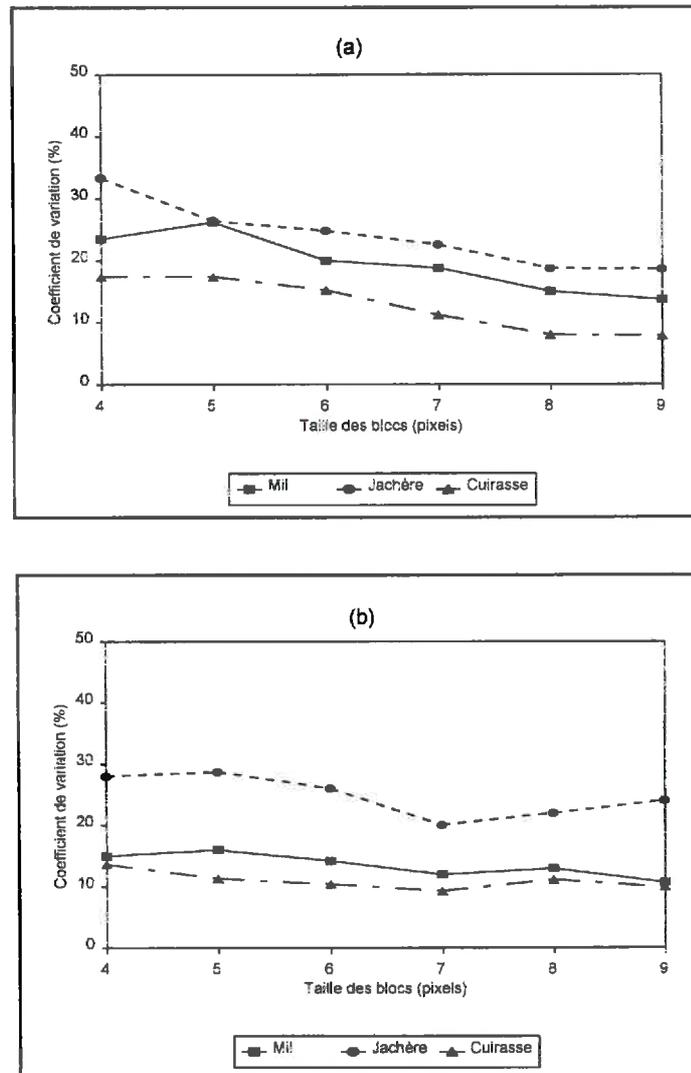


Figure 5.8: Coefficient de variation des réflectances PIR estimées des 3 unités de paysage dans le cas d'un décalage de 1 pixel AVHRR (simulations), en fonction de la taille des blocs, et pour les deux sites a) SC et b) SS.

		Taille du bloc b (en pixels)					
		4	5	6	7	8	9
Site SC :							
Mil	1*	24	26	20	19	15	14
	2	17	23	20	19	12	14
	3	11	29	24	21	19	21
Jachère	1	33	26	25	23	19	19
	2	34	17	26	21	21	21
	3	34	22	23	22	20	25
Cuirasse	1	17	17	15	11	8	8
	2	11	17	16	14	11	10
	3	12	20	21	14	13	12
Site SS :							
Mil	1	15	16	14	12	13	11
	2	21	17	14	18	17	14
	3	16	18	14	21	19	16
Jachère	1	28	29	26	20	22	24
	2	16	29	24	23	26	27
	3	34	28	22	23	25	29
Cuirasse	1	14	11	10	9	11	10
	2	22	12	10	13	14	13
	3	15	13	10	13	15	14

* : Nombre de pixels de décalage spatial.

Tableau 5.3 : Coefficient de variation (%) des réflectances estimées des sites central (SC) et sud (SS) pour les 3 unités de paysage, en fonction de la taille des blocs et du décalage spatial.

5.4 APPLICATION AUX IMAGES NOAA-AVHRR

L'inversion du modèle a été réalisée avec les 16 images NOAA-AVHRR, retenues pour couvrir le cycle cultural de la saison 1992.

Sur un plan méthodologique, les simulations de données AVHRR ont permis d'évaluer sur un cas théorique la sensibilité de cette méthode d'inversion à la localisation et à la taille des blocs. Elles montrent que l'erreur des réflectances estimées tend à diminuer en fonction de la taille des blocs. Le problème qui se pose dans ce cas réel est le choix d'une taille de bloc optimale, qui soit élevée pour minimiser l'erreur due au décalage spatial, et assez faible pour éviter d'introduire une hétérogénéité spectrale à l'intérieur de chaque unité de paysage (faibles dimensions de la zone d'influence).

5.4.1 CHOIX DE LA RESOLUTION SPATIALE

Pour trouver une réponse à ce problème, une seconde analyse de sensibilité à la taille des blocs a été effectuée sur une image AVHRR de milieu de saison (JJ 262). Les résultats sont illustrés par les coefficients de variation des réflectances proche infrarouge des 3 unités de paysage pour les deux sites SC et SS (Figure 5.9).

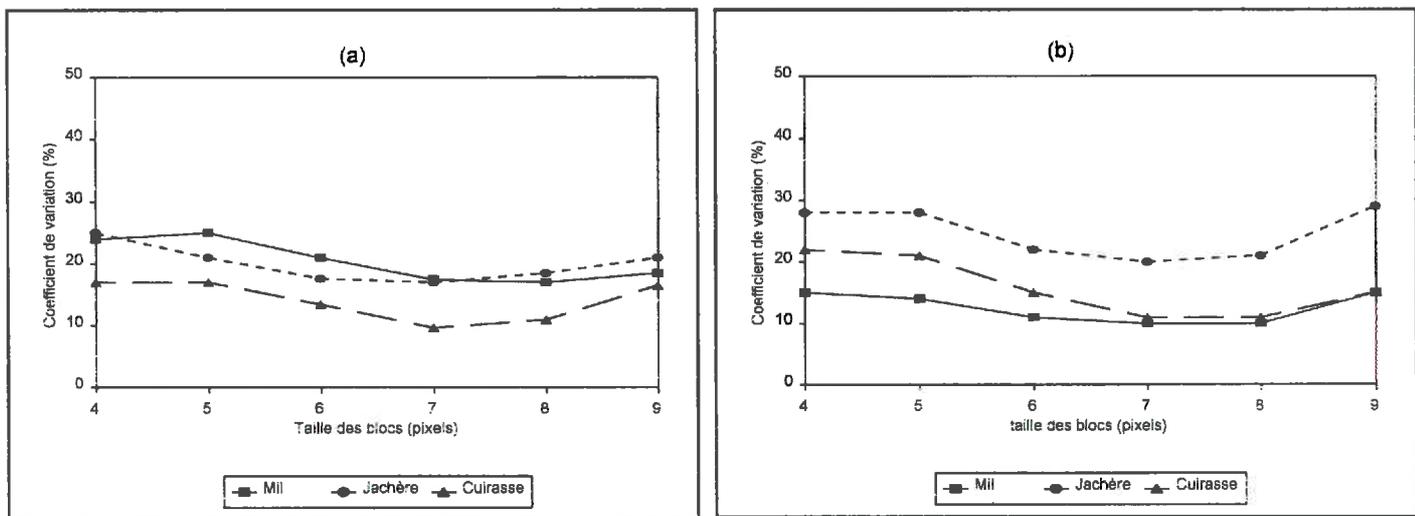


Figure 5.9: Coefficient de variation des réflectances PIR estimées des 3 unités de paysage de l'image AVHRR du jour julien 262, en fonction de la taille des blocs, et pour les deux sites a) SC et b) SS.

Pour les deux sites, le coefficient de variation diminue quand on augmente la taille des blocs jusqu'à un minimum atteint pour une taille de bloc égale à 7. Pour les tailles de bloc supérieures à 7 pixels, on observe une croissance du coefficient de variation qui peut être expliquée par l'augmentation de la variabilité spectrale à l'intérieur des unités de paysage. Comme le coefficient de variation est le seul indicateur de "la qualité" des estimations, nous avons pris une taille de bloc égale à 7 pixels pour inverser le modèle sur des données NOAA-AVHRR

5.4.2 PROFIL TEMPOREL DU COEFFICIENT DE VARIATION

Sur la figure 5.10 est représenté le profil temporel du coefficient de variation du mil. Ce profil montre un coefficient de variation élevé au début et en fin de cycle, alors qu'il est plus faible en milieu de saison des pluies. De plus, les coefficients de variation sont plus faibles pour le site SS que pour le site SC. Ceci peut être expliqué par le régime des pluies, qui arrivent plus tôt sur le site SS (Taupin et al., 1993), et qui induisent un développement plus homogène de la végétation. La précision de l'inversion du modèle se trouve améliorée quand les unités de paysage ont des caractéristiques spectrales spécifiques, ce qui explique le faible coefficient de variation en milieu de saison des pluies.

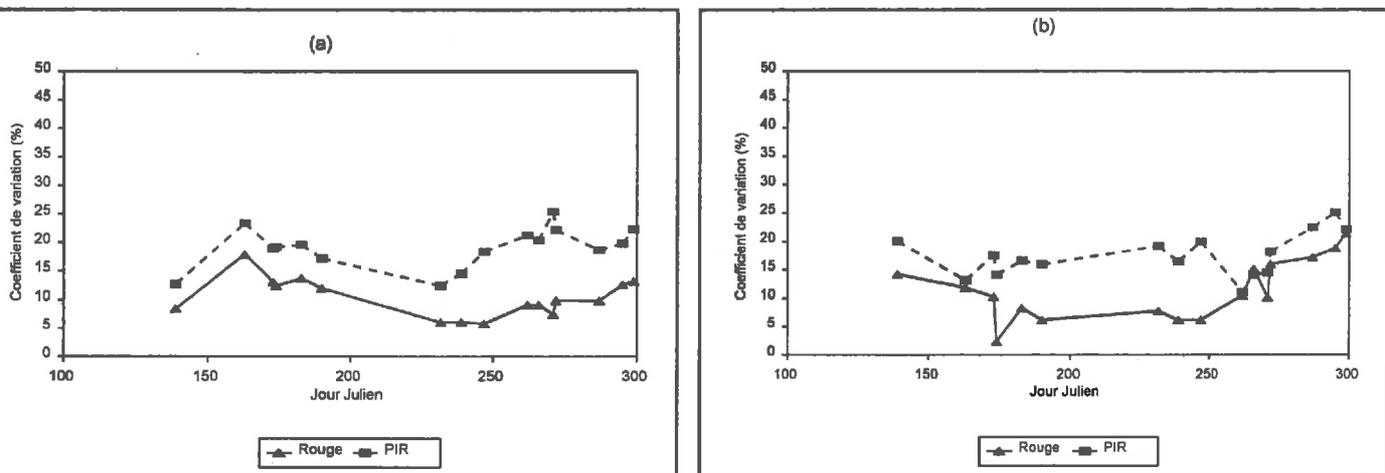


Figure 5.10: Coefficient de variation des réflectances PIR estimées du mil pendant le cycle cultural (la taille de bloc est égale à 7 pixels), pour les deux sites a) SC et b) SS.

On remarque aussi que le coefficient de variation du canal rouge est plus faible (entre 0 % et 10 % en milieu de saison des pluies) que celui du canal proche infrarouge (entre 10 % et 20 % à la même période).

5.4.3 COMPARAISON DES REFLECTANCES ESTIMEES ET MESUREES

Pour tester la validité de cette méthodologie, on a comparé le profil temporel du NDVI estimé avec celui des mesures aéroportées pour les deux sites SC et SS (Figures 5.11 et 5.12).

Ces comparaisons ne peuvent être que qualitatives, car les mesures avion ont été faites dans des canaux différents de ceux d'AVHRR. Mais les profils temporels sont un bon indicateur de la fiabilité de cette méthode.

Pour le site SC, le profil temporel du NDVI des 3 unités de paysage est assez bien restitué. Sur les deux graphes de la figure 5.11, au début de la période de croissance de la végétation (JJ 210), le mil a le NDVI le plus faible. Pendant la période de croissance, le NDVI de la jachère devient plus important, supérieur à celui des autres unités de paysage. En fin de cycle, le mil et la jachère ont presque le même NDVI. Les maxima du NDVI sont atteints au même moment, sauf pour le mil dont les mesures aéroportées montrent une nouvelle croissance en fin de cycle.

Dans le cas du site SS, les résultats ne sont pas aussi évidents à interpréter, et la comparaison avec les mesures aéroportées est difficile. Les NDVI estimés de la jachère et de la cuirasse sont souvent très proches, à cause des ressemblances qu'il y a entre ces deux classes dans cette région (présence de "la jachère" sur les cuirasses). Les profils temporels du NDVI du mil sont différents sur les deux graphes de la figure 5.12 (maximum autour du JJ 220 et 250 pour les mesures aéroportées et les estimations respectivement). Pour analyser cette différence entre les profils temporels du mil mesuré par avion et estimé par notre méthode, nous avons pu extraire à partir des données NOAA le profil temporel d'un pixel composé majoritairement par du mil (82 %), et situé près du site SS. Ce profil montre un maximum vers le jour julien 250, montrant ainsi que les mesures aéroportées ne sont pas représentatives de la région. Cependant, les comparaisons doivent être faites avec précaution, car les mesures aéroportées ne peuvent pas être représentatives des unités de paysages à l'échelle de NOAA-AVHRR. Les résultats sont encourageants sur le site SC.

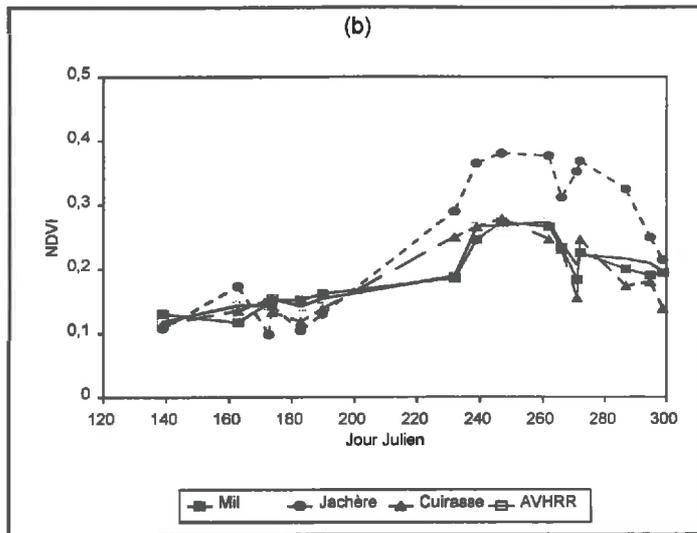
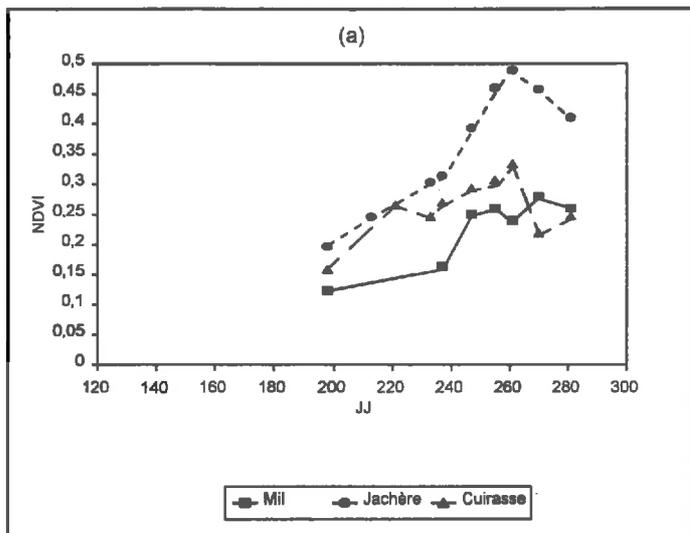


Figure 5.11: Profils temporels des NDVI des 3 unités de paysage (mil, jachère et cuirasse) du site SC, obtenus (a) à partir des mesures avion et (b) à partir de la déconvolution du signal AVHRR.

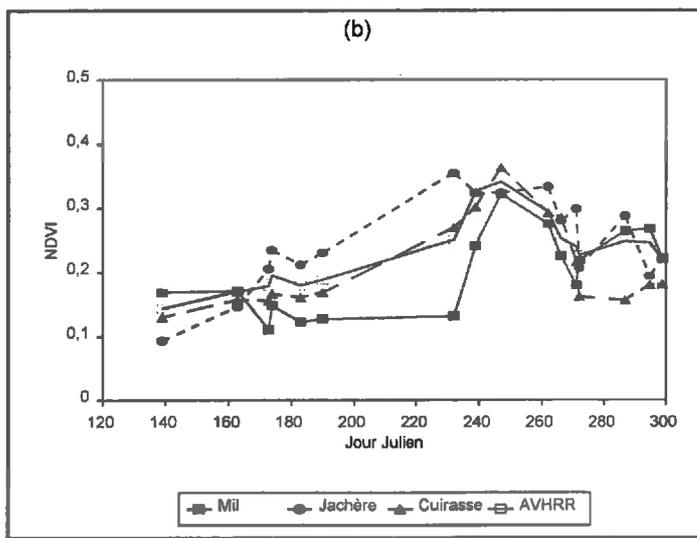
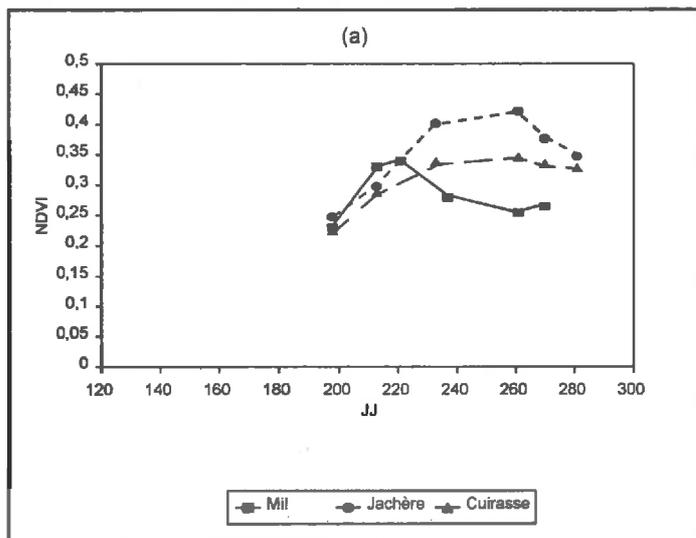


Figure 5.12: Profils temporels des NDVI des 3 unités de paysage (mil, jachère et cuirasse) du site SS, obtenus (a) à partir des mesures avion et (b) à partir de la déconvolution du signal AVHRR.

5.5 CONCLUSION ET PERSPECTIVE

La basse résolution du capteur AVHRR (1.1 km au nadir) constitue un handicap dans la mesure où l'on n'a pas accès à des informations caractéristiques de chacune des unités de paysage, mais à une combinaison de signaux issus de plusieurs types de végétation et de sol.

L'utilisation conjointe des données AVHRR et d'une carte d'occupation du sol réalisée avec des données SPOT permet de remédier à cet inconvénient, en déconvoluant le signal AVHRR.

La méthode utilisée pour extraire les réflectances spécifiques à ces unités est basée sur une hypothèse principale qui est la linéarité du signal reçu par le capteur.

Elle demande un niveau assez précis de superposition géométrique entre la carte d'occupation du sol et les images NOAA-AVHRR. Les simulations montrent qu'un décalage entre l'image et la carte supérieur à 1 pixel donne des solutions erronées.

Les erreurs de localisation peuvent être réduites en prenant des blocs de pixels comme unités élémentaires. Les simulations prouvent que l'augmentation de la taille des blocs améliore les résultats de l'inversion.

La fiabilité de cette méthode est aussi très liée à la structure du paysage. En effet, les simulations ont montré que les solutions obtenues sur le site SC sont plus correctes que celles du site SS, car les unités de paysage sont plus réduites et mieux réparties spatialement pour le premier que pour le second.

Cette méthode a été appliquée à 16 images NOAA-AVHRR de la saison 1992, pour établir un suivi temporel des trois principales unités: mil, jachère et cuirasse. Les résolutions sont faites avec des blocs de taille 7x7 pixels, correspondant à une zone d'influence de 35 pixels en longitude, et 11 pixels en latitude.

Les résultats des inversions ont permis d'extraire le profil temporel des réflectances dans les canaux rouge et proche infrarouge, pour en déduire le profil temporel du NDVI correspondant à chaque unité de paysage.

Ces profils temporels du NDVI ont été confrontés à ceux mesurés par avion sur des transects au-dessus des sites SC et SS. Mais l'évolution temporelle du NDVI estimé par inversion est difficilement comparable à celle du NDVI obtenu à l'aide des mesures aéroportées, car ni les bandes spectrales, ni les résolutions spatiales ne sont identiques. Néanmoins, on peut dégager des tendances similaires dans l'évolution du NDVI, comme pour la jachère sur le site central.

Mais la principale limitation de cette méthode est la superposition entre les images et la carte d'occupation du sol. Le lancement de SPOT-4 avec les deux capteurs haute résolution et basse résolution spatiale embarqués à bord devrait permettre à l'avenir d'améliorer la précision de la localisation, et donc de l'inversion par la méthode présentée.

CHAPITRE 6:

**ETALONNAGE DES PARAMETRES DU MODELE DE
MONTEITH A L'ECHELLE SATELLITAIRE**

(SAISON 1991)

CHAPITRE 6 :

ETALONNAGE DES PARAMETRES DU MODELE DE MONTEITH A L'ECHELLE SATELLITAIRE

Dans ce chapitre, nous allons étudier les différentes relations qui lient certaines caractéristiques du couvert végétal avec les mesures radiométriques effectuées par les satellites, et notamment les satellites NOAA-AVHRR. Ces relations vont nous permettre d'étalonner les paramètres du modèle de Monteith avec les données de la saison 1991.

Dans le cas du modèle de Monteith simplifié, la production végétale après une période de temps donnée est formulée par :

$$PPN = \int_{t_1}^{t_2} \epsilon_c \cdot \epsilon_a \cdot \epsilon_b \cdot RG \cdot dt$$

où PPN est la Production Primaire Nette aérienne, t_1 et t_2 sont respectivement le début et la fin de la période considérée, ϵ_c est l'efficacité climatique, ϵ_a est l'efficacité d'absorption, ϵ_b est l'efficacité de conversion, RG le rayonnement global et dt le différentiel de temps.

Le NDVI calculé avec les réflectances rouge et proche infrarouge du capteur AVHRR va être utilisé pour estimer ϵ_a , alors que les données infrarouges thermiques d'AVHRR vont nous permettre de calculer l'indice de stress hydrique SDD pour étudier le comportement de ϵ_b en fonction de l'état hydrique du sol. Enfin les données Météosat vont être utilisées pour calculer le rayonnement global RG.

Les données AVHRR sont le plus souvent utilisées avec un pas de temps décadaire. La discrétisation du modèle en N décades se formule ainsi:

$$PPN = \sum_{n=1}^{n=N} \epsilon_c \cdot \epsilon_a \cdot \epsilon_b \cdot RG \cdot \Delta t$$

Dans ce chapitre, tous les paramètres seront utilisés avec un pas de temps de 10 jours, qui se justifie par la faible durée du cycle végétatif du mil (90 à 120 jours).

6.1 L'EFFICIENCE CLIMATIQUE

L'efficacité climatique comme on l'a déjà montré au paragraphe 2.3.2, est très peu variable sur notre zone au cours de la saison des pluies. Elle est égale à 0.466 +/- 0.006. Donc prendre une valeur de ϵ_c constante sur tout le cycle cultural (égale à 0.466) est tout à fait justifiable.

6.2 ESTIMATION DU RAYONNEMENT GLOBAL (RG)

Le rayonnement global est estimé à partir de la durée d'insolation mesurée sur quelques stations météorologiques. Or ces données sont insuffisantes pour caractériser les variations spatiales du rayonnement global sur toute la zone sahéenne.

Dedieu et al. (1987b) ont développé une méthode qui permet d'estimer le rayonnement global à la surface de la terre à partir de Météosat. Cette méthode utilise les données du canal visible, corrigées des effets de la diffusion de Rayleigh, de la diffusion de Mie, et des effets de l'absorption gazeuse en utilisant la climatologie de la vapeur d'eau et de l'ozone,

Cette méthode a été appliquée uniquement à une série d'images Météosat de l'année 1983. Les différents changements survenus sur ces satellites et le manque de temps n'ont pas permis de l'appliquer aux données des saisons 1991 et 1992. Ce sont donc les estimations de RG pour l'année 1983 qui seront utilisées dans cette étude. Mais ces estimations seront comparées localement au rayonnement global calculé avec la relation de Prescott calibrée pour notre zone, en utilisant les mesures d'insolation de 4 stations météorologiques. Ces données permettront d'analyser la variabilité annuelle et interannuelle de RG.

6.2.1 VARIABILITE INTERANNUELLE DE RG

Loudjani (1993) a réalisé une étude sur la variabilité interannuelle (1980 à 1987) du rayonnement moyen mensuel mesuré sur 4 stations en Côte d'Ivoire. Il a montré que la variation mensuelle interannuelle moyenne maximale est de 1.4 MJ/m². Cette valeur est relativement proche de l'erreur de mesure habituellement considérée avec les mesures de rayonnement global, qui est de l'ordre de 0.8 à 1.6 MJ/m². Il a été montré aussi que la variation intermensuelle n'est pas très significative, et est inférieure à 1.8 MJ/m².

Pour mettre en évidence cette faible variabilité temporelle de RG, nous avons comparé les valeurs de RG estimées d'une part avec les données Météosat et d'autre part avec les données d'insolation de 4 stations au Niger en 1991 et 1992 (Tableau 6.1).

Station météorologique	Latitude (° Nord)	Longitude (° Est)
Niamey-Aéroport	13°29'	2°10'
Birni	13°48'	5°17'
Tillabery	14°12'	1°27'
Gaya	11°53'	3°27'

Tableau 6.1: Localisation des 4 stations météorologiques.

Les estimations de RG à partir des données d'insolation sont obtenues grâce à la relation de Prescott en utilisant les coefficients mensuels établis à AGRHYMET sur un grand jeu de données (1979 à 1988) (Tableau 6.2).

Mois	a	b	a+b
Janvier	0.200	0.470	0.670
Février	0.314	0.355	0.669
Mars	0.316	0.368	0.684
Avril	0.308	0.358	0.666
Mai	0.319	0.28	0.647
Juin	0.297	0.362	0.659
Juillet	0.287	0.368	0.655
Août	0.246	0.415	0.661
Septembre	0.252	0.427	0.679
Octobre	0.297	0.366	0.663
Novembre	0.287	0.372	0.659
Décembre	0.269	0.389	0.658

Tableau 6.2: Les coefficients de la relation de Prescott établis pour chaque mois avec un jeu de données de Niamey (1979/1988) (Bégué, 1991).

La relation de Prescott est exprimée par:

$$RG = RG_0 \cdot (a + b \cdot h / H)$$

avec RG_0 le rayonnement extra-terrestre, h la durée d'insolation et H la durée astronomique du jour.

La figure 6.1 montre les variations du rayonnement global décadaire du mois de Mai au mois d'Octobre. On observe au début de la saison des pluies un écart assez fort (4 MJ/m^2) entre le RG calculé à partir de l'insolation pour la saison 1991 et 1992 et celui estimé avec les données Météosat. Ceci peut être expliqué par les fluctuations interannuelles du mouvement du FIT. Une fois le FIT bien installé, ces écarts sont sensiblement réduits, et deviennent de l'ordre de 2 MJ/m^2 .

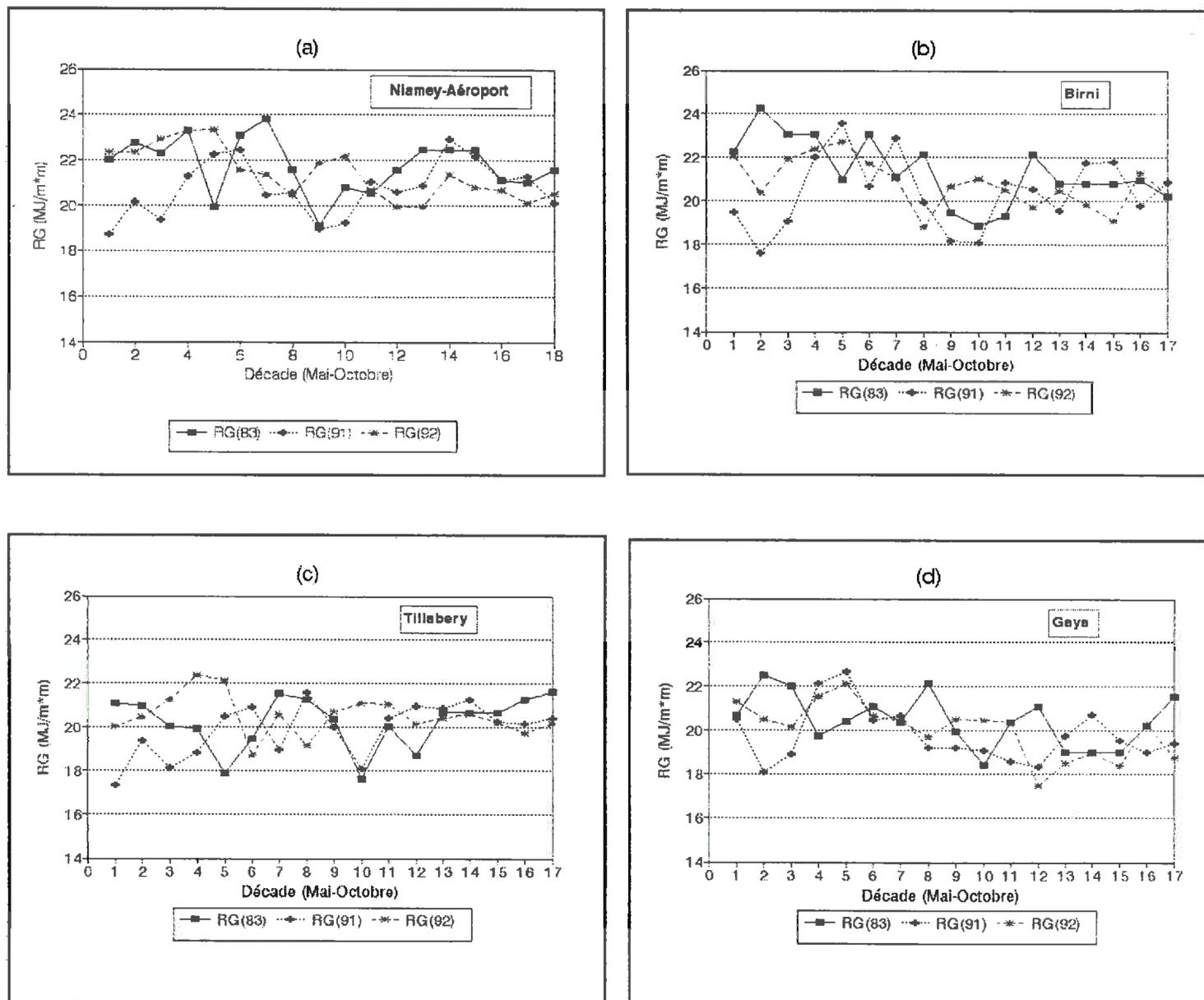


Figure 6.1: Comparaison du rayonnement global décadaire calculé avec la relation de Prescott (calibrée sur Niamey) à partir de l'insolation des saisons 91 et 92, avec celui mesuré à partir de données Météosat de la saison 83, pour 4 stations a) Niamey, b) Birni, c) Tillabery et d) Gaya.

Dans le cas de la modélisation d'une culture de mil au Sahel, la forte variabilité de RG au début du cycle n'est pas gênante, puisque la plante n'a pas encore démarré sa phase végétative.

Nous allons donc adopter l'hypothèse d'une faible variabilité interannuelle des valeurs de RG et nous utiliserons dans le cas de notre étude le fichier de rayonnement global de l'année 1983.

6.2.2 SPATIALISATION

Les données du rayonnement global estimé avec Météosat ont une résolution de 25 km. Pour les rendre superposables aux données AVHRR, on les a rééchantillonnées à 1.1 km par une interpolation bilinéaire. Cette interpolation des données de RG est parfaitement justifiée, car à l'échelle de temps adopté, qui est de 10 jours, le rayonnement global incident peut être considéré comme continu spatialement.

6.3 ESTIMATION DE L'EFFICIENCE D'ABSORPTION ϵ_a

Deux types de relations entre le NDVI et ϵ_a vont être utilisées pour calculer l'efficacité d'absorption. La première est une relation globale, établie à partir du minimum et du maximum du NDVI; la deuxième relation est issue des simulations du transfert radiatif effectuées avec le modèle de Myneni.

Le NDVI utilisé est celui des synthèses décennales, qui comportent également les données sur les angles solaires et de visée pour chaque pixel.

6.3.1 RELATION GLOBALE ENTRE ϵ_a ET NDVI

La relation globale consiste à faire correspondre au NDVI du sol une absorption nulle, et à un NDVI maximal de 0.9 une absorption maximale de 0.95 (une infime partie étant réfléchi par le couvert). Pour tenir compte de l'hétérogénéité des sols qui caractérise le Sahel, le NDVI du sol (NDVIs) de chaque pixel est obtenu à partir de la première synthèse, qui correspond à la fin de la saison sèche.

La relation globale s'écrit donc:

$$\epsilon_a = 0.95 \cdot \frac{(NDVI - NDVI_s)}{(0.9 - NDVI_s)}$$

6.3.2 RELATIONS DE MYNENI ENTRE ϵ_a ET NDVI

La deuxième méthode est basée sur les relations de Myneni (Myneni et al., 1990), établies pour des couverts de mil caractéristiques de la zone sahélienne (Bégué, 1994, communication personnelle). L'utilisation de ces relations à l'avantage de prendre en compte la configuration géométrique du système Source-Capteur.

Données utilisées

Les paramètres d'entrée du modèle de transfert radiatif correspondent aux cultures de mil et aux sols rencontrés au Sahel, et aux configurations géométriques de la mesure.

* La végétation. La première étape consiste à identifier les variables structurales de la culture de mil, qui sont pertinentes en terme de transfert radiatif. Pour cela on dispose d'une importante base de données réalisée dans le cadre du projet ESPACE (Estimation et Suivi de la Production Agricole en fonction du Climat et de l'Environnement), qui concerne plusieurs pays du Sahel (Forest, 1988). Cette base de données contient des informations sur la densité de semis, les différents stades de développement du mil, la biomasse et les rendements en fin de cycle.

Les limites inférieures et supérieures de la hauteur des poquets, des diamètres et de l'indice foliaire du mil ont été fixées à partir de mesures issues de campagnes expérimentales.

Enfin, les propriétés optiques des feuilles utilisées sont celles mesurées pendant la campagne HAPEX-Sahel (Hanan, communication personnelle, 1993)

* Un seul type de sol a été sélectionné pour la zone. Sa réponse bidirectionnelle dans les canaux AVHRR a été modélisée à partir des mesures de terrain effectuées par Huete et son équipe (University of Arizona) en divers points du Sahel (Communication personnelle, 1993). Pour éviter d'avoir un nombre important de relations entre ϵ_a et NDVI, un seul sol a été utilisé, dont le NDVI est égal à 0.15.

* Les bandes spectrales et la configuration géométrique choisies correspondent à celles du capteur AVHRR. En effet, après analyse de l'évolution temporelle des angles solaires et des angles de visée du capteur AVHRR, on s'est fixé les valeurs 15° et 190° pour la différence d'angles azimutaux ($\phi_s - \phi_v$) (Figure 6.2), de 0° à 50° et de 10° à 60° (avec un pas de 10°) pour les angles zénithaux solaire et de visée respectivement.

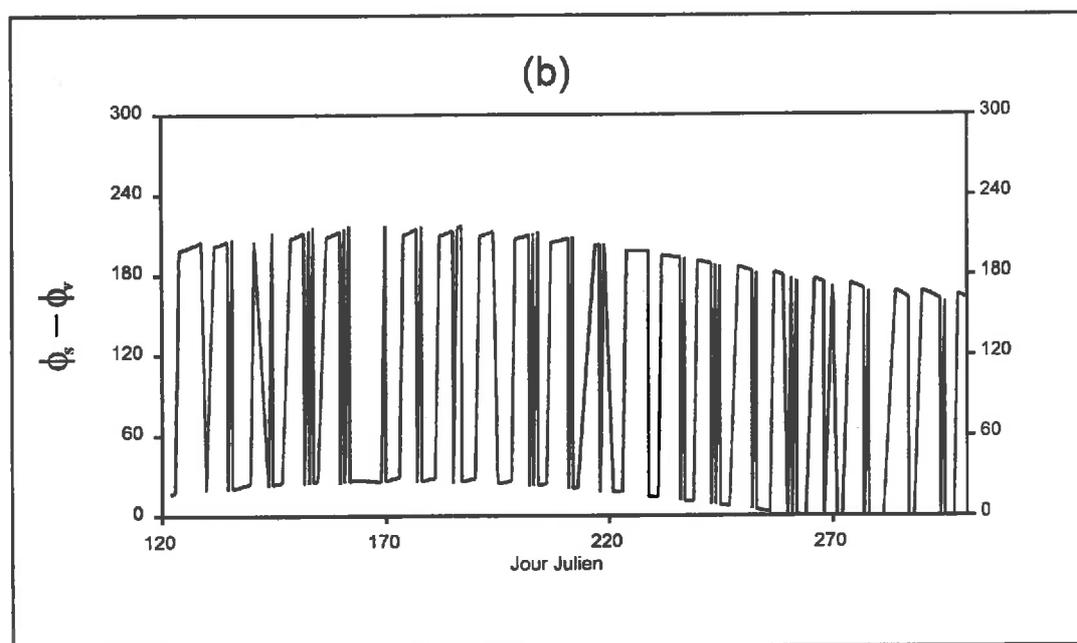
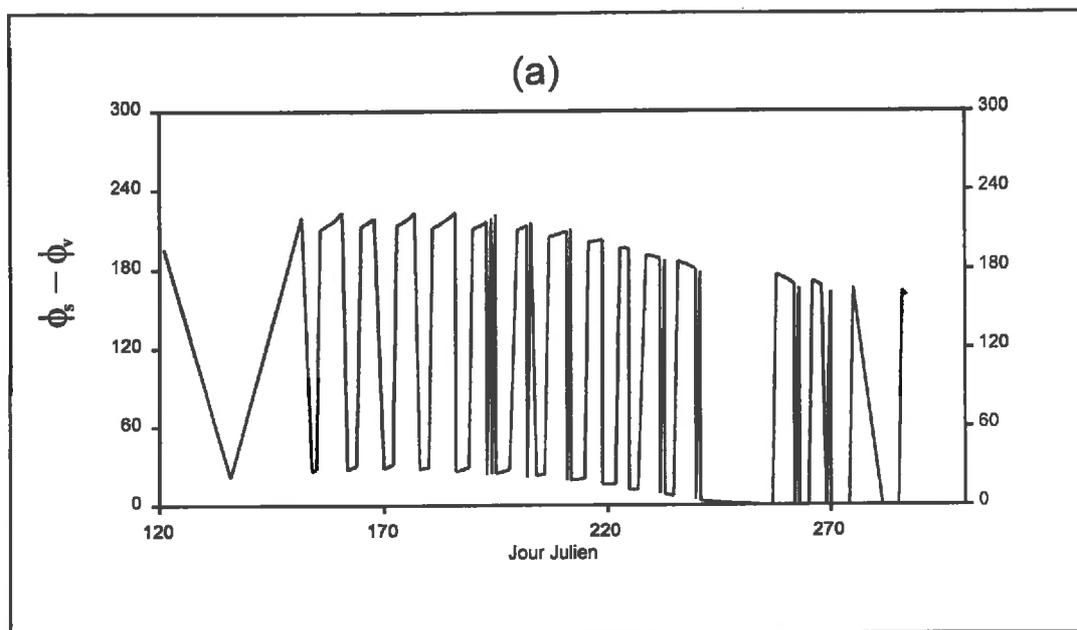


Figure 6.2: Evolution temporelle de l'angle azimutal relatif ($\phi_s - \phi_v$) des images AVHRR pour les deux saisons a) 1991 et b) 1992.

Paramètres des relations de Myneni

Les simulations réalisées avec ce jeu de données nous ont permis d'avoir 72 relations entre ϵ_a et indice de végétation (NDVI et MSAVI) (annexe B). Ces relations sont obtenues avec des régressions linéaires, et sont caractérisées par une forte variabilité de la pente, comprise entre 1.01 et 1.879 pour le NDVI, et entre 1.39 et 2.544 pour le MSAVI, alors que l'efficience à l'origine varie relativement peu, et fluctue entre -0.1 et -0.195 pour le NDVI, et entre -0.197 et -0.34 pour le MSAVI (Tableaux 6.3 et 6.4).

	$\phi_s - \phi_r = 15$						$\phi_s - \phi_r = 190$					
θ_s	10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60
θ_r	Pente et Origine											
0	1.878 -0.195	1.609 -0.148	1.462 -0.126	1.375 -0.118	1.277 -0.109	1.225 -0.116	1.879 -0.195	1.610 -0.148	1.463 -0.126	1.376 -0.119	1.278 -0.109	1.226 -0.116
10	1.620 -0.150	1.451 -0.122	1.355 -0.111	1.295 -0.109	1.220 -0.105	1.175 -0.114	2.043 -0.231	1.667 -0.162	1.460 -0.128	1.352 -0.115	1.252 -0.105	1.197 -0.110
20	1.455 -0.124	1.353 -0.110	1.282 -0.102	1.220 -0.098	1.167 -0.100	1.129 -0.110	1.697 -0.170	1.805 -0.197	1.504 -0.141	1.335 -0.114	1.231 -0.102	1.181 -0.109
30	1.344 -0.110	1.272 -0.102	1.221 -0.098	1.179 -0.098	1.129 -0.100	1.083 -0.107	1.480 -0.135	1.536 -0.148	1.602 -0.166	1.363 -0.121	1.222 -0.100	1.163 -0.104
40	1.269 -0.107	1.211 -0.100	1.161 -0.095	1.120 -0.095	1.078 -0.098	1.043 -0.109	1.325 -0.116	1.323 -0.115	1.361 -0.121	1.426 -0.136	1.220 -0.097	1.130 -0.093
50	1.189 -0.103	1.145 -0.100	1.106 -0.097	1.074 -0.099	1.036 -0.103	1.007 -0.116	1.239 -0.113	1.231 -0.111	1.220 -0.105	1.229 -0.102	1.263 -0.107	1.124 -0.091
	Coefficient de corrélation et erreur quadratique											
0	0.974 0.044	0.977 0.041	0.983 0.036	0.987 0.030	0.993 0.023	0.997 0.016	0.974 0.044	0.977 0.042	0.982 0.036	0.987 0.030	0.993 0.240	0.997 0.016
10	0.997 0.041	0.982 0.036	0.987 0.031	0.991 0.025	0.995 0.018	0.998 0.011	0.984 0.033	0.983 0.036	0.985 0.033	0.989 0.028	0.994 0.021	0.998 0.012
20	0.984 0.034	0.988 0.029	0.992 0.025	0.994 0.021	0.997 0.014	0.999 0.010	0.983 0.035	0.990 0.027	0.989 0.028	0.992 0.024	0.995 0.018	0.998 0.011
30	0.989 0.0282	0.992 0.024	0.995 0.020	0.996 0.016	0.998 0.012	0.999 0.010	0.987 0.031	0.990 0.0275	0.995 0.020	0.995 0.020	0.997 0.015	0.998 0.012
40	0.994 0.021	0.996 0.018	0.997 0.015	0.998 0.013	0.998 0.011	0.997 0.013	0.993 0.022	0.994 0.021	0.996 0.018	0.998 0.0132	0.998 0.013	0.997 0.015
50	0.997 0.016	0.998 0.0135	0.998 0.011	0.998 0.011	0.998 0.013	0.995 0.019	0.996 0.016	0.997 0.014	0.998 0.0124	0.998 0.011	0.999 0.010	0.996 0.017

Tableau 6.3: Pentes, origines, coefficients de corrélation et erreurs des relation NDVI- ϵ_a .

	$\phi_s - \phi_v = 15$						$\phi_s - \phi_v = 190$					
θ_s	10	20	30	40	50	60	10	20	30	40	50	60
θ_v	Pente et Origine											
0	2.542 -0.34	2.388 -0.311	2.27 -0.292	2.166 -0.277	2.046 -0.261	1.963 -0.258	2.544 -0.341	2.391 -0.312	2.273 -0.293	2.168 -0.278	2.048 -0.262	1.965 -0.258
10	2.365 -0.308	2.218 -0.281	2.12 -0.266	2.032 -0.255	1.926 -0.243	1.854 -0.243	2.444 -0.33	2.276 -0.296	2.152 -0.274	2.047 -0.259	1.937 -0.244	1.863 -0.242
20	2.236 -0.286	2.1 -0.262	2.01 -0.249	1.916 -0.236	1.818 -0.227	1.747 -0.228	2.304 -0.304	2.215 -0.296	2.052 -0.264	1.933 -0.243	1.824 -0.228	1.76 -0.229
30	2.123 -0.271	1.998 -0.249	1.909 -0.237	1.817 -0.227	1.719 -0.217	1.637 -0.217	2.16 -0.281	2.063 -0.268	1.988 -0.263	1.846 -0.235	1.729 -0.217	1.665 -0.219
40	2.024 -0.261	1.914 -0.243	1.818 -0.23	1.715 -0.217	1.602 -0.206	1.513 -0.204	2.008 -0.258	1.902 -0.241	1.828 -0.234	1.778 -0.234	1.632 -0.206	1.549 -0.203
50	1.894 -0.247	1.792 -0.232	1.699 -0.22	1.6 -0.209	1.486 -0.198	1.388 -0.197	1.878 -0.244	1.783 -0.229	1.695 -0.216	1.612 -0.207	1.569 -0.208	1.463 -0.198
	Coefficient de corrélation et erreur quadratique											
0	0.981 0.037	0.985 0.033	0.989 0.029	0.991 0.025	0.994 0.021	0.995 0.019	0.982 0.034	0.985 0.033	0.989 0.029	0.991 0.025	0.994 0.021	0.995 0.019
10	0.986 0.032	0.99 0.027	0.993 0.023	0.995 0.019	0.997 0.015	0.998 0.012	0.99 0.027	0.99 0.027	0.992 0.024	0.994 0.021	0.996 0.017	0.998 0.013
20	0.991 0.025	0.994 0.022	0.996 0.018	0.997 0.015	0.998 0.011	0.999 0.01	0.994 0.027	0.995 0.020	0.995 0.019	0.996 0.016	0.998 0.013	0.998 0.010
30	0.995 0.02	0.996 0.016	0.998 0.013	0.998 0.011	0.998 0.010	0.998 0.013	0.993 0.022	0.996 0.017	0.998 0.011	0.998 0.011	0.998 0.010	0.998 0.013
40	0.997 0.015	0.998 0.011	0.999 0.010	0.999 0.010	0.998 0.013	0.995 0.018	0.996 0.017	0.998 0.013	0.999 0.010	0.999 0.008	0.998 0.011	0.996 0.017
50	0.997 0.014	0.999 0.009	0.999 0.010	0.998 0.013	0.996 0.017	0.992 0.024	0.997 0.014	0.998 0.010	0.999 0.0109	0.998 0.011	0.998 0.013	0.993 0.022

Tableau 6.4: Pentes, origines, coefficients de corrélation et erreurs des relation MSAVI- ϵ_a .

Ces simulations montrent donc une importante sensibilité de la relation ϵ_a -IV à la configuration géométrique. Cela signifie que l'utilisation d'une seule relation établie dans une configuration particulière n'est pas suffisante pour avoir des estimations fiables de ϵ_a , et qu'il est nécessaire d'utiliser des abaques de coefficients correspondants aux différentes configurations géométriques.

Pour des applications ultérieures à des données AVHRR, on a rééchantillonné par interpolation linéaire les valeurs de la pente et de l'ordonnée à l'origine par pas de 1° pour chacun des angles.

6.3.3 COMPARAISON DE LA RELATION GLOBALE ET DES RELATIONS DE MYNENI

Comme on l'a déjà cité, la relation qui lie l'indice de végétation et l'absorption est dépendante de la configuration géométrique.

Pour montrer l'influence de la configuration géométrique sur l'indice de végétation et donc sur l'efficacité d'absorption, on a étudié l'évolution temporelle de deux pixels AVHRR. Le premier a été choisi au nord de la zone d'étude, où règne un climat aride, et où la végétation est très clairsemée; le deuxième a été choisi plus au sud, dans une zone où la végétation est assez importante. L'efficacité d'absorption a été calculée en utilisant la relation globale et les relations de Myneni.

La figure 6.3 montre l'évolution temporelle de l'indice de végétation et celle de l'efficacité d'absorption pour le pixel situé au nord. Dans le cas de l'efficacité d'absorption calculée à partir de la relation globale, on remarque qu'elle a exactement le même profil que le NDVI, avec des valeurs nulles quand l'indice prend des valeurs plus faibles que celle de la première synthèse correspondant à l'indice du sol. Sur le profil du NDVI, on observe un bruit qui survient pour une certaine configuration géométrique; ceci est particulièrement remarquable pour la synthèse 14, où l'angle zénithal de visée est assez faible par rapport à celui des synthèses voisines (Figure 6.4). L'indice ainsi mesuré a une valeur plus faible qui n'est pas due à une baisse de l'activité photosynthétique du couvert végétal, mais à un changement de la géométrie de la mesure.

L'efficacité d'absorption calculée à partir des relations de Myneni a un profil moins bruité que le précédent. L'absorption est nulle jusqu'à la synthèse 8, car l'indice est inférieur à l'indice du sol pris comme référence pour établir les relations de Myneni (0.15). Après la synthèse 8, l'absorption augmente avec une pente de plus en plus forte jusqu'à un maximum de 0.159 obtenu pour la synthèse 12, plus important que celui obtenu avec la relation globale (0.13). L'absorption diminue ensuite régulièrement jusqu'à être nulle à la dernière synthèse. Le bruit observé pour la synthèse 14 avec la relation globale a été atténué en utilisant les relations de Myneni. Ceci est très encourageant pour la suite, car la forte variabilité des angles de visée et solaires dans les synthèses peut engendrer des erreurs assez importantes dans les estimations de biomasse végétale.

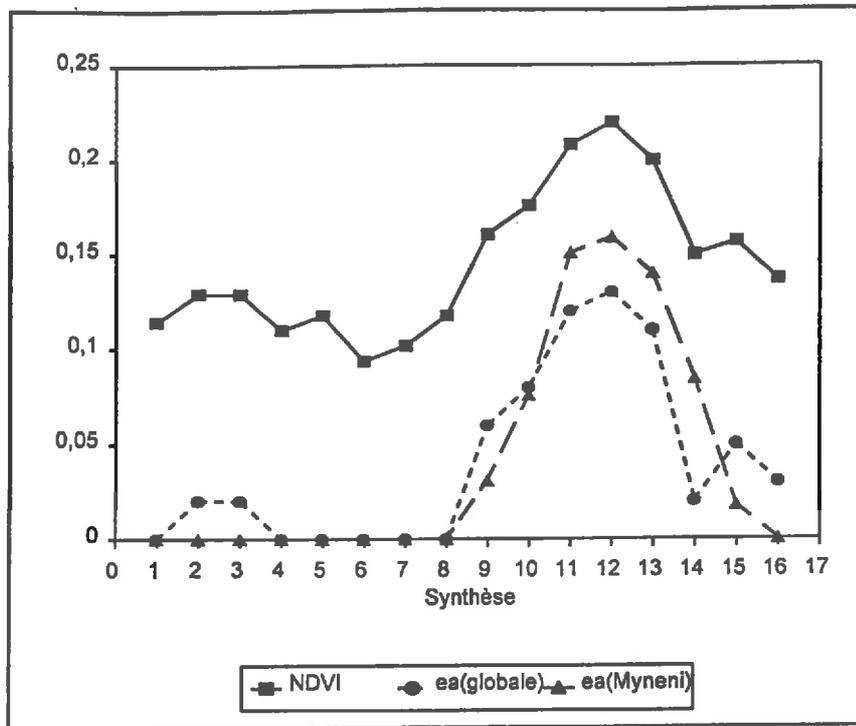


Figure 6.3: Evolution temporelle du NDVI et de l'absorption calculée avec la relation globale et les relations de Myneni pour un pixel situé au nord (1er Mai au 21 Octobre 1991).

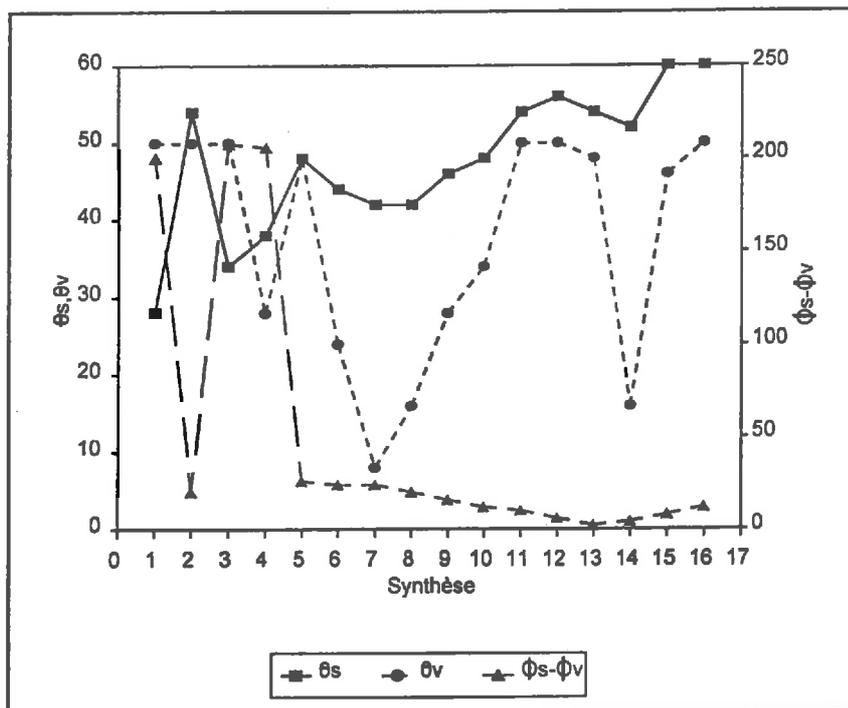


Figure 6.4: Variations des angles zénithaux de visée et solaire, et la différence des angles azimutaux au cours du cycle pour un pixel situé au nord (1er Mai au 21 Octobre 1991).

La figure 6.5 montre l'évolution temporelle de l'indice de végétation et celle de l'absorption pour le pixel situé au sud de notre zone. L'absorption calculée avec la relation globale est nulle pour la synthèse 1. Elle augmente avec une pente relativement faible jusqu'à la synthèse 7, pour augmenter ensuite avec une pente plus importante jusqu'à la synthèse 10. Elle reste ensuite très peu variable pendant 4 synthèses. Le maximum de l'absorption est atteint à la synthèse 13, puis elle décroît pour atteindre un minimum à la synthèse 15.

L'absorption calculée avec les relations de Myneni démarre elle aussi à 0, et augmente régulièrement jusqu'à un maximum de 0.357 atteint à la synthèse 10. Elle diminue ensuite avec une pente assez faible jusqu'à la synthèse 13, puis avec une pente plus importante jusqu'à la dernière synthèse où elle atteint son minimum de fin de cycle (0.226).

Là encore, on observe l'intérêt des relations de Myneni pour le calcul de l'absorption, particulièrement pour la synthèse 13 où l'indice de végétation prend une forte valeur due à un angle de visée très élevé, et pour la synthèse 15 où l'indice de végétation prend une faible valeur qui est due cette fois-ci à une faible valeur de l'angle de visée (Figure 6.6).

L'absorption calculée avec les relations de Myneni donne pendant tout le cycle des valeurs supérieures à celles obtenues par la relation globale. Ceci est dû au fait que les indices mesurés par AVHRR ne sont pas des indices du mil, mais de plusieurs types de couverts. Actuellement ces relations ne sont établies que lorsque la surface considérée n'est formée que par un seul type de couvert, mais les recherches actuelles dans ce type de modélisation vont permettre de l'élargir à des couverts hétérogènes.

6.4 ESTIMATION DE L'EFFICENCE DE CONVERSION ϵ_b MOYENNE DE LA SAISON 1991

L'efficience de conversion du mil est estimée en calculant le rapport entre la biomasse aérienne et l'énergie photosynthétiquement active absorbée par le couvert (g/MJ RPAa). Les mesures de l'efficience de conversion pentadaire du mil réalisées par Bégué (1991) montrent que cette dernière est presque constante pendant la phase de tallage et de montaison, et diminue pendant la phase de maturation.

L'efficience de conversion moyenne du mil peut être estimée en faisant appel au modèle de Monteith simplifié:

$$\epsilon_b = \frac{MST}{\sum_{PV} \epsilon_a \cdot \epsilon_c \cdot Rg}$$

où MST est la matière sèche totale aérienne du mil, et PV la phase végétative du mil.

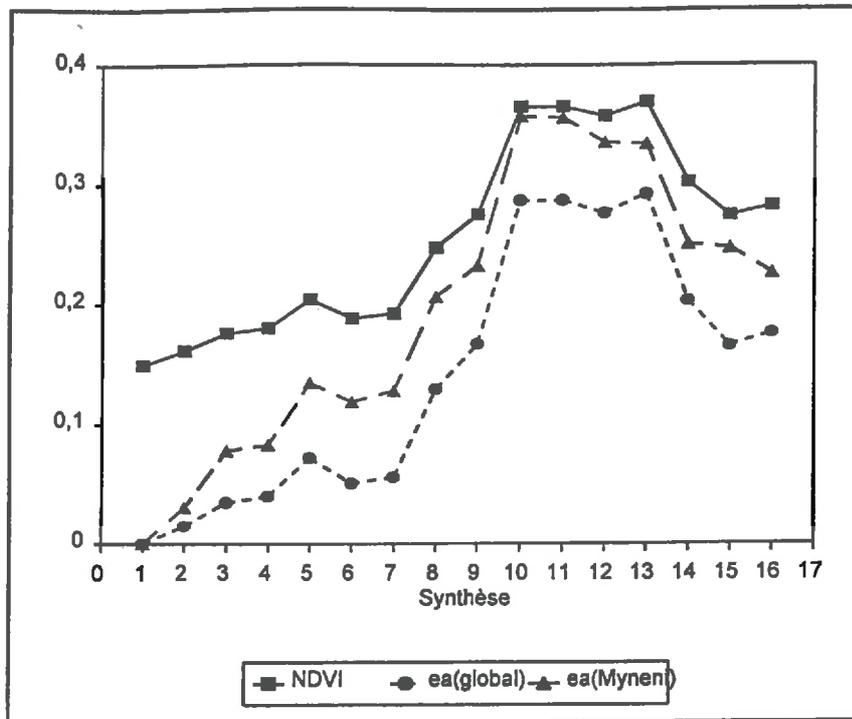


Figure 6.5: Evolution temporelle du NDVI et de l'absorption calculée avec la relation globale et les relations de Myneni pour un pixel situé au sud (1er Mai au 21 Octobre 1991).

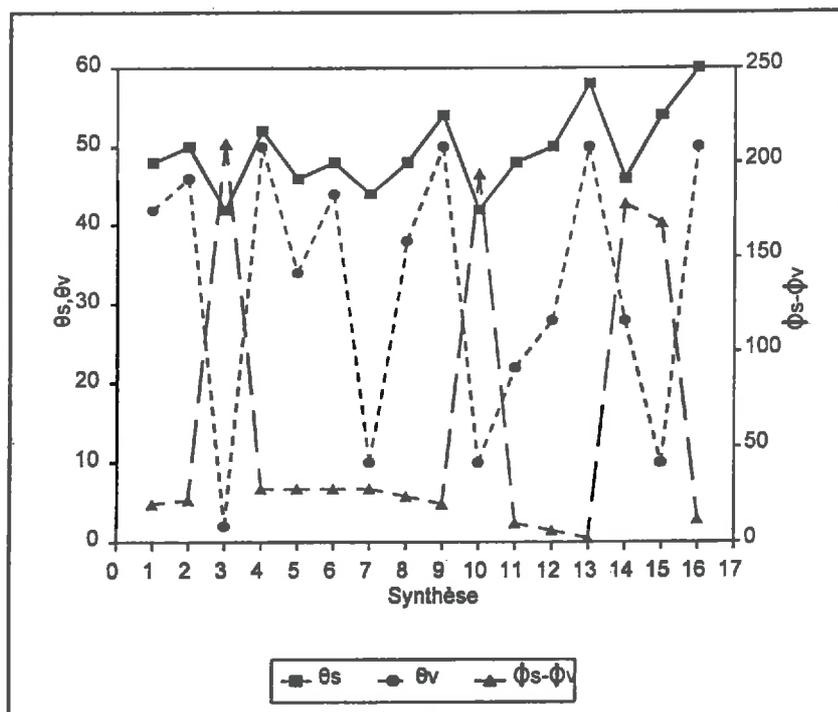


Figure 6.6: Variations des angles zénithaux de visée et solaire, et différence des angles azimutaux au cours du cycle pour un pixel situé au sud (1er Mai au 21 Octobre 1991).

6.4.1 PERIODE D'INTEGRATION

Pour estimer la matière sèche produite, il est nécessaire d'avoir une information très précise sur la durée du cycle.

En l'absence d'observation au sol, plusieurs auteurs ont établi des méthodes plus ou moins efficaces pour délimiter la période d'intégration du modèle. Certains auteurs ont fixé cette période entre le début de la croissance du NDVI et le début de sa baisse en fin de cycle (Bartholomé, 1989). D'autres ont délimité cette période entre le début de la croissance du NDVI et son maximum (Loudjani, 1993).

Pour les sites P4AS, on s'est basé sur les observations in situ pour fixer la durée d'intégration du modèle. Le tableau 6.5 fournit des informations concernant la date de semis et la date de récolte de la saison 1991 pour chacun des sites.

Dans le cas des cultures sahéliennes, le semis démarre toujours avec les premières pluies utiles. L'arrivée de celles-ci étant décalée entre le nord et le sud, les dates de semis sont étalées dans le temps, et montrent une assez forte dispersion entre les 10 sites. Mais sur un même site, les semis dépendent de chaque paysan (superficie de l'exploitation, force de travail ...), et les dates de semis peuvent être également très variables. Les dates qui sont présentées dans le tableau 6.5, sont des dates médianes qui correspondent à la majorité des dates de semis observées sur un site.

L'intégration du modèle de Monteith se fera en fonction de ces dates, en commençant 20 jours après le semis, et en s'arrêtant 20 jours avant la récolte, car les premiers jours sont consacrés essentiellement au développement de la partie racinaire de la plante, alors que pendant les derniers jours, la végétation devient sénescente, et l'activité chlorophyllienne est très faible.

Site	Date de semis	Date de récolte	MST (kg/ha)
Ouallam	16/05/91	14/10/91	6876
Chikal	16/05/91	26/09/91	1641
Darkinde	16/05/91	08/10/91	3925
Zebenfiti	16/05/91	15/09/91	3285
Hamdallaye	04/05/91	18/09/91	1786
Kouré	26/05/91	03/09/91	3172
Harikanassou	23/04/91	30/08/91	2278
Torodi	28/04/91	15/10/91	4468
Dioundou	26/04/91	23/10/91	1628
Bengou	19/05/91	15/08/91	4065

Tableau 6.5: Dates de semis et de récolte du mil, et MST mesurées en fin de cycle pour les 10 sites P4AS (1991) (les valeurs en gras sont des mesures douteuses).

6.4.2 LOCALISATION DES SITES P4AS SUR LES IMAGES AVHRR

Pour localiser les sites P4AS sur les images NOAA-AVHRR, on a utilisé des cartes géoréférencées de la zone d'étude. On s'est servi essentiellement de la carte du réseau hydrographique et de celle des sites P4AS. La carte du réseau est très intéressante dans notre cas car elle fournit les points d'amer les mieux identifiés.

La méthode de localisation consiste à superposer les cartes du réseau et des sites P4AS sur l'image NOAA, puis à appliquer un polynôme de déformation sur les deux cartes en prenant des points d'amer sur le fleuve Niger. Cette méthode permet d'avoir une bonne précision de localisation des sites, étant donné que ces sites ont en moyenne une dimension de 5x5 pixels NOAA.

6.4.3 EFFICIENCE DE CONVERSION MOYENNE DES SITES P4AS

En intégrant avec un pas de temps de 10 jours les différents paramètres de la formule de Monteith, on a pu calculer l'efficacité de conversion.

Le tableau 6.6 montre les valeurs de l'efficacité de conversion calculées sur chacun des sites avec les deux méthodes (relation globale et relations de Myneni). Ces valeurs varient entre 1.96 g/MJ à Chikal et 3.17 g/MJ à Torodi quand on utilise la relation globale, et entre 1.02 g/MJ à Chikal et 1.92 g/MJ à Torodi quand on utilise les relations de Myneni (les sites de Bengou, Dioundou et Ouallam ne sont pas pris en compte).

Site	Relation globale ϵ_p (g/MJ)	Relations de Myneni ϵ_p (g/MJ)	Pluviométrie (mm)
Ouallam	6.68	3.79	502
Chikal	1.96	1.02	406
Darkindé	3.04	1.91	459
Zebenfiti	2.5	1.57	530
Hamdallaye	2.08	1.22	535
Kouré	2.57	1.57	578
Harikanassou	2.48	1.52	498
Torodi	3.17	1.92	555
Dioundou	0.97	0.62	655
Bengou	1.03	0.76	719

Tableau 6.6: Efficacités de conversion estimées par inversion du modèle de Monteith pour la saison 1991, en utilisant la relation globale et les relations de Myneni pour calculer l'absorption (les sites en gras présentaient des mesures douteuses de MST) .

Les valeurs de l'efficacité de conversion obtenues avec la relation globale sont plus en accord avec celles mesurées au sol dans cette région, qui sont égales à 2.9 g/MJ, et 2.26 g/MJ (Bégué, 1991, communication personnelle, 1993). En effet, les relations de Myneni ont été établies uniquement pour des cultures de mil, alors que l'indice NDVI mesuré par AVHRR est celui d'une surface hétérogène formée par plusieurs types de couverts.

6.5 CALCUL DE L'INDICE DE STRESS SDD

Pour calculer l'indice SDD on a utilisé les données infrarouge thermique (IRT) du capteur AVHRR pour calculer la température de surface T_s , et les données de température de l'air du Modèle de Circulation Générale du CEPMMT.

6.5.1 ESTIMATION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE

Pour calculer la température de surface, nous avons utilisé l'indice de végétation MSAVI pour appréhender le taux de couverture du sol, car cet indice est très peu affecté par la couleur et les effets directionnels du sol.

$$T_s = T_{sv} \cdot \text{MSAVI} + T_{ss} \cdot (1 - \text{MSAVI})$$

où T_{ss} est la température de surface d'un sol et T_{sv} celle d'un couvert végétal.

Mais les températures de surface ainsi calculées restant très affectées par la couverture nuageuse, il a été indispensable de procéder à des synthèses d'images.

Méthodes de synthèse de température de surface.

Afin de s'affranchir de l'enneigement, différentes méthodes de synthèse ont été testées pour déterminer celle qui filtre le mieux les nuages:

- valeur maximale de T_s ,
- valeur moyenne de T_s sur la décade, en prenant les températures de surface supérieures à un seuil de 18°C. Ce seuil est utilisé dans la chaîne de traitement du LERTS pour détecter les nuages dans les régions sahéliennes.
- valeur de T_s correspondant au maximum du NDVI,

Nous avons choisi une période en milieu de saison des pluies (du 15 Juillet au 24 Juillet 1991) pour tester les trois méthodes de synthèse.

L'efficacité de chaque méthode a été évaluée en se basant sur trois critères: l'aspect visuel des images de synthèse, l'histogramme des images de synthèse, et la relation entre la température de surface et le NDVI.

L'aspect visuel

La méthode du maximum de température de surface donne une image nette, avec des températures plus élevées au nord qu'au sud, en accord avec les caractéristiques de la zone, où au nord le climat est plus aride, alors qu'au sud, la végétation est plus importante.

La méthode de synthèse à partir de la moyenne de T_s (avec un seuil à 18°C), donne une image assez nette, mais avec des températures plus faibles par endroit que celles calculées précédemment. Ceci peut s'expliquer par le fait que la moyenne intègre de faibles valeurs de T_s .

Par contre, la méthode de synthèse à partir du maximum de NDVI donne une image où on peut observer des formes aux limites bien claires, qui correspondent aux bords des nuages.

L'histogramme des images de synthèse

Les figures 6.7a, 6.7b et 6.7c montrent les histogrammes obtenus avec les trois méthodes de synthèse. La méthode du maximum de T_s donne une moyenne de température de surface plus élevée, et un écart-type plus faible, que dans le cas des deux autres méthodes. Ceci montre que les pixels sont plus homogènes, et donc moins perturbés par les nuages.

Relation entre température de surface et NDVI

La figure 6.8 montre la température de surface en fonction de l'indice de végétation NDVI, pour les trois méthodes de synthèse.

Dans le cas de la méthode de synthèse par maximum de température, la dispersion des points est assez faible, avec une température de surface comprise entre 30°C et 50°C , et un indice compris entre 0.1 et 0.8.

La méthode des moyennes de T_s donne un nuage de points assez concentré, avec une plage de variation pour T_s et NDVI très réduite par rapport aux deux méthodes précédentes: les valeurs de T_s sont comprises entre 20°C et 40°C , les valeurs de NDVI sont comprises entre 0.1 et 0.6. Ceci est dû au lissage par la moyenne car les valeurs de NDVI et T_s ne sont pas caractéristiques d'une journée particulière, mais d'une moyenne sur plusieurs jours.

Enfin, la méthode de synthèse à partir du maximum de NDVI présente une forte dispersion des points. Certaines valeurs de la température de surface sont très faibles, parfois même négatives, ce qui laisse supposer qu'il reste des nuages.

Les observations faites au cours de ces comparaisons nous ont amené à choisir pour la suite la méthode de synthèse par maximum de température de surface qui donne les meilleurs résultats.

moy. = 310.9 K
 σ = 6.1 K

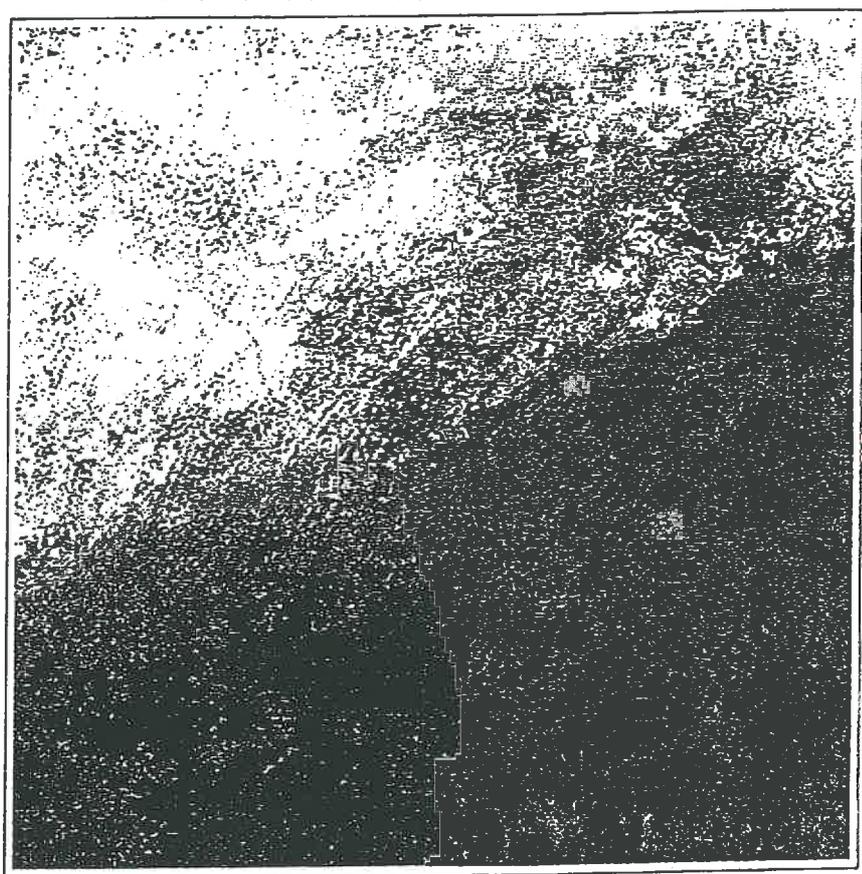


Figure 6.7a: Synthèse de la température de surface avec la méthode du maximum des températures de surface pour la période du 15 Juillet au 24 Juillet 1991.



Figure 6.7b: Synthèse de la température de surface avec la méthode des moyennes de T_s (seuil = 18°C) pour la période du 15 Juillet au 24 Juillet 1991.

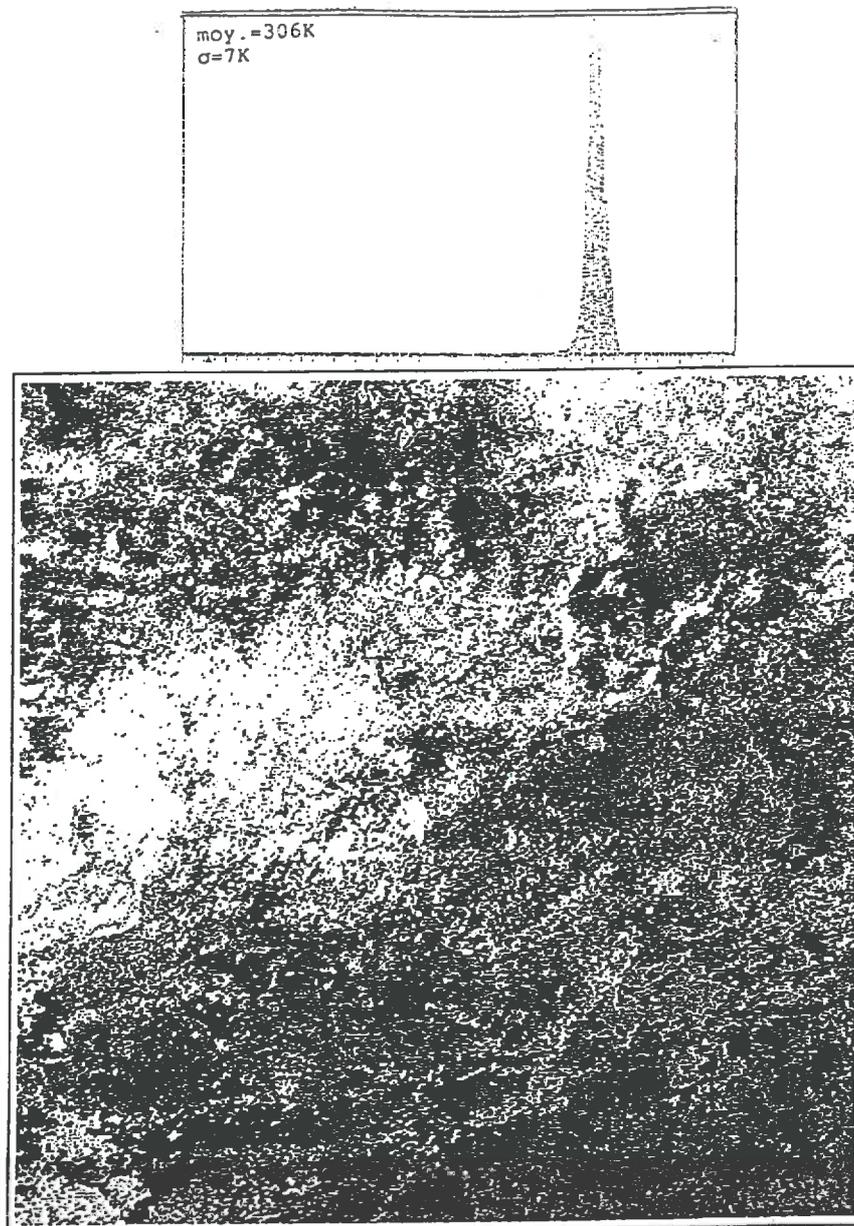
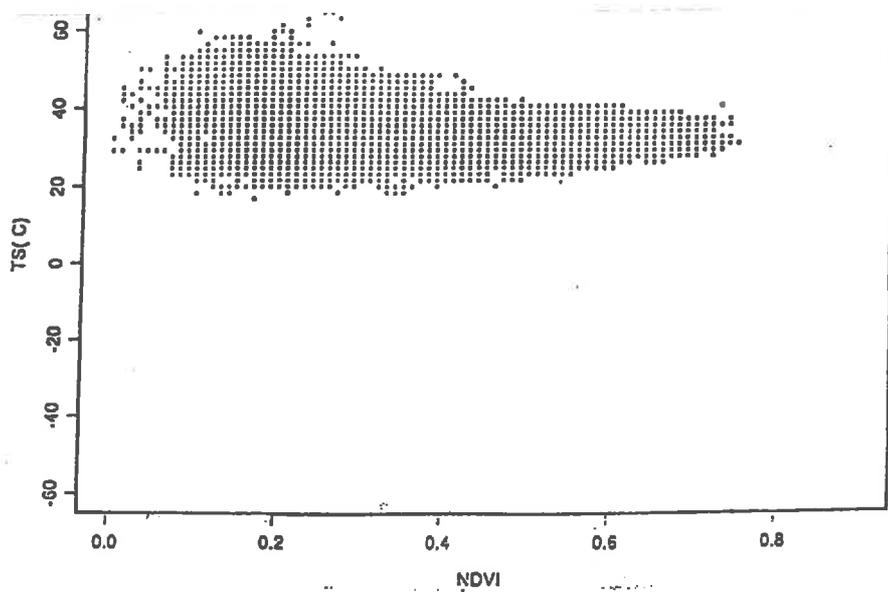
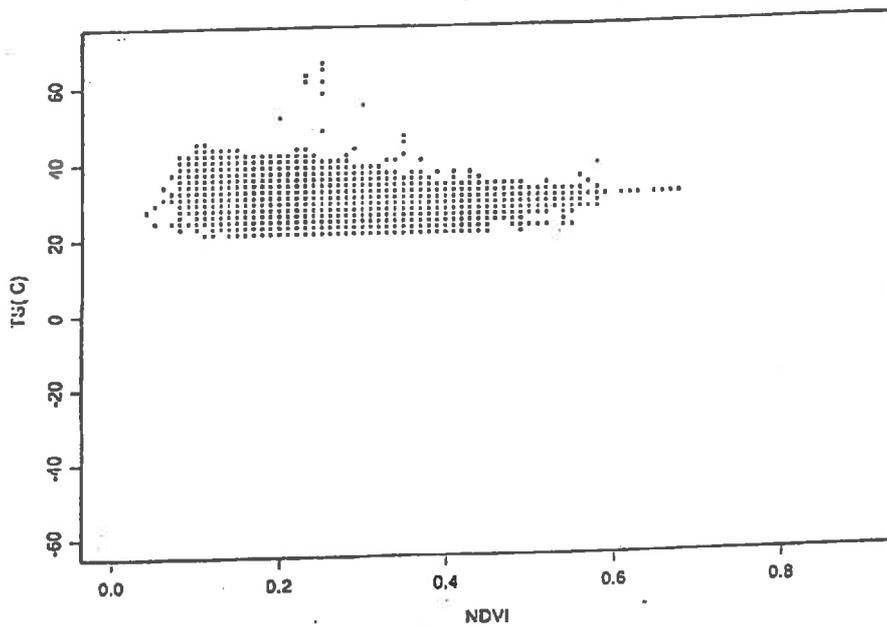


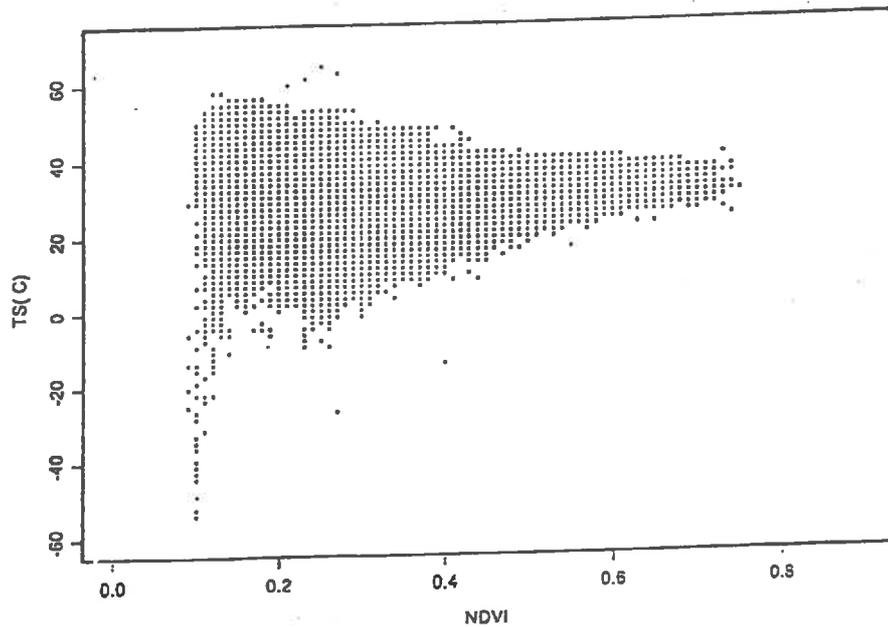
Figure 6.7c: Synthèse de la température de surface avec la méthode du maximum des NDVI pour la période du 15 Juillet au 24 Juillet 1991.



(a)



(b)



(c)

Figure 6.8: Relation entre température de surface et NDVI en utilisant 3 méthodes de synthèse (a) Maximum de Ts, (b) Moyenne de Ts avec un seuil de 18° et (c) maximum du NDVI (15 Juillet au 24 Juillet 1991).

6.5.2 LA TEMPERATURE DE L'AIR

Les températures de l'air que nous devrions utiliser pour calculer le SDD sont les températures maximales mesurées sous abri, généralement autour du midi solaire. Mais comme on l'a déjà signalé, le réseau de stations météorologiques n'est pas assez dense, avec 4 stations au total pour toute la zone du projet. L'interpolation de ces 4 mesures pour spatialiser la température de l'air sur tout le domaine n'aurait pas une précision satisfaisante. Nous avons donc utilisé les températures de l'air simulées par le modèle de CEPMMT, à l'échéance de 12h TU (13h locale).

Les températures simulées par le modèle de CEPMMT aux latitudes tropicales ne tiennent pas compte des phénomènes locaux à l'intérieur d'une maille, en particulier des échanges radiatifs entre la surface et l'atmosphère, et des flux turbulents. Il est donc nécessaire d'évaluer les sorties du modèle en les comparant localement aux mesures effectuées sur les stations météorologiques.

Comparaison des températures de l'air

Les données du modèle de CEPMMT ont une résolution de 1° (environ 100 km), et couvrent tout notre domaine. L'interpolation de ces données par krigeage a permis d'obtenir des grilles régulières quotidiennes, avec une résolution identique à celle des données NOAA (1.1 km). Après avoir extrait les températures de l'air moyennes du modèle sur des pavés de $5\text{km} \times 5\text{km}$ centrés sur 4 stations météorologiques (Niamey-Aéroport, Gaya, Birni et Tillabery), nous avons comparé celles-ci aux températures de l'air mesurées.

La figure 6.9 montre l'évolution temporelle de l'écart entre la température estimée par le modèle (T_{am}) et celle mesurée (T_{ar}) pour chaque station météorologique.

Nous pouvons remarquer une allure sinusoïdale de l'évolution, avec un bruit relativement important. L'amplitude de la sinusoïde est d'environ 5°C . Cette amplitude est forte et elle traduit l'imprécision du modèle de CEPMMT à simuler la température de l'air dans les latitudes tropicales. Sa faible résolution ne lui permet pas de prendre en compte les phénomènes convectifs, très fréquents dans cette région. Il faut noter aussi que la température de l'air mesurée localement sur les quelques stations météorologiques est utilisée comme paramètre d'entrée dans l'étalonnage du modèle du CEPMMT. Enfin, on peut s'interroger également sur la représentativité des températures mesurées ponctuellement sur ces stations météorologiques.

Les données issues du modèle de CEPMMT présentent donc une certaine incertitude. Néanmoins, ayant le souci de prendre en compte la variabilité spatiale des températures de l'air, nous préférons ces données du modèle à une simple interpolation des données des 4 stations météorologiques.

Synthèse des températures de l'air

Rappelons que la méthode de synthèse choisie est celle basée sur le maximum de T_s . A chaque valeur (pixel) de T_s choisie sur une période de 10 jours a été associée la valeur de T_a du même jour. On dispose ainsi de 17 synthèses pour la température de surface et 17 synthèses pour la température de l'air, qui nous ont permis de calculer les indices SDD correspondants.

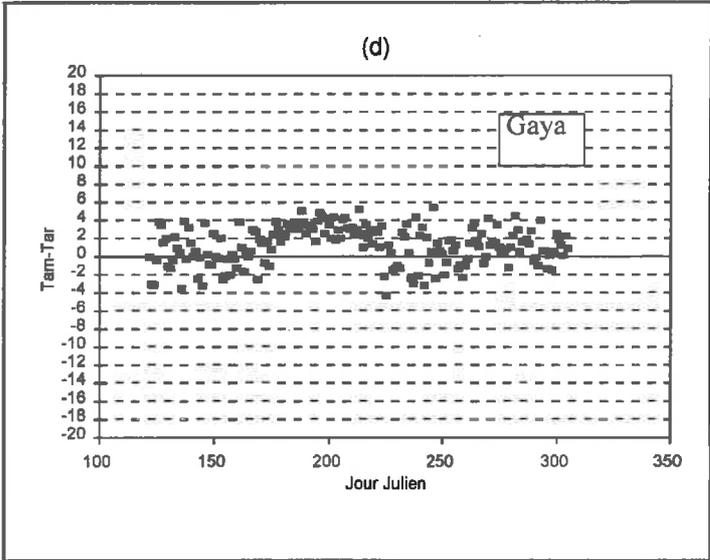
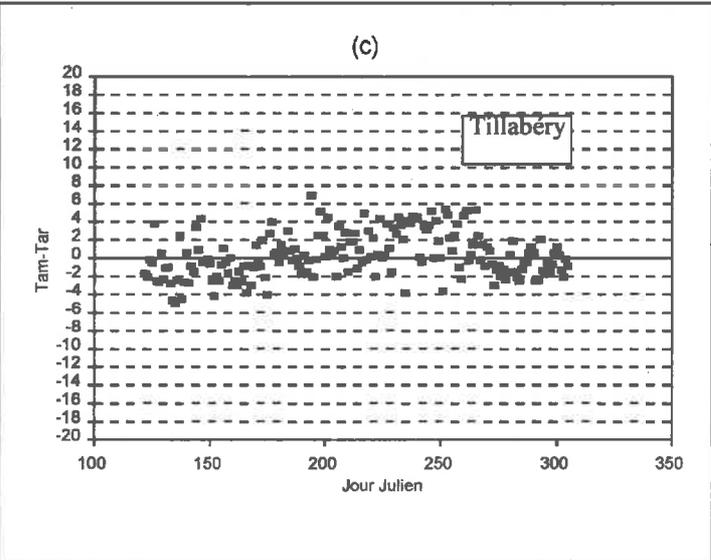
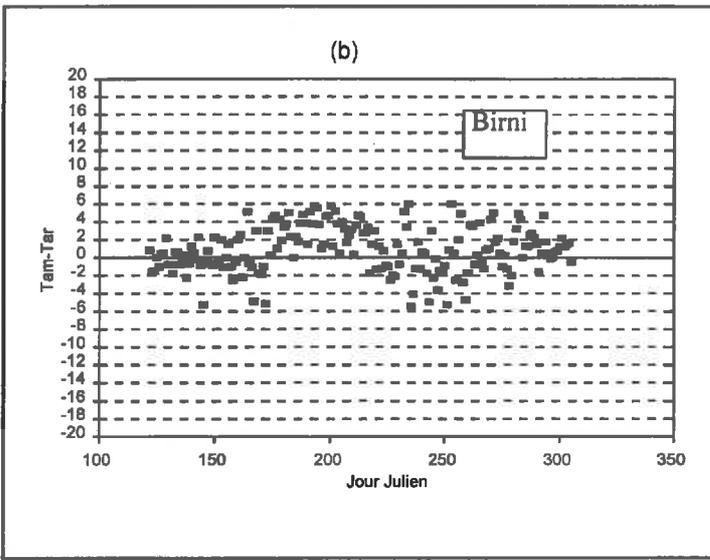
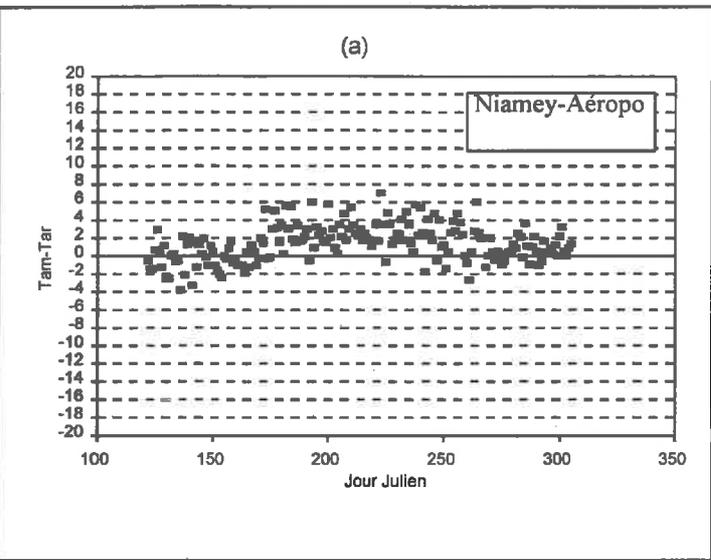
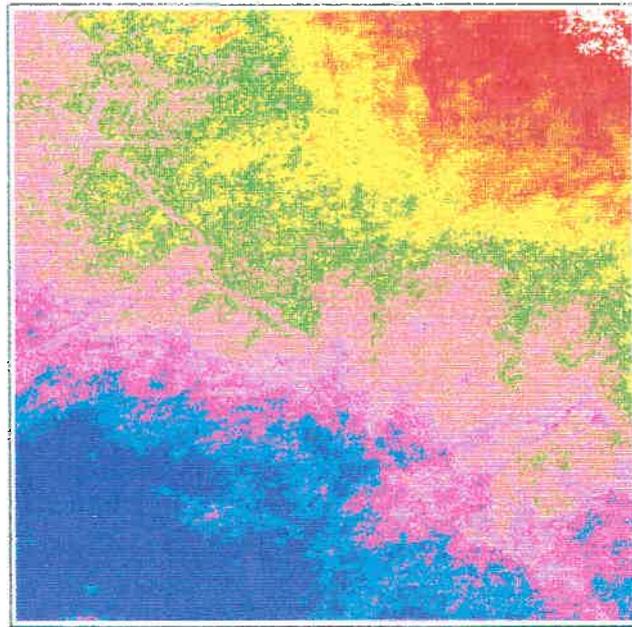


Figure 6.9: Ecart entre la température estimée en 1991 par le modèle du CEPMMT (Tam) et mesurée (Tar) pour 4 stations météorologiques (a) Niamey, (b) Birni, (c) Tillabéry et (d) Gaya.



SDD de la zone P4AS 1991	
 0-20	 21-40
 41-60	 61-80
 81-100	 101-120
 121-140	 141-160
 161-180	 181-200

Figures 6.10: Classification du SDD (en °C) de toute la zone P4AS (0°-5° E, 11°-16° N) pour la saison 1991.

6.5.3 SDD DU CYCLE

Le SDD calculé sur l'ensemble du cycle (1er Mai au 21 Octobre) est représenté par la figure 6.10. Il présente un gradient nord-sud, lié aux caractéristiques agroclimatiques de la zone étudiée, avec des faibles valeurs au sud (de l'ordre de 20°C) où le couvert végétal est plus dense et la pluviométrie plus abondante, et des fortes valeurs au nord (de l'ordre de 180°C), où le climat est plus aride avec une pluviométrie faible et mal répartie.

6.5.4 EVOLUTION TEMPORELLE DU SDD

Pour décrire le SDD mesuré à une échelle spatiale de 1.1 km, avec un pas de temps de 10 jours, on a choisi deux sites situés à des positions géographiques extrêmes du domaine d'étude: Bengou et Chikal.

* Bengou est localisé au sud du domaine, à une latitude de 11°58' N et une longitude de 3°33' E. La pluviométrie annuelle était de 719 mm en 1991.

* Chikal est situé au nord, à une latitude de 14°15' N et une longitude de 3°27' E. La pluviométrie annuelle était de 406 mm en 1991.

La figure 6.11 montre l'évolution temporelle de SDD et de la pluviométrie du 1er Mai au 21 Octobre pour ces sites. Deux remarques peuvent être faites: d'une part les valeurs moyennes de SDD du site de Bengou sont plus importantes que celles de Chikal comme on pouvait s'y attendre du fait des pluviométries, et d'autre part le SDD traduit assez bien les périodes de déficit hydrique.

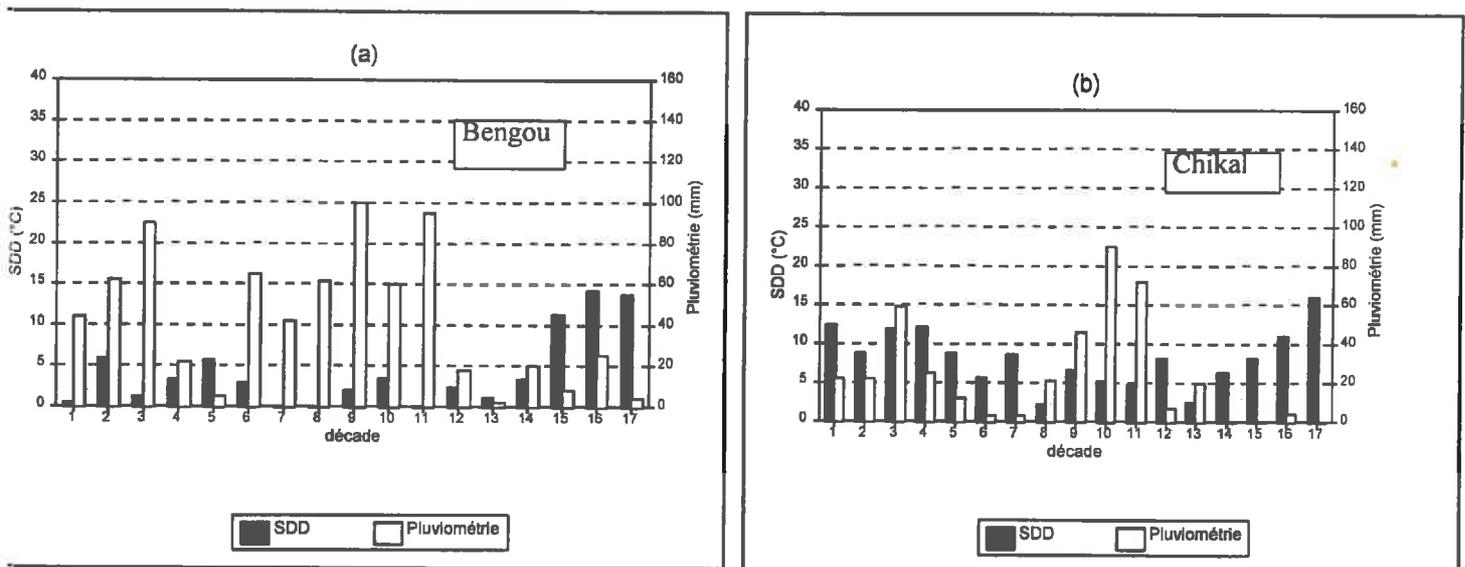


Figure 6.11: SDD et pluviométrie décadaire (Mai-Octobre 1991) des sites (a) Bengou et (b) Chikal.

La figure 6.12 montre l'évolution temporelle du SDD cumulé, pour les sites de Bengou et Chikal. Les SDD en fin de cycle pour les deux sites sont très différents: 69°C pour Bengou et 139°C pour Chikal. Cette différence s'explique par le meilleur développement du couvert végétal constaté à Bengou suite à une pluviométrie plus abondante et mieux répartie, ce qui entraîne une évapotranspiration plus importante, et une faible différence entre Ts et Ta. A l'inverse pour le site de Chikal, la pluviométrie n'était pas suffisante, et mal répartie sur le cycle cultural, le couvert végétal est peu dense, et les différences entre Ts et Ta sont donc très importantes.

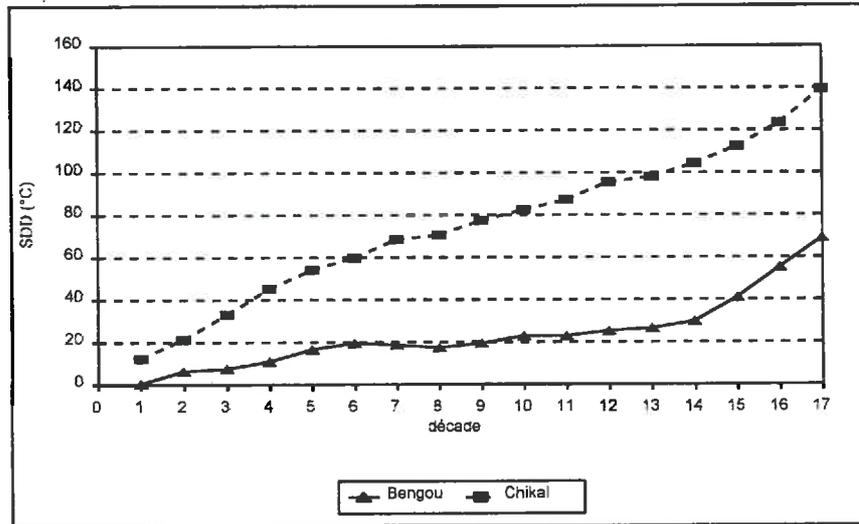


Figure 6.12: SDD cumulé des sites Bengou et Chikal (Mai à Octobre 1991).

6.5.5 RELATION ENTRE SDD ET VARIABLES AGROCLIMATIQUES

Pluviométrie cumulée

La relation qui lie le SDD à la pluviométrie pour la saison 1991 peut être considérée comme linéaire ($r^2=0.72$) (Figure 6.13a). Cette relation montre bien la sensibilité du SDD à la pluviométrie et par conséquent à l'état hydrique du couvert végétal.

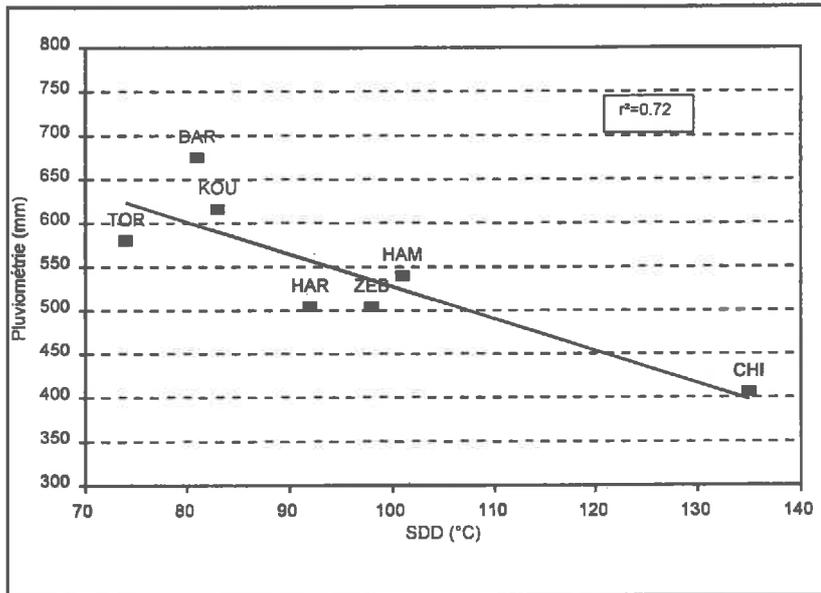
Evapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle est une variable climatique, que nous avons calculée à partir de la formule de Penman. Elle n'est pas causale comme l'ETR, mais traduit bien le gradient pluviométrique.

L'ajustement linéaire entre le SDD total et l'évapotranspiration potentielle montre une forte corrélation entre ces deux variables (Figure 6.13b), avec un coefficient de corrélation r^2 égal à 0.77.

Ces résultats montrent l'intérêt de SDD pour traduire le fonctionnement hydrique du couvert végétal.

(a)



(b)

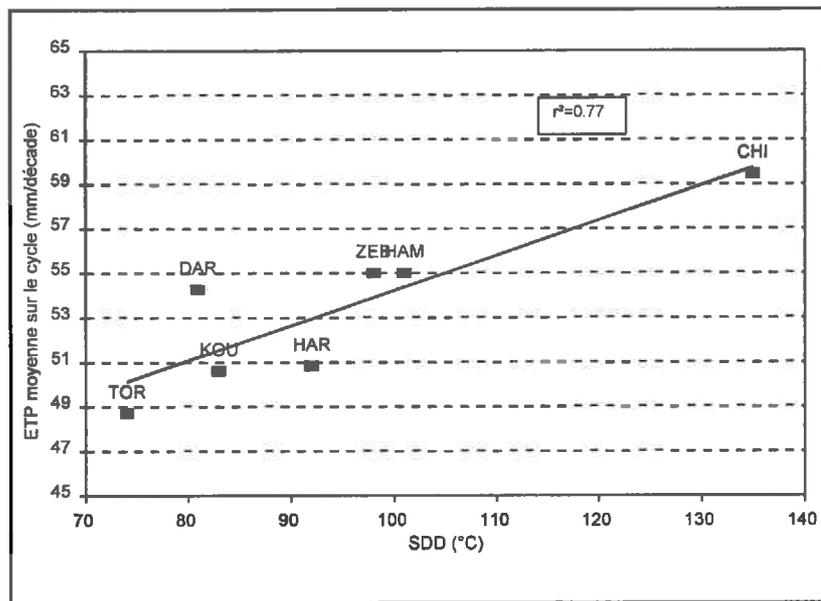


Figure 6.13: Relations (a) SDD-pluviométrie et (b) SDD-ETP, établies pour les 7 sites P4AS et pour la saison 1991.

6.5.6 RELATION ENTRE SDD ET EFFICIENCE DE CONVERSION ϵ_p

Les valeurs d'efficacités de conversion calculées ont été mises en relation avec le SDD des sites (Tableau 6.7). La figure 6.14a montre la relation entre les SDD et les efficacités de conversion calculées en utilisant la relation globale entre le NDVI et l'efficacité d'absorption. Cette relation est linéaire avec un coefficient de corrélation égal à 0.73.

La relation obtenue entre le SDD et les efficacités de conversion calculées en utilisant les relations de Myneni présente une meilleure linéarité (Figure 6.14b), avec un coefficient de corrélation égal à 0.81.

L'indice SDD est donc un paramètre pertinent pour expliquer la variabilité des efficacités de conversion ϵ_p . Les relations linéaires que nous avons mises en évidence seront utilisées par la suite dans la mise en oeuvre du modèle de Monteith pour la saison 1992.

Site	SDD (°C)	Relation Globale ϵ_p (g/MJ)	Relations Myneni ϵ_p (g/MJ)
Chikal	135	1.96	1.02
Darkinde	81	3.04	1.91
Zebenfiti	98	2.50	1.57
Hamdallaye	101	2.08	1.22
Kouré	83	2.57	1.57
Harikanassou	92	2.48	1.52
Torodi	74	3.17	1.92

Tableau 6.7: SDD et efficacités de conversion estimées à partir du modèle de Monteith pour les 7 sites P4AS (saison 1991).

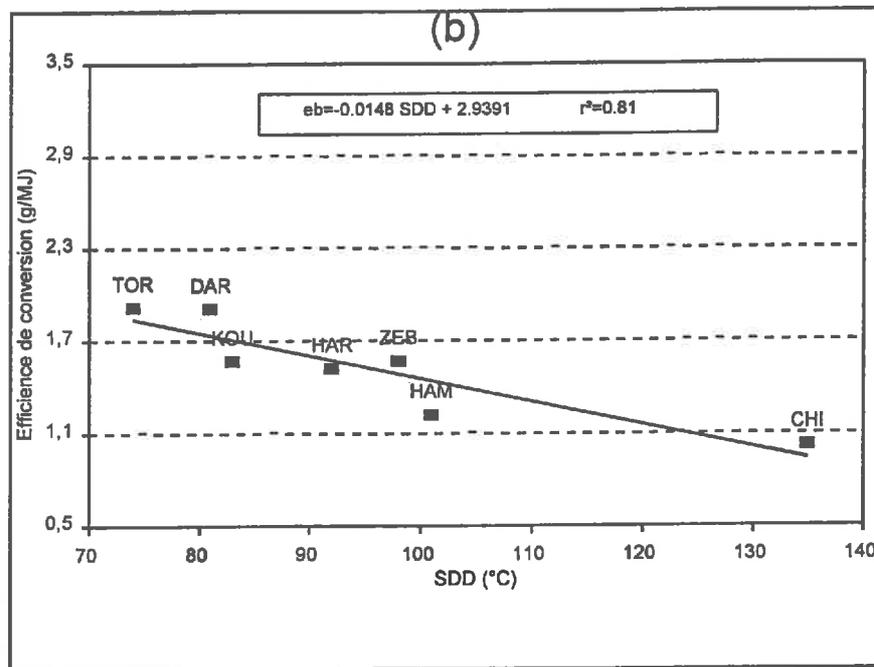
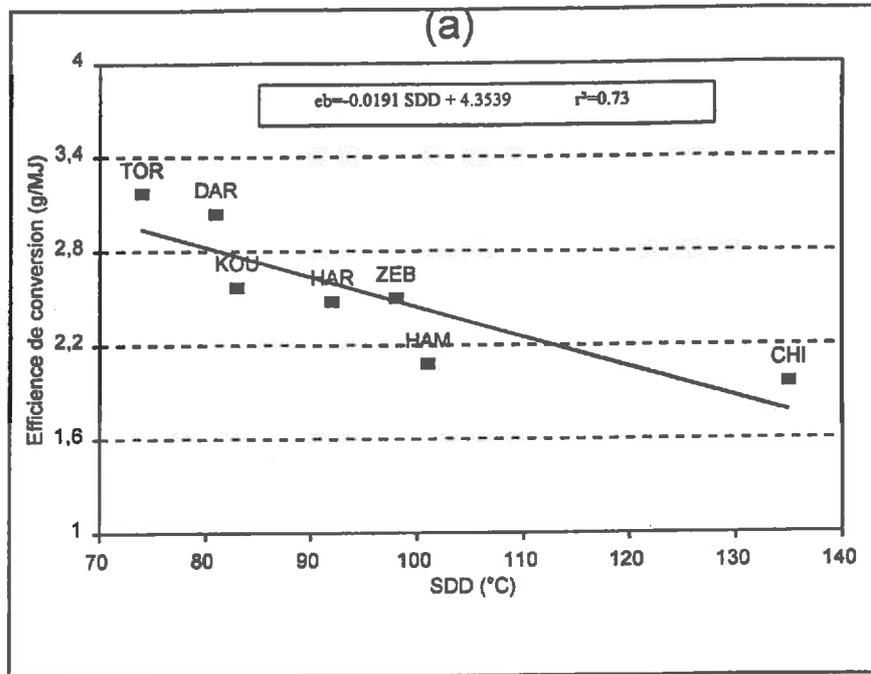


Figure 6.14: Relation entre SDD et efficacité de conversion du mil, établie pour les 7 sites P4AS, en utilisant (a) la relation globale et (b) les relations de Myneni pour estimer l'efficacité d'absorption.

6.6 CONCLUSION

Nous avons tout au long de ce chapitre abordé l'étalonnage de tous les paramètres du modèle de production de Monteith pour mieux appréhender la production primaire nette des couverts de mil dans une zone sahélienne de 270.000 km². Nous allons brièvement passer en revue les différents paramètres de ce modèle.

Le rayonnement global n'est mesuré que sur quelques stations météorologiques de la zone d'étude. Les mesures ne peuvent donc être spatialisées, et nous avons dû avoir recours aux cartes de RG réalisées par la méthode développée par Dedieu et al. (1987b). Ces cartes ont été élaborées pour la saison 1983, mais la mise en évidence de la faible variabilité interannuelle du RG décadaire nous a permis de les utiliser pour 1991. Cependant, il est souhaitable d'utiliser à l'avenir les données de RG spécifiques à chaque saison, et l'obtention de ces données ne devrait pas constituer une limitation à cette méthode. En effet, plusieurs laboratoires sont actuellement en train de développer des algorithmes qui permettent d'estimer le RG, et l'intégration de ces algorithmes dans une chaîne de traitement de données satellitaires permettra de fournir en temps réel ces cartes de RG.

Pour ce qui concerne l'efficacité climatique, sa faible variabilité a été démontrée à plusieurs reprises, et la prise en compte d'une valeur constante tout le long du cycle et pour toute la zone ne conduit pas à une imprécision sensible.

L'ajustement de l'efficacité d'interception est, quant à lui, beaucoup plus important. En effet, la linéarité qui existe entre ϵ_a et NDVI est très sensible à la structure du couvert végétal et aux configurations géométriques. Ces deux effets coexistent quand on utilise le NDVI calculé avec les données AVHRR.

Dans notre étude, les parties végétales sèches ont été considérées comme négligeables durant toute la période de croissance végétale. Cette hypothèse nous autorise à confondre la proportion ϵ_i de RPA intercepté par le couvert végétal et déterminée par la relation ϵ_i -NDVI, avec la proportion ϵ_a de RPA réellement absorbée pour l'assimilation chlorophyllienne.

Deux méthodes ont été utilisées pour estimer ϵ_a . La première est basée sur une relation globale, qui fait correspondre au NDVI du sol une absorption nulle, et à un NDVI maximum de 0.9 une absorption maximum de 0.95. La deuxième est basée sur des résultats de simulations avec le modèle de transfert radiatif de Myneni. La première méthode est très facile à mettre en oeuvre, mais elle ne tient compte ni de la configuration géométrique de la mesure, ni de la structure du couvert végétal observé par le satellite. Ces limitations sont levées en utilisant le modèle de Myneni, qui nous a permis de constituer un jeu de relations pour différentes configurations géométriques. Malheureusement le signal AVHRR ne représente pas un signal issu uniquement du mil, mais de plusieurs unités de paysage très contrastées. Les recherches actuelles sur une modélisation prenant en compte ces mélanges devraient permettre à l'avenir d'établir des relations entre ϵ_a et NDVI(AVHRR), en connaissant la proportion de chaque unité de paysage contribuant au signal satellitaire.

Enfin, pour ce qui concerne l'efficacité de conversion ϵ_p , la prise en compte de l'état hydrique du sol nous a paru primordiale. En effet, la pluviométrie représente le facteur de variation le plus important qui contrôle le développement de la végétation au Sahel. Des relations linéaires entre l'indice de stress SDD et ϵ_p ont été établies pour les sites P4AS bien que le SDD calculé avec les données AVHRR ne soit pas représentatif de celui du mil, mais d'un mélange de couverts végétaux. Nous avons considéré toutefois que le stress hydrique lié à un déficit hydrique est le même pour tous les couverts végétaux.

CHAPITRE 7:

MISE EN OEUVRE DU MODELE DE PRODUCTION

(SAISON 1992)

CHAPITRE 7

MISE EN OEUVRE DU MODELE DE PRODUCTION POUR LA SAISON 1992

Dans un premier temps, la production végétale du mil sera estimée sur chacun des sites P4AS avec le modèle de Monteith. A partir des NDVI du capteur AVHRR, l'efficacité d'absorption sera estimée de deux manières: d'une part avec la relation globale, et d'autre part avec les relations de Myneni. Puis nous analyserons en détail les différentes incertitudes liées à la mise en oeuvre du modèle.

Dans un deuxième temps, nous spatialiserons les estimations en réalisant une cartographie des rendements sur l'ensemble de la zone d'étude.

Enfin, nous tenterons d'analyser l'apport des réflectances pures du mil estimées par la résolution des systèmes d'équations.

7.1 ESTIMATION DES RENDEMENTS DU MIL A PARTIR DES DONNEES AVHRR.

On dispose d'une série d'images NOAA-AVHRR couvrant toute la saison des pluies 1992, et corrigées des effets de l'atmosphère. Les synthèses d'images qui permettent d'éliminer les nuages ont été faites par pas de 10 jours, en adoptant la méthode MVC.

Les 16 images de synthèse ainsi obtenues contiennent en plus de l'indice de végétation, les angles zénithaux et azimuthaux de visée et solaires, caractérisant la configuration géométrique de la mesure.

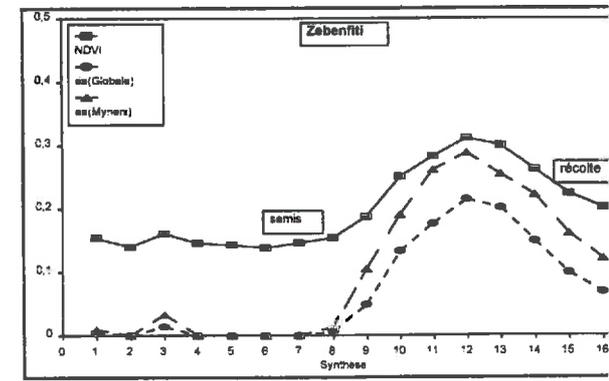
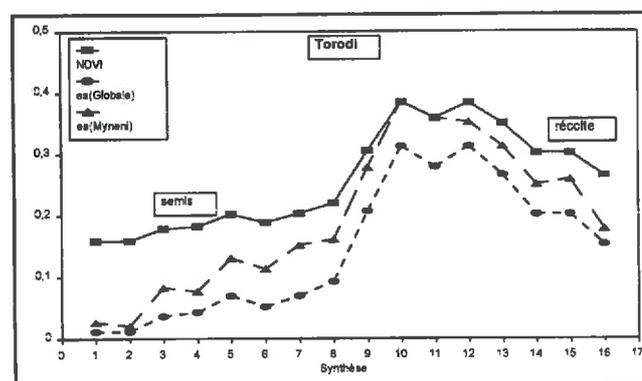
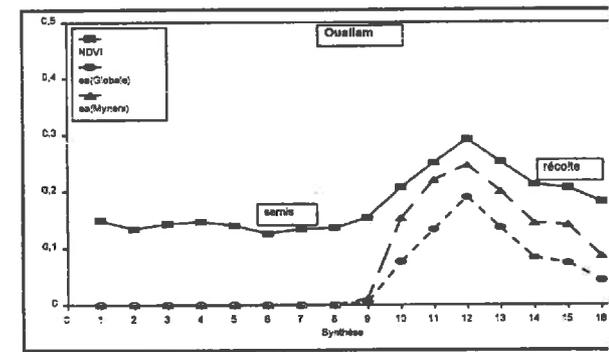
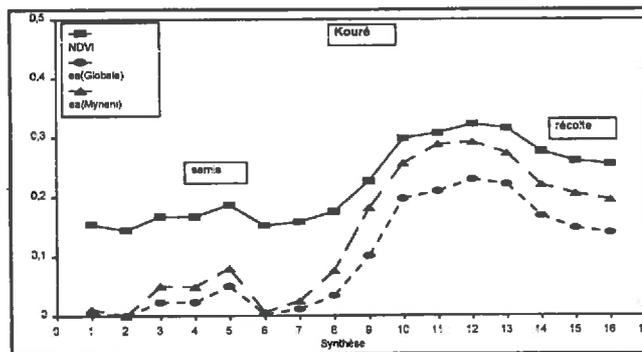
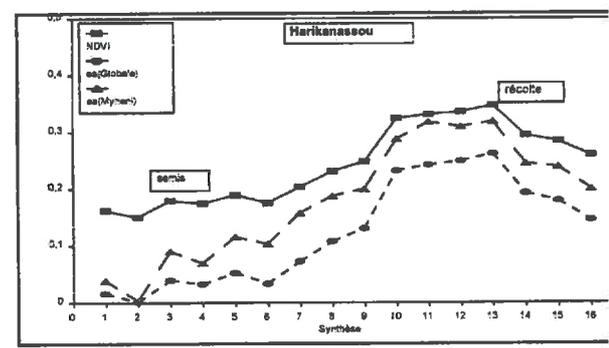
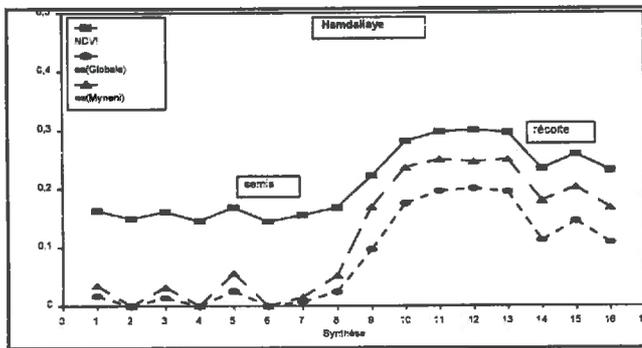
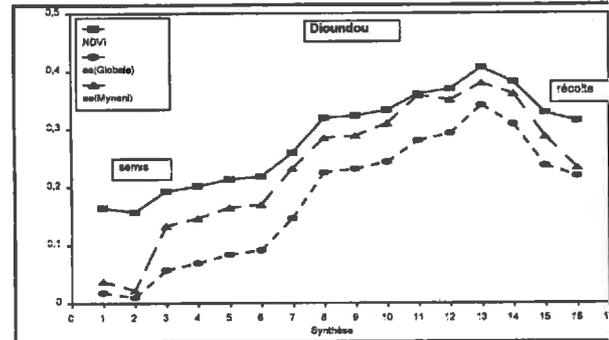
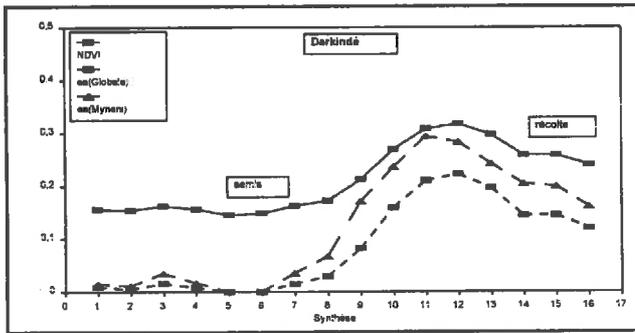
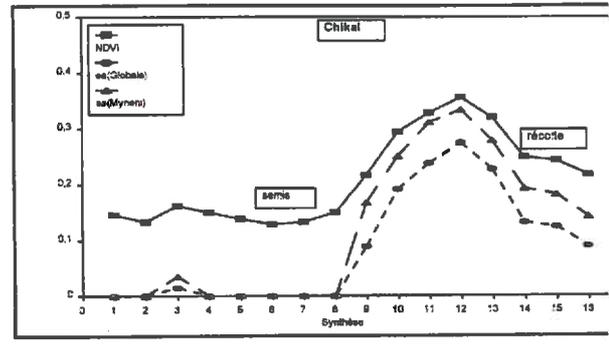
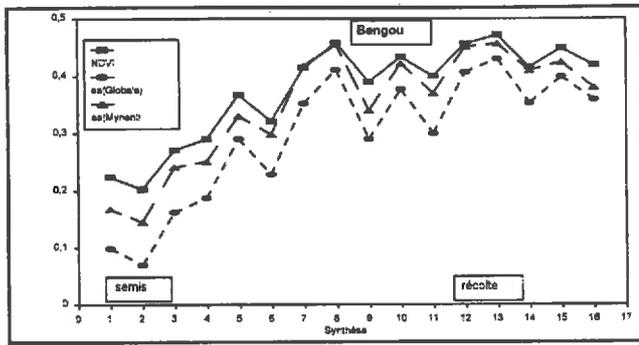


Figure 7.1: Evolution temporelle du NDVI et de l'efficace d'absorption calculée avec la relation globale et les relations de Myneni, pour les 10 sites P4AS, à partir des synthèses (1er Mai au 25 Octobre 1992).

7.1.1 PERIODE D'INTEGRATION

Pour les sites P4AS, on s'est basé sur les observations in situ pour fixer la durée d'intégration du modèle. Le tableau 7.1 fournit des informations concernant la date de semis et la date de récolte de la saison 1992 pour chacun des sites.

Comme nous l'avons fait pour l'étalonnage des paramètres du modèle (chapitre 6), seule la phase végétative sera prise en compte. La période d'intégration du modèle de Monteith se fera donc en fonction des dates de semis et de récolte, en commençant 20 jours après le semis, et en s'arrêtant 20 jours avant la récolte.

Site	Date de semis	Date de récolte
Ouallam	03 Juillet	25 Octobre
Chikal	18 Juillet	10 Octobre
Darkinde	03 Juillet	10 Octobre
Zebenfiti	18 Juillet	30 Octobre
Hamdallaye	03 Juillet	26 Septembre
Kouré	14 Juin	25 Septembre
Harikanassou	05 Juin	19 Septembre
Torodi	28 Mai	26 Octobre
Dioundou	20 Mai	30 Octobre
Bengou	30 Mai	10 Septembre

Tableau 7.1: Dates de semis et de récolte observées sur les sites P4AS.

7.1.2 EFFICIENCE D'ABSORPTION.

Une fois la position des sites identifiée en ligne et en colonne sur les images NOAA, on a calculé les indices NDVI moyens de chacun des sites P4AS pour les 16 synthèses.

La figure 7.1 montre les évolutions temporelles des NDVI et des efficacités d'absorption calculées en utilisant la relation globale et les relations de Myneni.

Comme on l'a observé auparavant, pour tous les sites, l'absorption est plus forte avec les relations de Myneni qu'en utilisant la relation globale. Mais de plus, l'évolution de l'absorption calculée avec les relations de Myneni est moins bruitée que celle calculée avec la relation globale.

Au début du cycle, on observe pour certains sites une absorption non nulle qui ne correspond pas à un réel développement de la végétation, mais au bruit lié à l'indice de végétation. Ceci est observé sur les sites localisés au nord, qui sont caractérisés par une croissance tardive de la végétation (Chikal, Darkindé, Zebenfiti, Kouré, Hamdallaye).

7.1.3 EFFICIENCE DE CONVERSION

Une relation linéaire entre le SDD et l'efficacité de conversion du mil a été établie pour la saison 1991. Mais l'efficacité de conversion correspond à deux modes de calcul de ϵ_a : relation globale et relations de Myneni.

Calcul du SDD et intercomparaison.

Le SDD de la saison 1992 a été calculé de la même manière que celui de la saison 1991, en utilisant les températures de surface estimées à partir des données NOAA, et les températures de l'air issues du Modèle de Circulation Générale du CEPMMT.

Pour étudier l'évolution du SDD de la saison 1992, on a choisi les deux mêmes sites analysés pendant l'étalonnage (§6.3): Bengou et Chikal. Ces deux sites ont une climatologie bien contrastée, et leur pluviométrie respective sur l'ensemble de la saison 1992 est 771 mm et 346 mm respectivement.

La figure 7.2 montre l'évolution du SDD et la pluviométrie pour les sites de Bengou et Chikal. Pour le site de Bengou, le SDD est faible dès le début du cycle car les pluies y sont précoces, et il est élevé en fin de cycle à la sénescence. Pour le site de Chikal, le SDD est élevé en début et fin de cycle quand le couvert est rare ou sénéscent, et faible en milieu de cycle quand le couvert est bien développé.

La figure 7.3 montre le SDD cumulé pour les deux sites. Le SDD cumulé de Bengou et Chikal atteint 85°C et 135°C respectivement, alors que pour la saison 1991 il était de 69°C pour Bengou et 139°C pour Chikal. Ceci est à mettre en rapport avec la pluviométrie de Bengou et Chikal qui a atteint 771 mm et 346 mm respectivement, alors que pour la saison 1991 elle était de 719 mm pour Bengou et 406 mm pour Chikal.

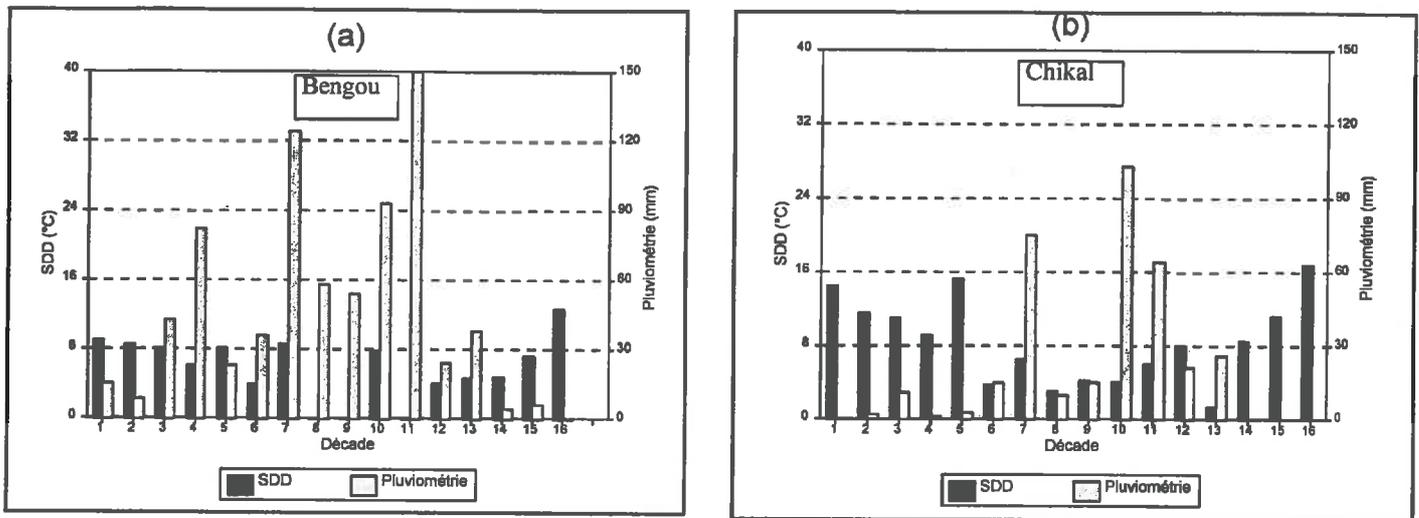


Figure 7.2: SDD et pluviométrie décaire des sites (a) Bengou et (b) Chikal. (1er Mai au 25 Octobre 1992).

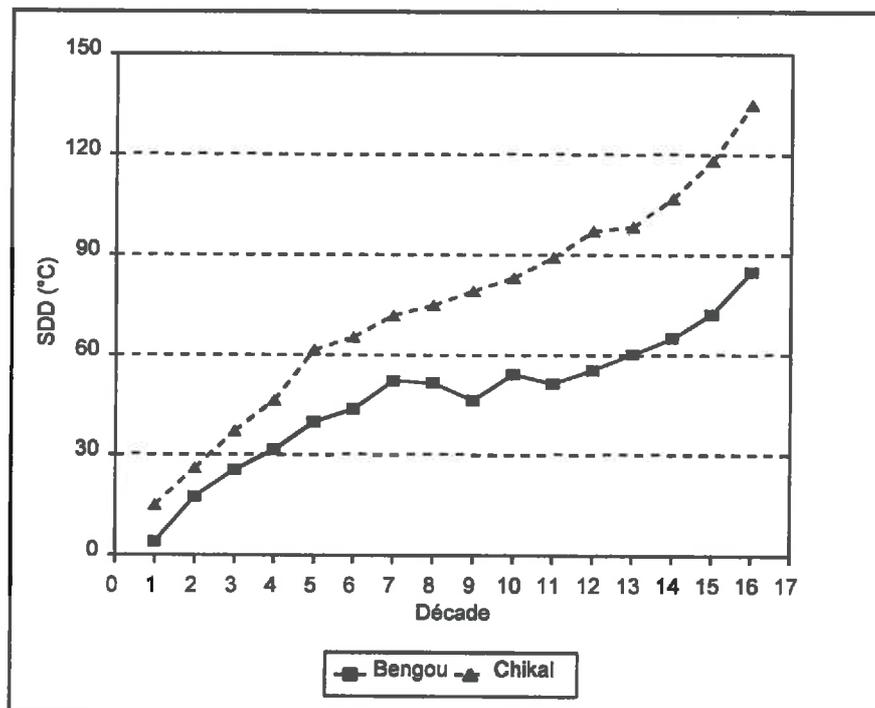


Figure 7.3: SDD cumulé des deux sites (a) Bengou et (b) Chikal. (1er Mai au 25 Octobre 1992).

Calcul de l'efficacité de conversion

L'efficacité de conversion des sites P4AS a été estimée à partir des SDD, en utilisant les 2 relations linéaires établies sur la saison 1991.

$$\begin{aligned}\epsilon_b &= -0.01909 \cdot \text{SDD} + 4.3539 && \text{Relation Globale} \\ \epsilon_b &= -0.01483 \cdot \text{SDD} + 2.9391 && \text{Relations de Myneni}\end{aligned}$$

Les efficacités de conversion des sites P4AS sont reportées dans le tableau 7.2. On constate que Dioundou présente la plus forte efficacité de conversion (2.76 g/MJ et 1.71 g/MJ respectivement pour la relation globale et les relations de Myneni), et Chikal plus faible (1.77 g/MJ et 0.88 g/MJ respectivement pour la relation globale et les relations de Myneni). Ceci est lié bien évidemment au gradient pluviométrique de la zone, et à la prise en compte de l'indice de stress dans l'estimation de l'efficacité de conversion.

Site	SDD °C	Relation Globale ϵ_b (g/MJ)	Relations de Myneni ϵ_b (g/MJ)
Ouallam	130	1.85	1.01
Chikal	139	1.77	0.88
Darkindé	105	2.35	1.38
Zebenfiti	112	2.21	1.27
Hamdallaye	100	2.44	1.45
Kouré	96	2.51	1.51
Harikanassou	104	2.37	1.39
Torodi	84	2.75	1.69
Dioundou	83	2.76	1.71
Bengou	85	2.75	1.69

Tableau 7.2 : Efficacités de conversion des sites P4AS pour la saison 1992.

7.1.4 ESTIMATION DE LA MATIERE SECHE DU MIL

La matière sèche des sites a ensuite été estimée en utilisant ces efficacités de conversion. Les résultats sont présentés dans le Tableau 7.3, où figurent les 2 estimations de matière sèche totale et les erreurs relatives par rapport aux mesures réalisées sur chaque site.

Les erreurs obtenues ne permettent pas de mettre en exergue la fiabilité de l'une ou l'autre méthode. Les erreurs dans les deux cas sont faibles pour certains sites et fortes pour d'autres. Les erreurs relatives sont comprises entre 1.5 % pour Dioundou, et 24.1 % pour Harikanassou dans le cas de la relation globale, et entre 4.8 % pour Bengou et 20.5 % pour Dioundou dans le cas des relations de Myneni (le site de Ouallam n'a pas été considéré dans cette analyse, car il présente des mesures douteuses de matière sèche totale).

Site	MST mesurée (kg/ha)	Relation globale		Relations de Myneni	
		MST estimée (kg/ha)	erreur (%)	MST estimée (kg/ha)	erreur (%)
Ouallam	3229	1731	-46.4	1543	-52.2
Chikal	925	1088	+17.6	1069	+15.5
Darkindé	3314	2931	-11.5	2863	-13.6
Zebenfiti	3257	2856	-12.3	2591	-20.4
Hamdallaye	1373	1465	+6.7	1519	+10.6
Kouré	3608	3684	+2.1	3312	-8.2
Harikanassou	1068	810	-24.1	1201	+12.4
Torodi	3550	3028	-14.7	3177	-10.5
Dioundou	2655	2696	+1.5	3200	+20.5
Bengou	4598	5370	+16.7	4819	+4.8

Tableau 7.3 : Matières sèches mesurées et estimées sur les sites P4AS pour la saison 1992.

La comparaison de la matière sèche mesurée et estimée pour les 10 sites P4AS montre une meilleure corrélation quand on utilise les relations de Myneni ($r^2=0.81$) (figure 7.4b), que lorsque on utilise la relation globale ($r^2=0.74$) (figure 7.4a). Cependant, dans les deux cas les résultats sont très satisfaisants.

Discussion

La principale hypothèse adoptée dans cette démarche consiste à assimiler le signal mesuré par le capteur AVHRR à celui d'une surface de mil. Ceci évidemment n'est pas le cas, car les sites P4AS contiennent d'autres unités de paysage, comme les jachères et les brousses tigrées qui ont un comportement spectral et un fonctionnement différents de celui du mil.

Mais le fait d'étalonner l'efficacité de conversion avec les données de matière sèche du mil des sites P4AS corrige en partie les incertitudes dues à l'hétérogénéité de la surface. Ces efficacités de conversion ne sont pas celles du mil uniquement, mais du mélange des différentes unités de paysage présentes sur le site. Cette approche est justifiée si on considère que la structure du paysage reste invariante dans le temps et dans l'espace, et que toutes les unités de paysage ont le même développement végétatif au cours de la saison (ceci est en partie vrai, car la pluie pilote la croissance de la végétation).

Malgré ces approximations, cette démarche reste intéressante, car elle est relativement simple à mettre en oeuvre, et elle permet des estimations de la production végétale en tenant compte des accidents climatiques.

7.1.5 ESTIMATION DES RENDEMENTS EN GRAIN

L'estimation des rendements en grain est délicate à réaliser car nous sommes obligés d'utiliser un indice souvent controversé appelé indice de récolte (IR). Cet indice représente le rapport entre le rendement en grain et la matière sèche totale aérienne (Donald et Hamblin, 1976). Pour une même variété de mil, l'indice de récolte varie de façon très importante en fonction des différentes perturbations qui interviennent au cours du cycle. Un stress hydrique au moment de la floraison ou de la fructification engendrera en effet une forte baisse de l'indice de récolte.

Les effets du stress hydrique sur le fonctionnement de la plante se traduisent par une réduction globale du rendement en grain. Il est possible de mettre en évidence une relation simple, souvent linéaire, entre le rendement d'une espèce et la satisfaction de ses besoins en eau (Puech et al., 1986; Merrien, 1987). Or cette évaluation globale du déficit hydrique sur l'ensemble du cycle s'avère rapidement insuffisante pour bien comprendre le phénomène, puisque le rendement va être plus ou moins affecté selon l'état de développement de la culture lors de la contrainte (Sionit et Kramer, 1977; Eck et al., 1987).

Certains auteurs (Sudar et al., 1981; Puech et Bouniols, 1986) ont proposé des courbes de sensibilité du rendement à la contrainte hydrique en fonction de l'âge d'une culture de soja. Ainsi, une contrainte appliquée pendant le remplissage du grain peut provoquer jusqu'à 50% de perte de rendement, alors que pour la même contrainte appliquée avant la floraison, la perte ne sera que de 20%. En effet, une contrainte précoce affecte surtout l'appareil végétatif et donc la fonction assimilatrice qui pourra se renouveler. En revanche une contrainte tardive touche le feuillage de façon irréversible en réduisant le nombre et la taille des grains produits.

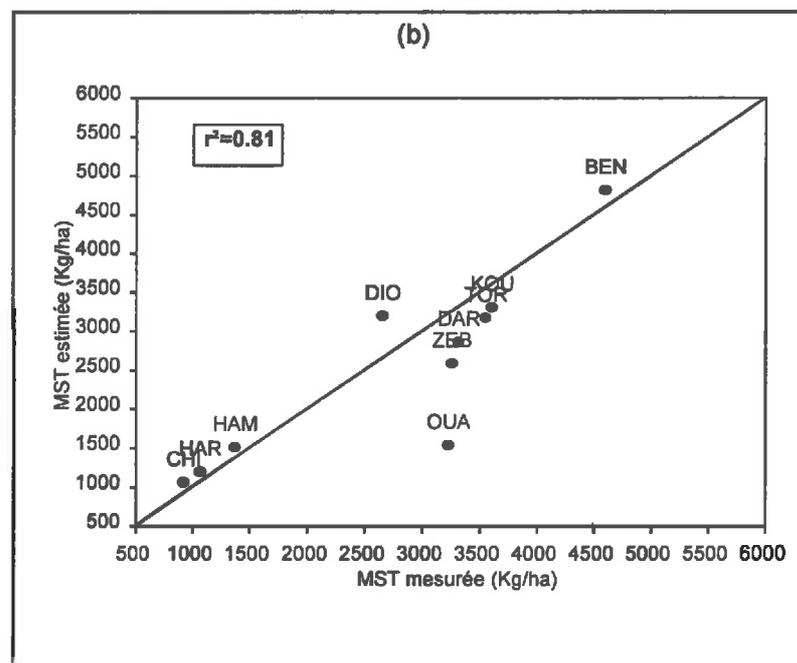
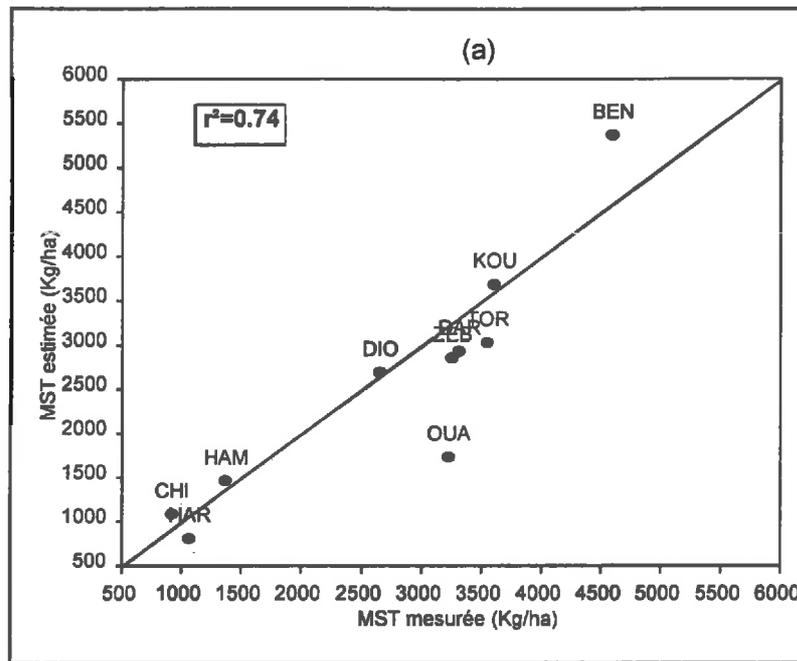


Figure 7.4: Comparaison des matières sèches totales mesurées et estimées en utilisant pour calculer l'absorption (a) la relation globale et (b) les relations de Myneni.

Bégué (1991) a montré que les indices de récolte mesurés en 1988 et 1989 au Niger et au Mali varient entre 0.01 et 0.7, avec une moyenne de 0.202 et un écart type de 0.159. La relation obtenue entre cet indice et la matière sèche totale est présentée sur la figure 7.5. Elle est de la forme :

$$IR = -0.083 \ln(MST) + 0.260 \quad r = 0.44$$

Les mesures de rendement effectuées sur les sites P4AS nous ont permis de calculer les indices de récolte pour les deux saisons 1991 et 1992 (Tableau 7.4).

Ces données ne font pas apparaître de relation entre la matière sèche totale et l'indice de récolte. Mais on constate que les moyennes des indices de récolte des 10 sites sont voisines pour les deux saisons 1991 et 1992 (0.202 et 0.191 respectivement), avec une dispersion relativement faible (écart-type égal à 0.053 et 0.037 respectivement pour les saisons 1991 et 1992).

Nous considérerons donc l'indice de récolte constant et égal à **0.191**, pour estimer le rendement en grain de la saison 1992.

Site	1991			1992		
	Grain	MST	IR	Grain	MST	IR
Ouallam	835	6876	0.121	682	3229	0.211
Chikal	212	1641	0.129	139	925	0.150
Darkindé	802	3925	0.204	549	3314	0.165
Zebenfiti	496	3285	0.151	692	3257	0.212
Hamdallaye	359	1786	0.201	245	1373	0.178
Kouré	659	3172	0.208	611	3607	0.169
Harikanassou	493	2278	0.216	217	1068	0.203
Torodi	1373	4468	0.307	1017	3550	0.286
Dioundou	346	1628	0.212	441	2655	0.166
Bengou	584	4065	0.143	855	4598	0.186
Moyennes	627	2936	0.202	530	2705	0.191

Tableau 7.4: Mesures de rendements en grains et de matière sèche totale, et indices de récolte des 10 sites P4AS pour les deux saisons 1991 et 1992 (les valeurs en gras représentent des données douteuses).

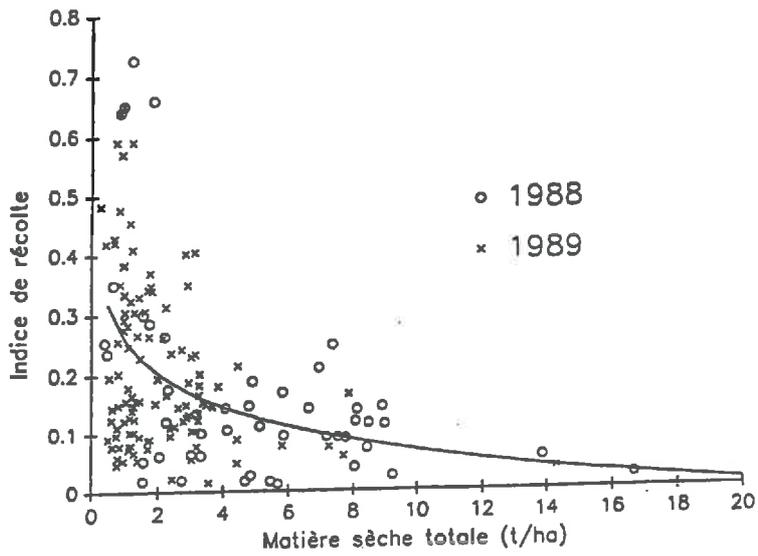


Figure 7.5: Relation entre indice de récolte et matière sèche totale, établie sur 168 parcelles de mil du réseau ESPACE au Niger en 1988 et 1989.

Les rendements en grains des 10 sites P4AS sont reportés dans le tableau 7.5. Dans le cas de la relation globale, les écarts absolus entre le rendement en grains mesuré et estimé varient entre 12 kg/ha pour le site de Darkindé, et 439 kg/ha pour le site de Torodi.

L'utilisation des relations de Myneni donne des estimations de rendements en grains légèrement meilleures, avec des écarts absolus qui varient entre 2 kg/ha pour le site de Darkindé et 410 kg/ha pour le site de Torodi.

Site	Grain mesuré kg/ha	Relation Globale			Relations de Myneni		
		Grain estimé (kg/ha)	écart	erreur (%)	Grain estimé (kg/ha)	écart	erreur (%)
Ouallam	682	331	-351	-51.46	295	-387	56.74
Chikal	139	208	63	49.64	204	65	46.76
Darkindé	549	561	12	2.18	547	-2	-0.36
Zebenfiti	692	545	-147	-21.24	495	-197	-28.46
Hamdallaye	245	278	33	13.46	290	45	18.36
Kouré	611	704	93	15.22	633	22	3.60
Harikanassou	217	154	-63	-29.03	229	12	5.53
Torodi	1017	578	-439	-43.16	607	-410	-40.31
Dioundou	441	515	74	16.78	611	170	38.54
Bengou	855	1025	170	19.88	920	65	7.60

Tableau 7.5: Rendements en grains mesurés et estimés sur les sites P4AS pour la saison 92.

On peut constater sur le site de Torodi que les indices de récolte mesurés sont élevés, 0.307 et 0.286 respectivement en 1991 et 1992, très supérieurs à la valeur moyenne utilisée 0.191. Ceci engendre une importante incertitude sur l'estimation des rendements en grains.

La comparaison des rendements en grains mesurés et estimés est représentée par la figure 7.6, pour les deux méthodes de calcul de l'absorption. Elle montre une dispersion autour de la droite 1:1 qui augmente avec les rendements en grains, et qui est due à la variabilité de l'indice de récolte. Le coefficient de corrélation r^2 est encore une fois plus élevé (0.54) quand on utilise les relations de Myneni que pour la relation globale (0.49).

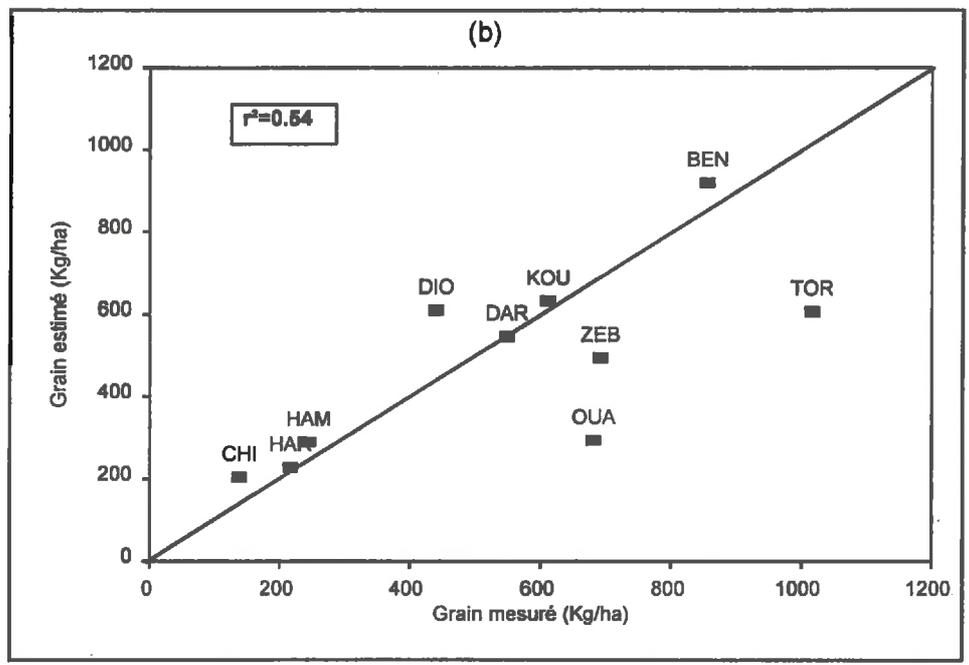
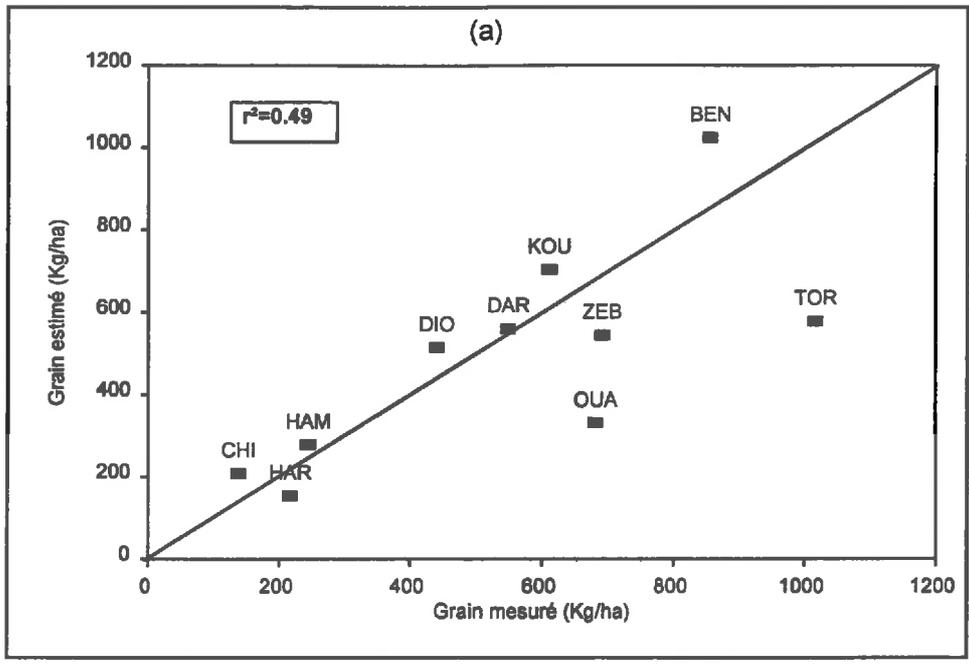


Figure 7.6: Comparaison des rendements en grains mesurés et estimés en utilisant pour calculer l'absorption (a) la relation globale et (b) les relations de Myneni (IR = 0.191).

7.1.6 CALCUL D'ERREUR SUR L'ESTIMATION DE LA PRODUCTION VEGETALE

Nous avons évalué l'erreur commise sur l'estimation de la production végétale du mil à partir du modèle de Monteith:

$$MST = \epsilon_c \cdot \epsilon_a \cdot \epsilon_b \cdot RG$$

Si on prend comme hypothèse l'indépendance de tout les paramètres entre eux, l'erreur de l'estimation de la matière sèche sera la somme des erreurs de chacun des paramètres:

$$dMST = \left(\frac{\partial MST}{\partial \epsilon_b} \right) d\epsilon_b + \left(\frac{\partial MST}{\partial \epsilon_a} \right) d\epsilon_a + \left(\frac{\partial MST}{\partial \epsilon_c} \right) d\epsilon_c + \left(\frac{\partial MST}{\partial RG} \right) dRG$$

où $d\epsilon_b$, $d\epsilon_a$, $d\epsilon_c$ et dRG sont respectivement les erreurs commises sur ϵ_b , ϵ_a , ϵ_c et RG .

En faisant l'hypothèse que les erreurs des 4 variables sont indépendantes, la variance totale est la somme des variances. On a donc :

$$\text{var}(MST) = \epsilon_a^2 \cdot \epsilon_c^2 \cdot RG^2 \cdot \text{var}(\epsilon_b) + \epsilon_c^2 \cdot \epsilon_b^2 \cdot RG^2 \cdot \text{var}(\epsilon_a) + \epsilon_b^2 \cdot \epsilon_a^2 \cdot RG^2 \cdot \text{var}(\epsilon_c) + \epsilon_a^2 \cdot \epsilon_c^2 \cdot \epsilon_b^2 \cdot \text{var}(RG)$$

L'erreur commise sur l'estimation de la production s'écrira :

$$\text{Erreur} (\%) = \frac{\sqrt{\text{var}(MST)} \cdot 100}{MST}$$

Erreur liée à l'efficacité d'absorption

L'efficacité d'absorption est calculée à partir du NDVI, par une relation linéaire de la forme:

$$\epsilon_a = a \cdot \text{NDVI} + b$$

Cette estimation a deux sources d'erreur: une erreur due à l'ajustement non linéaire du profil spectral (e) et une autre due à la régression linéaire entre l'indice de végétation journalier et l'efficacité d'absorption (e').

L'absorption s'écrit :

$$\epsilon_a = a \cdot (\text{NDVI} + e) + b + e'$$

La variance de l'absorption est donc:

$$\text{var}(\epsilon_a) = a^2 \cdot \text{var}(e) + \text{var}(e')$$

Erreur liée à l'efficacité de conversion

L'efficacité de conversion est calculée à partir du SDD, en utilisant une relation linéaire de la forme:

$$\epsilon_b = a \cdot \text{SDD} + b$$

avec

$$\text{SDD} = \sum (T_s - T_a)$$

où T_s est la température de surface et T_a la température de l'air.

Le calcul de l'erreur est effectué de la même manière que pour l'efficacité d'absorption avec cette fois-ci une erreur due au calcul du SDD.

Les erreurs retenues sont de l'ordre de 1.5°K pour la température de surface et 4°K pour la température de l'air.

Calcul d'erreur sur les rendements estimés

Les valeurs moyennes et les variances qui ont été utilisées sont reportées dans le tableau 7.6. Le maximum d'incertitude est lié au calcul de l'efficacité de conversion (21.3%). Cependant notre méthode de calcul de ϵ_b à partir du SDD permet d'avoir une erreur plus faible que celle trouvée dans la littérature, qui est voisine de 29.3% (Ruimy, 1994).

	Moyenne	Ecart-type	Coefficient de variation
SDD (°C)	94.86	16.65	0.175
ϵ_b (g/MJ)	1.83	0.39	0.213
NDVI	0.25	0.007	0.028
ϵ_a	0.20	0.0286	0.143
ϵ_c	0.466	0.006	0.013
RG (MJ) *	20	1.2	0.060
IR	0.191	0.0382	0.200

* d'après Dedieu et al. (1987b)

Tableau 7.6: Caractéristiques statistiques des variables du modèle de Monteith.

Erreur sur l'estimation de la matière sèche totale

La production **décadaire** de matière sèche de mil obtenue avec les valeurs moyennes du tableau 7.6 est de **0.285 t MST ha⁻¹**.

L'erreur relative commise sur l'estimation de la matière sèche du mil en prenant en compte les 4 variables est de l'ordre de **26.4%**. C'est une erreur qui est essentiellement due à l'estimation des efficacités de conversion et d'absorption du mil.

Le tableau 7.7 montre le poids de chaque paramètre dans le calcul d'erreur totale. Le plus important est dû à l'efficacité de conversion, il représente 49.55% de l'erreur totale maximale commise dans l'estimation de la matière sèche. L'erreur due à l'efficacité d'absorption représente 33.25% de l'erreur totale maximale.

Paramètre	ϵ_b	ϵ_a	ϵ_c	RG
Poids dans l'erreur totale (%)	49.55	33.25	3.12	13.95

Tableau 7.7 : Poids de chaque paramètre du modèle dans le calcul d'erreur totale sur la matière sèche.

Erreur sur l'estimation du rendement en grains

L'erreur commise sur l'estimation du rendement en grains est égale à 33%, plus forte donc que celle commise sur la matière sèche (26.4%). Cette erreur est due à la variabilité de l'indice de récolte, dont l'erreur représente 31.74% de l'erreur totale commise sur l'estimation du rendement (Tableau 7.8).

Paramètre	ϵ_b	ϵ_a	ϵ_c	RG	IR
Poids dans l'erreur totale (%)	33.8	22.75	2.06	9.63	31.74

Tableau 7.8: Poids de chaque paramètre du modèle et de l'indice de récolte dans le calcul d'erreur totale du rendement en grains.

7.2 CARTOGRAPHIE DES RENDEMENTS SUR LA ZONE D'ETUDE

7.2.1 CARTE DE RENDEMENTS EN MATIERE SECHE TOTALE

Si l'estimation des productions végétales des sites P4AS est rendue aisée grâce aux observations du terrain qui fournissent les dates de semis et de récolte, il est plus délicat de réaliser une carte de rendements sur toute la zone d'étude qui couvre une surface de 5° en longitude et 5° en latitude.

En effet, pour une telle superficie, on est confronté au problème de la période d'intégration, car les dates de semis et de récolte sont très variables du nord au sud de la zone.

Les dates de semis observées sur les sites varient entre le 20 Mai et le 18 Juillet, alors que les dates de récolte varient entre le 10 Septembre et 30 Octobre. Pour établir une carte de rendements, on a regroupé les dates de semis en trois classes: 1er Juin, 30 Juin et 15 Juillet, et les dates de récolte correspondantes: 10 Septembre, 26 Septembre et 10 Octobre.

On a ainsi pu établir 3 cartes de rendements en matière sèche de toute la zone du projet P4AS (Figures 7.7a, 7.7b et 7.7c), chacune correspondant à une date de semis et une date de récolte homogène pour toute la zone. Pour ces estimations nous avons utilisé uniquement les relations de Myneni dans le calcul de l'efficience d'absorption.

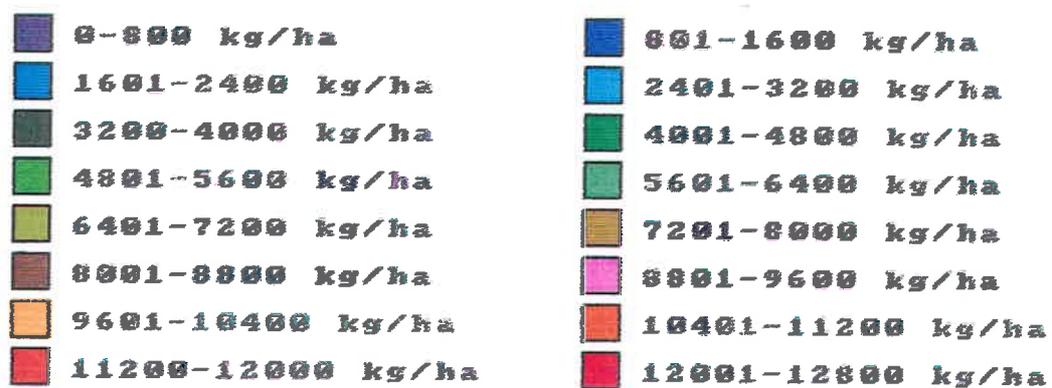
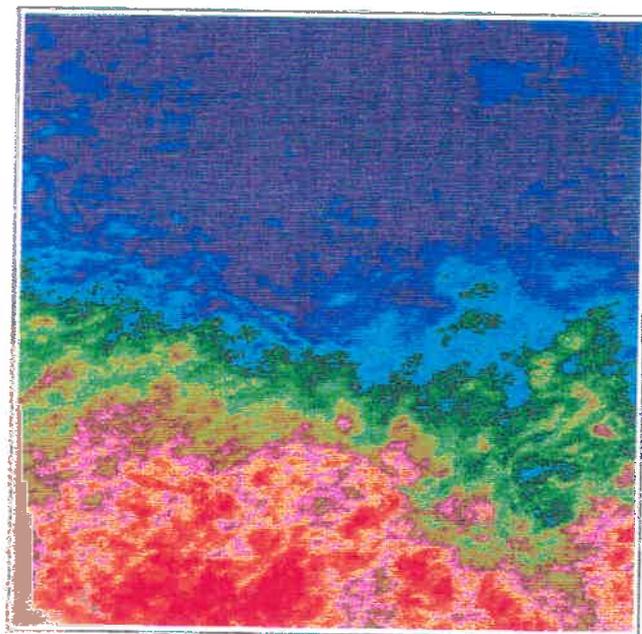
Sur ces 3 cartes, les maximums de matière sèche totale sont élevés (13440 kg/ha, 16440 kg/ha et 13225 kg/ha respectivement pour les dates de semis du 1er Juin, 30 Juin et 15 Juillet). Mais ces valeurs correspondent probablement à d'autres types de végétation que le mil.

Pour la cartographie des rendements du mil seulement, il serait nécessaire d'avoir recours à une carte d'occupation du sol qui situe le domaine cultivé dans la zone d'étude, et qui permet de ne représenter que les rendements du mil

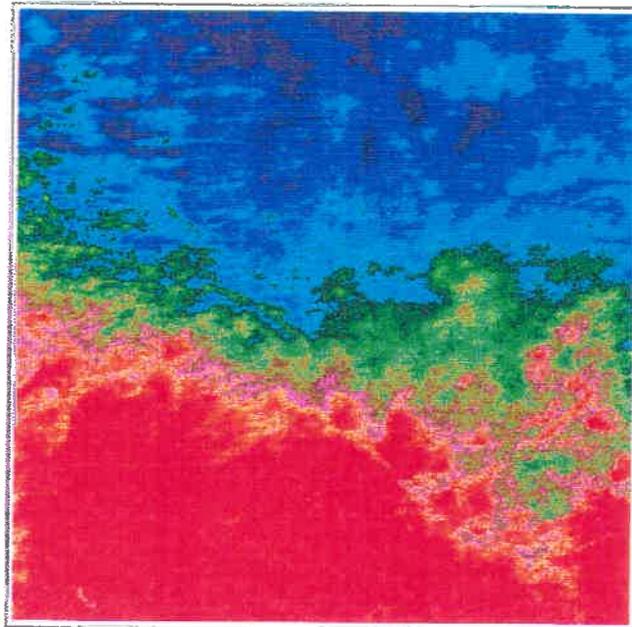
7.2.2 CARTE DES RENDEMENTS EN GRAINS

Les figures 7.8a, 7.8b et 7.8c montrent les 3 cartes de rendements en grains calculées à partir des cartes de matière sèche totale correspondant aux trois dates de semis, en utilisant un indice de récolte constant égal à 0.191.

Comme on s'y attendait, les cartes de rendements en grains présentent des maximum élevés: 2567 ka/ha, 3141 kg/ha et 2526 kg/ha respectivement pour les dates de semis 1er Juin, 30 Juin et 15 juillet. Ces valeurs excessives de rendement ne correspondent pas au domaine cultivé, mais à une végétation naturelle.

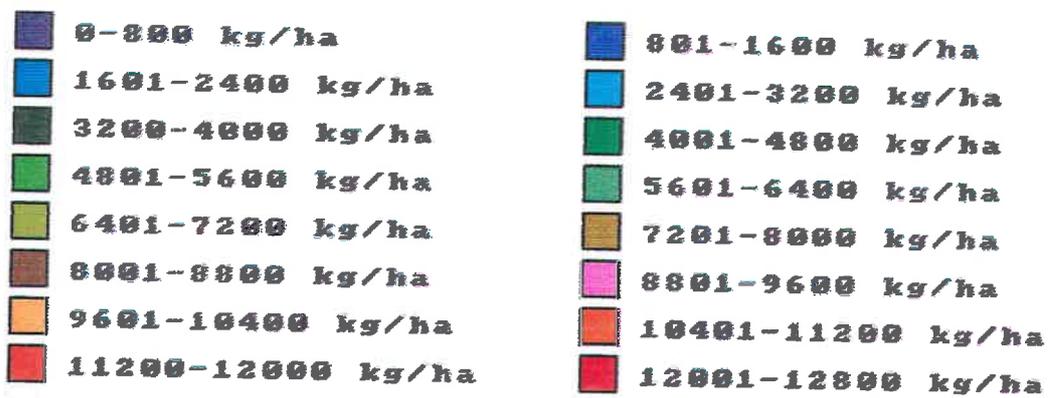
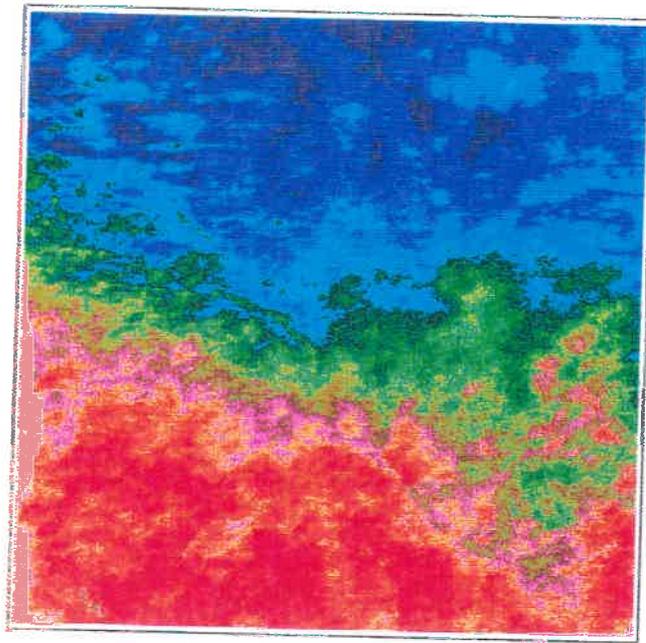


Figures 7.7a): Carte des rendements en matière sèche totale de la zone P4AS, en fixant la date de semis au 1er Juin et la date de récolte au 10 Septembre 1992.

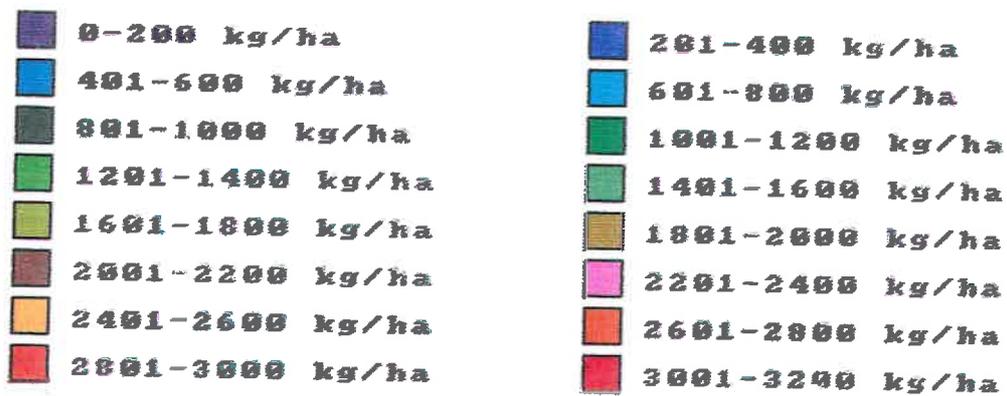
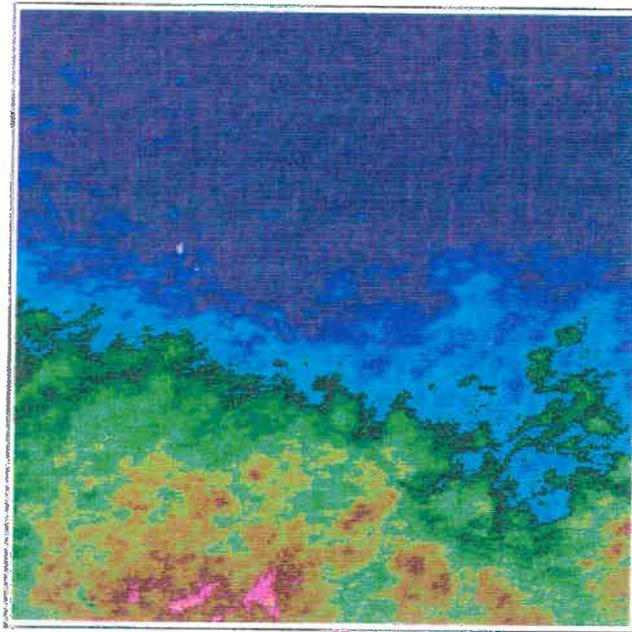


Figures 7.7b): Carte des rendements en matière sèche totale de la zone P4AS, en fixant la date de semis au 30 Juin et la date de récolte au 26 Septembre 1992.



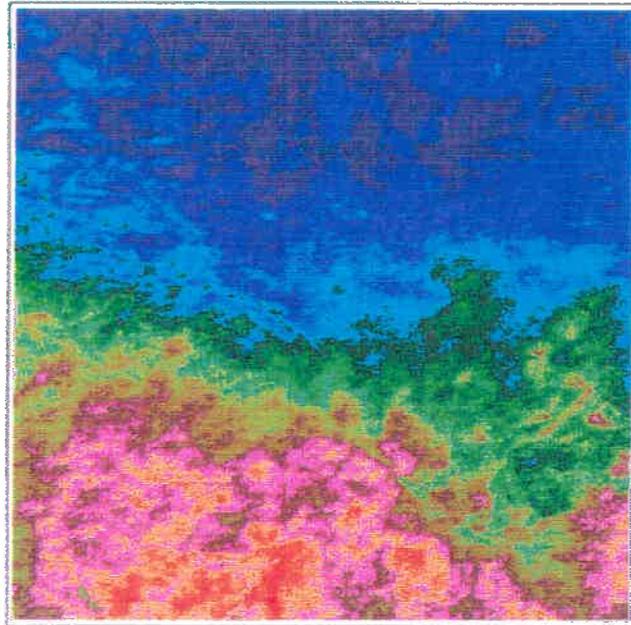


Figures 7.7c): Carte des rendements en matière sèche totale de la zone P4AS, en fixant la date de semis au 15 Juillet et la date de récolte au 10 Octobre 1992.

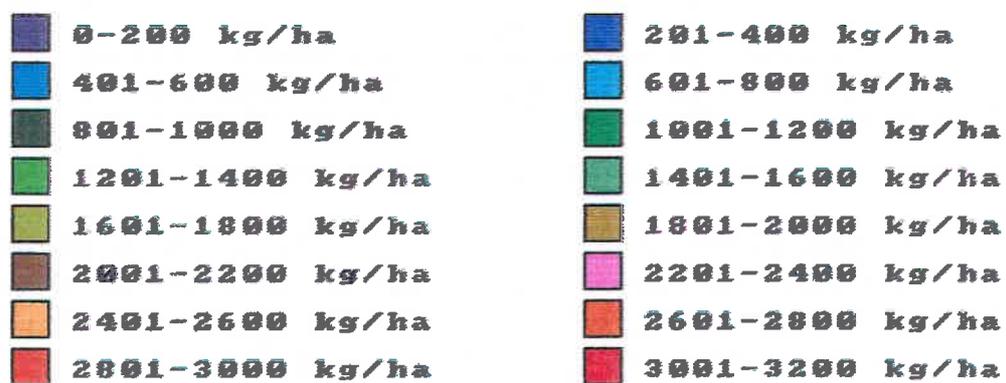
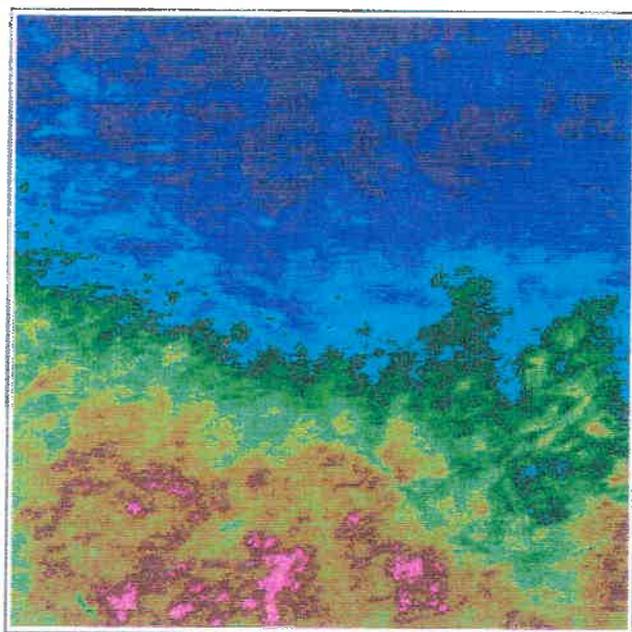


Figures 7.8a): Carte des rendements en grains de la zone P4AS, en fixant la date de semis au 1er Juin et la date de récolte au 10 Septembre 1992.





Figures 7.8b): Carte des rendements en grains de la zone P4AS, en fixant la date de semis au 30 Juin et la date de récolte au 26 Septembre 1992.



Figures 7.8c): Carte des rendements en grains de la zone P4AS, en fixant la date de semis au 15 Juillet et la date de récolte au 10 Octobre 1992.

7.3 APPORT DES REFLECTANCES PURES DU MIL DANS LE MODELE DE PRODUCTION

La démarche suivie jusqu'à maintenant consistait à utiliser le signal AVHRR pour calculer la production végétale du mil. Or le signal basse résolution de ce capteur ne permet pas de différencier le développement du mil de celui des autres types de couvert en place.

7.3.1 DONNEES UTILISEES

La méthode développée dans le chapitre 5 nous a permis d'extraire les réflectances du mil de deux sites du degré carré HAPEX, le site central (SC) et le site sud (SS). Celles-ci vont être utilisées pour estimer l'efficacité d'absorption, puis l'efficacité de conversion moyenne de la saison 1992 sur ces deux sites.

L'intégration est effectuée sur une période fixée à partir des observations locales. Les dates de semis et de récolte des deux sites sont présentées dans le tableau 7.9. De la même manière que précédemment, l'intégration du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé commence 20 jours après le semis et 20 jours avant la récolte.

Site	Date de semis	Date de récolte
SC	13 Juillet	4 Octobre
SS	26 Mai	15 Septembre

Tableau 7.9: Dates de semis et de récolte des deux sites HAPEX.

Les évolutions temporelles du NDVI du mil ne sont pas issues d'images de synthèse comme dans le paragraphe précédent, mais de 16 images journalières, car la méthode développée pour extraire les réflectances pures des unités de paysage nécessite des images journalières pour avoir une meilleure localisation géométrique. Une interpolation linéaire a été appliquée entre les indices de végétation pour avoir des valeurs journalières du NDVI (Figure 7.9). Les efficacités d'absorption sont calculées en utilisant les relations de Myneni. Les angles de visée et solaires des 16 images sont reportés dans la figure 7.10.

Le rayonnement global RG utilisé est celui dérivé des données Météosat et celui calculé à partir des insolation journalières de la station météorologique de Niamey, proche des sites SC et SS.

La matière sèche totale des deux sites SC et SS a été mesurée différemment. Pour le site SC elle a été mesurée régulièrement sur une seule parcelle pendant le cycle cultural. Toutes les feuilles mortes ont été récupérées pour mesurer la matière sèche totale après la récolte. Elle est égale à 1220 kg/ha en fin de cycle (1373 kg/ha sur le site P4AS voisin, Hamdallay). Les mesures de RPA ont été effectuées quotidiennement, et ont ainsi permis de suivre l'évolution de l'efficacité de conversion au cours du cycle. La moyenne de l'efficacité de conversion sur tout le cycle est égale à 2.26 g/MJ (Bégué, 1994, communication personnelle).

La matière sèche du site SS a été mesurée uniquement en fin de cycle, à partir d'un échantillon de 400 carrés de rendement (5m x 5m) sur une superficie égale à 1 ha. L'efficacité de conversion n'a pu être calculée sur ce site faute de mesures de RPA.

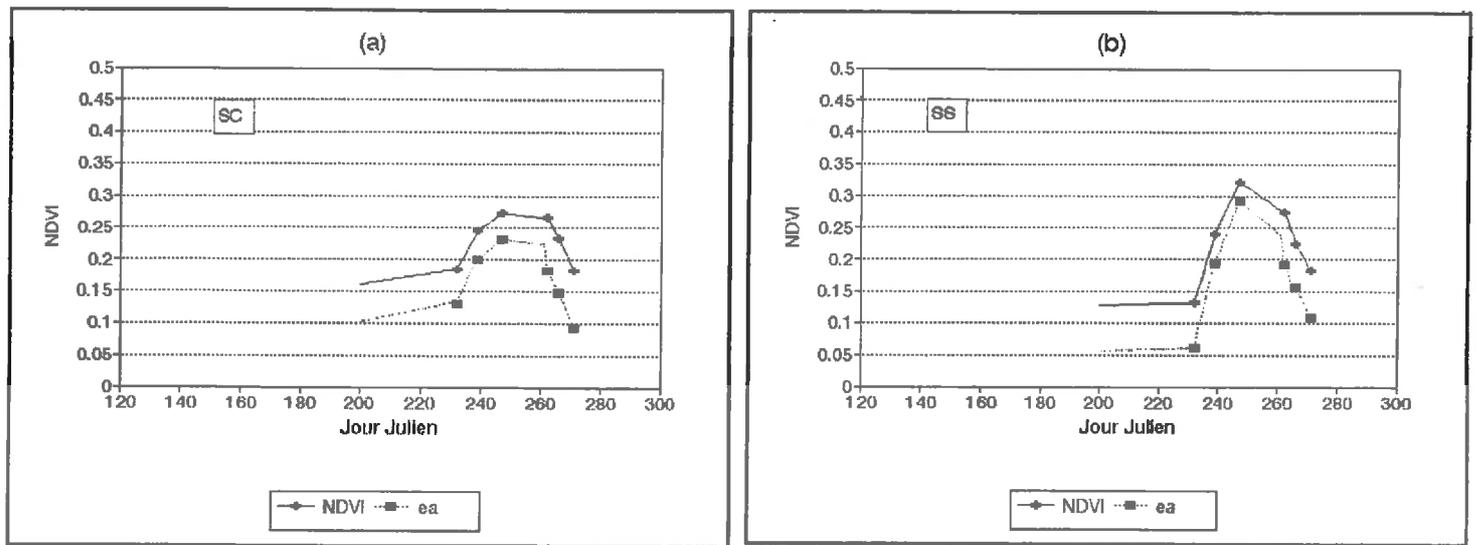


Figure 7.9: Evolution temporelle du NDVI pendant le cycle du mil des sites (a) SC et (b) SS.

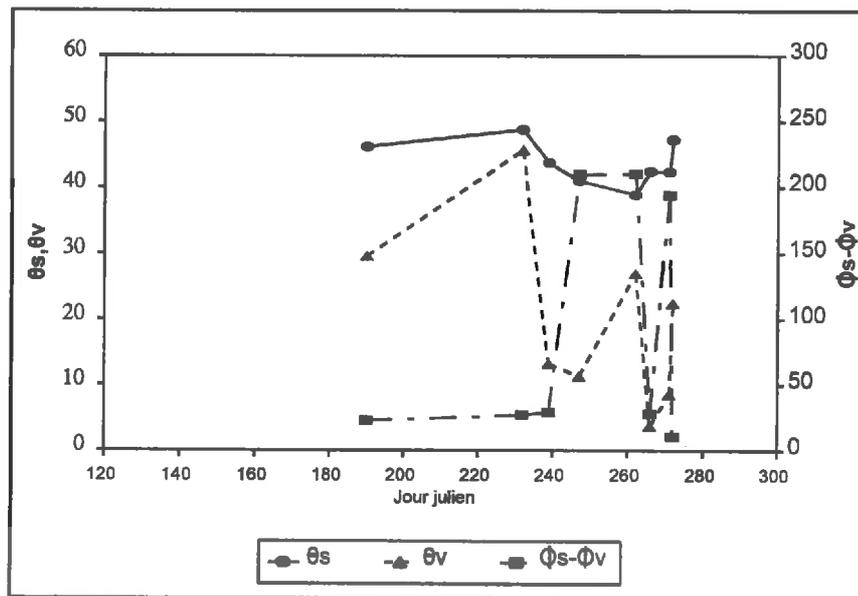


Figure 7.10: Les angles zénithaux de visée et solaire ainsi que la différence des angles azimutaux des images AVHRR qui couvrent le cycle du mil.

7.3.2 CALCUL DES EFFICIENCES DE CONVERSION

Les efficacités de conversion calculées pour les deux sites SC et SS sont reportées sur le tableau 7.10. en utilisant à la fois la rayonnement global estimé à partir des données Météosat et mesuré à la station de Niamey. On a utilisé aussi la MST du mil mesurée sur le site P4AS de Hamdallaye qui, de par son échantillonnage, a une meilleure représentativité.

Site	MST (kg/ha)	ϵ_p mesurée (g/Mj)	ϵ_p estimée (g/Mj) avec RG-Météosat	ϵ_p estimée (g/MJ) avec RG-Niamey
Hamdallaye	1373	-----	1.84	1.98
SC	1220	2.26	1.64	1.76
SS	3115	-----	3.69	3.89

Tableau 7.10: Efficacités de conversion estimées à partir des réflectances du mil des sites Hamdallaye, SC et SS pour la saison 1992.

Pour le site SC, l'efficacité de conversion obtenue en utilisant le rayonnement global mesuré à Niamey (1.76 g/MJ) est plus proche de celle estimée en utilisant le RG issu de Météosat (1.64 g/MJ). Cette efficacité reste toutefois bien différente de celle qui a été mesurée sur le site SC (2.26 g/MJ), probablement à cause de la représentativité de la matière sèche totale mesurée sur ce site.

En effet, l'estimation de cette efficacité a pu être améliorée en utilisant les mesures de MST du site P4AS Hamdallaye, très proche du site SC. L'efficacité obtenue en utilisant ces mesures et le RG de Niamey est cette fois-ci égale 1.98 g/MJ plus proche de celle mesurée sur le site SC.

Si on compare cette valeur de ϵ_p avec celle estimée à partir du signal AVHRR au paragraphe précédent (1.45 g/MJ), on observe un écart relatif assez important (27 %), qui est dû à l'hétérogénéité du paysage à l'intérieur du pixel AVHRR.

L'erreur commise par rapport à la valeur mesurée (2.26 g/MJ) atteint 36 % quand on utilise le signal AVHRR, et seulement 12 % quand on utilise le signal pur du mil.

Dans le cas du site du sud, les efficacités de conversion moyennes estimées présentent des valeurs très élevées, 3.69 g/MJ quand on utilise le RG issu de Météosat, et 3.89 g/MJ quand on utilise le RG de Niamey.

Ces valeurs de ϵ_p sont supérieures aux valeurs habituellement rencontrées dans la littérature, qui sont inférieures à 3 g/MJ.

L'erreur pourrait avoir deux origines différentes: le profil du NDVI du mil et la représentativité de la matière sèche totale mesurée sur le site du sud.

En effet, on a montré dans le chapitre 5 que la méthode développée pour déconvoluer le signal AVHRR était sensible à la structure du paysage. De fait, certaines valeurs du NDVI du mil obtenues sur le site SS sont entachées d'erreur (cf chapitre 5).

L'autre source d'erreur est liée à la représentativité du champs choisi pour mesurer la MST (1 ha), alors que le NDVI du mil représente lui une zone beaucoup plus large (Cf. taille des zones d'influence, chapitre 5).

7.4 CONCLUSION

Les estimations de rendements obtenues avec cette démarche pour la saison 1992 sont très encourageantes. Les écarts entre ces estimations et les mesures pour les sites P4AS sont acceptables, et montrent qu'on peut utiliser ce type de modélisation pour estimer les rendements agricoles sur des sites où on connaît les dates de semis et de récolte du mil. Ces estimations nous ont permis de montrer une légère amélioration des résultats quand on estime l'absorption avec les relations de Myneni au lieu de la relation globale.

Pour cartographier les rendements du mil sur de grandes zones, on a été confronté au problème de la période d'intégration du modèle. En effet, les cultures de mil sont très dépendantes de l'arrivée des pluies. Celles-ci étant très variable du nord au sud à cause du FIT, les dates de semis et donc de récoltes se trouvent aussi très variables sur toute la zone. Cependant, on peut établir une carte de rendements spécifique à un arrondissement par exemple, en utilisant les observations terrain.

Enfin, nous avons testé l'apport des réflectances pures du mil dans le modèle de production, en comparant les efficacités de conversion estimée et mesurée sur le site SC du degré carré HAPEX. Cette étude a montré qu'on peut commettre une erreur de l'ordre de 36 % sur l'estimation de l'efficacité de conversion si on utilise le signal AVHRR, et seulement 12 % si on considère le signal issu du mil. L'amélioration des méthodes d'extraction des réflectances pures à partir du signal AVHRR est donc nécessaire pour améliorer les estimations de rendements dans ce type de modélisation.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'utilisation conjointe du modèle de Monteith et de données satellitaires du capteur AVHRR a permis d'établir une méthodologie pour estimer la production agricole régionale au Sahel. L'apport de cette information s'avère très important, car elle répond à une forte demande formulée par les organismes internationaux préoccupés par le problème de sécheresse et la gestion des ressources alimentaires au Sahel.

L'intérêt de cette démarche a été montré sur des zones tempérées où les zones cultivées présentent une homogénéité spatiale au niveau des conditions agroclimatiques et de l'assolement sur de vastes superficies. Mais son application au Sahel nécessitait des travaux supplémentaires, car la végétation sahélienne est caractérisée par une forte hétérogénéité due aux caractéristiques pédologiques et climatiques.

Des modèles empiriques basés sur l'établissement de relations entre NDVI et biomasse mesurée sont souvent choisis pour leur simplicité. Mais ces relations nécessitent d'être recalculées chaque année. La méthode proposée dans cette étude présente l'avantage d'être reproductible sur plusieurs années, sans passer par des étapes de réétalonnage.

Le présent travail, inscrit dans le cadre du projet P4AS, consiste donc à développer une méthodologie adaptée à l'environnement sahélien, pour estimer les rendements agricoles du mil. L'accent est mis sur la qualité de l'information utilisée et sa spatialisation, ainsi que sur l'étalonnage des paramètres du modèle de Monteith.

L'utilisation des données AVHRR dans cette démarche nous a amenés à résoudre certains problèmes qui caractérisent ce capteur, notamment ceux dus aux bruits atmosphériques et à la basse résolution spatiale. En effet le capteur AVHRR a été choisi à l'origine pour étudier les nuages, les glaces, et le bilan radiatif de la terre, et son signal est donc très sensible aux caractéristiques de l'atmosphère, comme par exemple l'absorption de la vapeur d'eau dans le canal proche infrarouge. Quant à la résolution spatiale d'AVHRR, elle ne permet pas d'avoir des mesures spécifiques à chaque type de végétation, mais représente plutôt des mélanges de couverts végétaux.

Il a donc été nécessaire de corriger les données AVHRR des effets atmosphériques en utilisant le modèle 5S simplifié (Rahman et Dedieu, 1994). Les données atmosphériques sur l'ozone et les aérosols sont issues respectivement de la climatologie et de mesures. Si la variabilité spatiale de l'ozone est négligeable à cette échelle, la campagne de mesures du projet HAPEX-Sahel montre que celle des aérosols est très importante au cours du cycle. La seule solution pour éliminer ces perturbations serait d'adopter la méthode des synthèses d'images. Pour appréhender la variabilité du contenu en eau, nous avons utilisé pour la première fois des données du Modèle de Circulation Générale (Ouaidrari et al., 1994), permettant d'avoir accès à une information spatialisée. Ces données sont très intéressantes car

le seul radiosondage de Niamey est incapable de représenter les fortes variations du contenu en eau dans l'atmosphère, qui sont régies par les mouvements du FIT. Cette méthode a été appliquée sur les jeux de données AVHRR de 1991 et 1992, et donne des résultats satisfaisants. A l'avenir, la transmission des données du MCG vers la station de réception de Niamey devrait permettre d'intégrer cette méthode dans la chaîne de prétraitement des données satellitaires.

L'autre contrainte liée au capteur AVHRR est sa résolution spatiale. En effet, la basse résolution de ce capteur fait que le signal mesuré ne caractérise pas un seul type de végétation, mais un mélange de végétations différentes. Nous avons donc développé une nouvelle méthode permettant d'extraire le signal pur des unités de paysage qui forment le pixel AVHRR, en utilisant la carte d'occupation du sol du degré carré HAPEX-Sahel. Cette méthode donne de bons résultats, mais montre une sensibilité assez importante à la superposition géométrique entre les images AVHRR et la carte des unités de paysage. Néanmoins les résultats obtenus sur le site central d'HAPEX-Sahel sont très encourageants. Le lancement de SPOT-4 avec les deux capteurs haute résolution (HRVIR) et basse résolution spatiale (VEGETATION) embarqués à bord devrait permettre à l'avenir d'améliorer la précision de la localisation, et donc de l'inversion par la méthode proposée.

La modélisation de la production primaire du mil a été réalisée en deux étapes: la première a permis l'étalonnage des paramètres du modèle de Monteith avec les données de la saison 1991; dans la deuxième le modèle a été mis en oeuvre pour estimer les rendements agricoles de la saison 1992.

Tous les paramètres du modèle ont été déterminés en tenant compte des spécificités de la zone d'étude et des caractéristiques des capteurs. Le rayonnement global est dérivé de données Météosat qui permettent une spatialisation plus intéressante qu'une simple interpolation des mesures effectuées par les quelques stations météorologiques de la région. Les cartes de RG utilisées sont celles de la saison 1983, mais on a pu montrer que la variabilité inter-annuelle du RG est relativement faible. Il est souhaitable cependant d'utiliser à l'avenir les données de RG spécifiques à chaque saison, et l'obtention de ces données ne devrait pas constituer une limitation, car plusieurs laboratoires sont actuellement en train de développer des algorithmes de calcul. Leur intégration dans une chaîne de traitement de données satellitaires devrait permettre de fournir en temps réel des cartes de RG.

Pour ce qui concerne l'efficacité climatique, sa faible variabilité au Sahel en saison des pluies a été démontrée à plusieurs reprises, et l'utilisation d'une valeur constante n'engendre pas d'imprécision sensible dans le modèle.

La détermination de l'efficacité d'absorption ϵ_a est une étape plus complexe. En effet, la relation qui lie l'indice de végétation NDVI et l'efficacité d'absorption est très sensible à la couleur du sol, à la structure du couvert et aux configurations géométriques. Ces effets coexistent quand on utilise le NDVI dérivé des données AVHRR.

Deux méthodes ont été utilisées pour estimer ϵ_a . La première est une relation globale, facile à mettre en oeuvre, mais qui ne tient compte ni de la structure du couvert ni de la configuration géométrique. La deuxième est basée sur des résultats de simulations du transfert radiatif dans un couvert de mil avec le modèle de Myneni, qui ont permis de constituer un jeu de relations NDVI/ ϵ_a pour différentes configurations géométriques. La comparaison de ces deux méthodes montre que les effets bidirectionnels sont mieux pris en compte dans le cas des relations de Myneni. Mais comme on l'a déjà noté, le NDVI calculé avec les données

AVHRR n'étant représentatif que d'un mélange de couverts végétaux, l'absorption calculée sera celle d'un couvert de mil qui a le même comportement spectral que le mélange de couverts présents dans le pixel. Actuellement, le modèle de Myneni ne peut simuler qu'un seul type de couvert, mais les recherches en cours essaient de prendre en compte des mélanges de plusieurs types de végétation.

Nous avons vu aussi que les relations de Myneni établies en utilisant l'indice MSAVI présentaient une plus forte linéarité que celles obtenues avec le NDVI. En effet, le MSAVI est un indice qui a été élaboré pour éviter les perturbations dues aux différences de sols. Son utilisation pourrait apporter une amélioration sensible dans l'estimation de l'efficacité d'absorption.

Enfin, pour ce qui concerne l'efficacité de conversion ϵ_p , la prise en compte de l'état hydrique nous a paru primordiale. En effet, la pluviométrie représente le facteur le plus important qui contrôle le développement du mil dans la zone sahélienne. Des relations linéaires ont été établies entre l'indice de stress hydrique SDD et ϵ_p sur les sites P4AS, bien que le SDD ne soit pas représentatif du mil mais d'un mélange de végétations et de sols différents. Néanmoins, on peut considérer que le stress hydrique lié à un déficit pluviométrique est sensiblement le même pour tous les couverts végétaux.

La mise en oeuvre du modèle pour la saison 1992 a permis d'établir des estimations de rendements en matière sèche totale et en grains pour les sites du projet P4AS. La comparaison de ces estimations avec les mesures au sol montre que la démarche est très intéressante quand on dispose d'informations sur les dates de semis et de récolte, comme c'était le cas sur les sites. L'erreur maximale commise est 24.1 % pour la matière sèche totale et 43.16 % pour le grain. Ces erreurs sont essentiellement dues à l'efficacité de conversion ϵ_p et à l'indice de récolte.

Toutefois, pour une application opérationnelle de cette méthode, on est confronté au problème de la période d'intégration. En effet, l'arrivée des pluies en début de saison est étalée du nord au sud à cause des mouvements du Front InterTropical, ce qui engendre des périodes d'intégration différentes du nord au sud. Des cartes de rendement en matière sèche et en grain ont pu être réalisées en se fixant différentes dates de semis et de récolte.

Enfin, nous avons testé l'intérêt dans le modèle de Monteith des réflectances pures du mil, en comparant l'efficacité de conversion moyenne estimée par inversion avec celle mesurée au sol dans le cadre du projet HAPEX-Sahel (Ouaidrari et Bégué, 1994). Les résultats montrent que dans le cas du site central où les réflectances du mil sont assez bien restituées, l'erreur commise sur ϵ_p est de l'ordre de 12%, alors qu'elle est de 36 % quand on utilise le signal AVHRR. Ces analyses montrent l'importance des erreurs commises si on ne tient pas compte de l'hétérogénéité du signal AVHRR.

En conclusion, la méthode proposée devrait permettre à court terme l'estimation de la production primaire et de la production utile des céréales en zone sahélienne dans la mesure où un effort important est fourni sur l'amélioration du modèle de Myneni et sur la précision de l'indice de récolte. A long terme, cette méthode devrait permettre de dégager les tendances de dégradation de la végétation dans ces zones fragilisées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Asrar G., Fuchs M., Kanemasu E.T. and Hatfield J.L., 1984, Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agron. J.*, 76 : 300-308.

Asrar G., Kanemasu E.T., Jackson R.D. et Pinter P.J., 1985, Estimation of total above ground phytomass production using remotely sensed data. *Remote Sens. Environ.*, vol. 17, pp. 211-220.

Asrar G., Myneni R.B. and Kanemasu E.T., 1989, Estimation of plant-canopy attributes from spectral reflectance measurements. In *theory and applications of optical remote sensing*, edited by G. Asrar (John Wiley & sons, new York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore), pp. 253-296.

Aubreville A., 1948, Climats, forêts et désertifications de l'Afrique tropicale. Paris, Soc. édit. géogr. marit. colon., 351 p.

Avaste O., Moldau H. et Shifrin K.S., 1962, Distribution spectrale des rayonnement direct et diffus. *Akad. Navk. Est. S.S.R. Inst. Phys. Astron.*, vol. 3, pp. 44-57.

Baker K.S. et Frouin R., 1987, Relation between photosynthetically available radiation and total insolation at the ocean surface under clear skies. *Limnol. Oceanogr.*, vol. 32, n° 6, pp. 1370-1377.

Baret F., Guyot G., Therès J.M. Rigal D., 1988, Profil spectral et estimation de la biomasse. In. Proc. 4ème colloque International Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection, CNES-INRA-ESA-CNRS, Aussois (France), 18-22 Jan., ESA, Paris, 93-94.

Baret F. et Olioso A., 1989, Estimation à partir des mesures de réflectance spectrale du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par une culture de blé. *Agronomie*, vol. 9, pp. 885-895.

Baret F. and Guyot G., 1991, Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sens. Environ.*, vol. 35, pp. 161-173.

Baret F., Oliosio A. and Luciani J.L., 1992, Root biomass fraction as a function of growth degree days in wheat. *Plant and soil*, vol 140, pp. 137-144

Bartholomé E., 1989, *Contribution aux méthodes de suivi par télédétection satellitaire des rendements régionaux des cultures céréalières pluviales en Afrique soudano-sahélienne.* Thèse de doctorat, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgique. 255p

Basu S., Tewari M. and Agarwal V.K., 1990, A model for retrieval of surface spectral reflectance from satellite radiance measurements using realistic atmospheric profiles. *Int. J. Remote Sens.*, vol. 11, pp. 395-407.

Bégué A., 1991, *Estimation de la production primaire en zone sahélienne à partir de données radiométriques, cas d'un couvert discontinu: le mil.* Thèse de doctorat, Université Paris 7, France.

Bégué A., 1992, Modeling hemispherical and directional radiative fluxes in regular-clumped canopies. *Remote Sens. Environ.*, vol. 40, n° 3, pp. 219-230.

Bégué A., 1993a, Leaf area index, intercepted Photosynthetically Active Radiation and spectral vegetation indices: A sensitivity analysis for regular-clumped canopies. *Remote Sens. Environ.*, vol. 46, pp. 1-25.

Bégué A., Hanan N.P. and Prince S.D., 1993b, Radiative transfert in shrub savana sites in Niger - preliminary results of HAPEX-Sahel: II. P.A.R. interception of the woody layer. *Agric. For. Meteorol.* vol. 69, pp. 247-266.

Bégué A., Roujean J.L., Hanan N.P., Prince S.D. and Taauley M., 1994, Shortwave radiation budget of sahelian vegetation during HAPEX-Sahel 1. Techniques of measurement and results. Submitted to *Agric. For. Meteorol.*

Bertrand A., 1987, Prix et marchés des combustibles ligneux. In: séminaire international sur la planification des énergies ligneuses, Viterbo, Italie, 5 Novembre 1987.

Bertrand A., 1989, Le paysan , le bûcheron, le commerçant et le garde forestier. In Economie des filières en régions chaudes. Actes du Xème séminaire d'économie et sociologie rurales. Montpellier, CIRAD-MES, pp. 847-858.

Bonhomme R. et Chartier P., 1972, The interpretation and automatic measurements of hemispherical photographs to obtain sunlit foliage area and gap frequency. *Isr. J. Agric. Res.*, vol. 22, pp. 61-63.

Bradford K.J. et Hsiao T.C., 1982, Physiological responses to moderate water stress. *Physiological plant ecology II*, springer verlag éd., Berlin. New series vol. 12 B, chap. 6, pp. 263-324

Calvin M., 1956, 3ème congrès international de biochimie, Bruxelles 1955, (Eds.) Acad. Press, New York.

Chandrasekhar S., 1960, Radiative transfer. Dover, New York, 1960.

Charles-Edwards D.A., 1984, Physiological determinants of crop growth, Academic Press (Eds.) : 140p.

Charreau C. et Poulain J.F., 1964, La fertilisation des mils et sorghos. Annales de l'IRAT au Sénégal 1963-1964. Bull. Agro. N° 21.

Chartier M., Bonchrétien P., Allirand P. and Goss G., 1989, Utilisation des cellules au silicium amorphe pour la mesure de rayonnement photosynthétiquement actif. *Agronomie*, vol. 9, pp.281-284.

Chebouni A., Qi A.R., Kerr Y.H. and Huete A.R., 1994, The Modified Soil Adjusted Vegetation Index: MSAVI : Validation and sensitivity Analysis, *Remote Sens. Environ.*, vol. 48, n° 2, pp.119-126.

Choudhury B.J., 1987, Relationships between vegetation indices, radiation absorption, and net photosynthesis evaluated by a sensitivity analysis. *Remote Sens. Environ.*, vol. 22, pp. 209-233.

Clevers J.G.P.W., 1988, The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index, *Remote Sens. Environ.* vol. 25, n°1, pp. 53-70.

Dedieu G., Deschamps P.Y. and Kerr Y.H., 1987, Satellite estimation of solar irradiance at the surface of the earth and of surface albedo using a physical model applied to meteosat data. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 26, n° 1, pp. 79-87.

Deering D.W., 1978, *Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors*, Ph.D Dissertation, Texas, A&M University, College Station, n° 8, pp. 167-189.

Deschamps P.Y. et Phulpin T., 1980, Atmospheric correction of infrared measurements of sea surface temperature using channels at 3.7, 11 and 12 μm . *Boundary Layer Meteorol.* vol. 18, pp. 131-143.

Deschamps P.Y., Herman M. and Tanré D., 1983, Modélisation du rayonnement réfléchi par l'atmosphère et la Terre entre 0.35 et 0.4 μm . Contrat ESA 4393/80/F/DD.

Deshmukh I.K., 1984, A common relationship between precipitation and grassland peak biomass for East and Southern Africa. *J. Ecol.*, vol. 22, pp. 181-186.

D'Herbes J.M., Courault D., Timouk F. and Valentin C., 1992, Spatio-carte des états de surface du degré carré de Niamey. In ORSTOM/HAPEX/SALT, HAPEX CDROM.

Diallo O., Diouf A., Hanan N.P., Ndiaye A. and Prevost Y., 1991, AVHRR monitoring of savanna primary production in Senegal, West Africa : 1987-1988, *Int. J. Remote Sens.* vol. 12, n° 6, pp. 1259-1280.

Diarra L. et Breman H., 1975, Influence de la pluviosité sur la production des pâturages. Actes du colloque de Bamako (Mali), Inventaire et cartographie des pâturages tropicaux africains, 3-8 mars, pp. 171-174.

- Donald C.M. et Hamblin J., 1976**, The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. *Adv. Agron.*, vol. 28, pp. 361-405.
- Doorenbos J. et Kassam A.H., 1979**, Yield response to water. FAO, Rome, Irrigation and Drainage Paper n° 33.
- Eck H.V., Mathers A.C. and Musick J.T., 1987**, Plant water stress at various growth stages and growth and yield of soybean. *Agron. J.* vol. 75, pp. 1027-1031.
- Faizoun C.A., Podaire A., et Dedieu G., 1994**, Monitoring of sahelian atmospheric water vapour content and aerosols characteristics from sun photometer measurements. *J. Appl. Meteorol.*, in press.
- Field C. and Mooney H.A., 1986**, *The photosynthesis-nitrogen relationship in wild plants*. In : Givnish T.J., ed., On the economy of plant form and function, pp. 25-55. Cambridge University Press.
- Fisher A., 1991**, *Suivi de la croissance des cultures en zone hétérogène au moyen d'informations satellitaires: Complémentarité avec les modèles de croissance*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Fisher A., 1994**, A model for the seasonal variations of vegetation index in coarse resolution data and its inversion to extract crops parameters. *Remote Sens. Environ.*, vol. 48, n° 2, pp. 220-232.
- Forest F., 1989**, Evaluation et Suivi de la Production Agricole En Fonction du Climat et de l'Environnement (A.S.P.A.C.E), évaluation de la campagne 1988 (Niger-Mali), rapport IRAT/CIRAD.
- Franquin P., 1969**, Analyse agroclimatique en régions tropicales. Saison pluvieuse et saison sèche. Applications. Cah. ORSTOM, Sér. Biol., N° 9, Juillet 1969, pp. 5-95.
- Gallagher J.N., Biscoe P.V., 1978**, Radiation absorption, growth and yield of cereals. *J. Agric. Sci. Camb.*, vol. 9, pp. 47-60.
- Gallo K.P., Daughtry C.S.T., Bauer M.E., 1985**, Spectral estimation of absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. *Remote Sens. Environ.*, vol.17, pp. 221-232.
- Garcia R., Kanemasu E.T., Blad B., Bauer A., Hatfield J.L., Major D.J., Reginato, R.J., Hubbard K.G., 1988**, Interception and use efficiency of light in winter wheat under different nitrogen regimes. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol° 44, pp. 175-196.
- Garnier R., 1976**, L'équateur météorologique. La météorologie . 6ème série. N°6 Spécial Météorologie Tropicale. Septembre 1976.
- Gaston A., 1992**, Le développement agricole au Sahel, Tome 1: Milieu et déficit. Collection "Document systèmes agraires ", n°17, CIRAD. pp. 83-91.

Gavaud M. et Boulet R., 1967, Carte pédologique de reconnaissance de la république du Niger, feuille de Niamey, 1/500 000. Doc. ORSTOM.

Gherzi G, 1990, *Evolution de la situation alimentaire en Afrique de l'Ouest et de son commerce extérieur avec les pays de l'OCDE*. Université Laval, Centre Sahel.

Glover J. et McCulloch J.S.G., 1958, The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, vol. 84, pp. 172-175.

Goody M., 1964, The physics of the atmosphere. Combrige University Press 1964.

Gosse G., Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Chartier M., Allirand J.M., Lemaire G., 1986, Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, vol. 6, n° 1, pp. 47-56.

Goudriaan J., 1982, Potential production processes. In : Simulation of plant growth and crop production, F.W.T. Penning de Vris and Van Laar H.H., Simulation monographs, Pudoc, Wageningen, pp. 98-113.

Goutorbe J., Lebel T., Tinga A., Bessmoulin P., Brouwer J., Dolman A., Engman E., Gash J., Hoepffner M., Kabat P., Kerr Y., Monteny B., Prince S., Said F., Sellers P. and Wallace J., 1994, HAPEX-Sahel: A large scale study of land-atmosphere interactions in the semi-arid tropics. *Ann. Geophys.*, vol. 12, pp. 53-64.

Goward, S. N., 1989, Satellite bioclimatology. *Journal of climate*, vol. 7, pp. 710-720.

Guerif M., De Brisis S., Seguin B., 1993, Combined SPOT-HRV and NOAA-AVHRR data for assessing crop yields of semi arid environments. *Advances in Remote Sensing*. vol. 2, n° 2, pp. 110-123.

Guyot G., Hanock J.F., Buis J.P. et Saint G., 1983, Mise au point d'un radiomètre de simulation SPOT. In: 2ème Col. Int. Signature Spectrales d'Objets en télédétection, éd. par INRA. pp. 233-242. Bordeaux (France) 12-16 Septembre.

Hamon G., 1978, Caractérisation hydrodynamique de deux sols en culture de la région centre nord du Sénégal. Doc. Multig. Bambey, Sénégal.

Hanan N.P., Prince S.D., Bégué A., 1992, Saratoga nadir-measured reflectances and surface temperature, HAPEX-Sahel data base documentation.

Hanks R.J., 1974, Model for predicting plant yield as influenced by water use. *Agron. J.* vol. 66, pp. 660-665.

Hatch M.D. and Slack C.R., 1966, Photosynthesis by sugar can leaves. A new carboxylation reaction and the path way of sugar formation. *Biochem. J.*, vol. 101, pp. 103-11.

Heimann M., Keeling C.D., 1989, A three dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds 2. model description and simulated tracer experiments. In : D.H. Peterson (ed.) : Aspects of climate variability in the pacific and the western America. *Geophysical Monograph* 55.

Heller R. Esnault R., Lance C., 1989, Physiologie végétale, 1 : nutrition. (ed.) Masson, Paris, Milan, Barcelone, Mexico: 273p.

Hierneaux P., 1984, Distribution des pluies et production herbacée au Sahel: une méthode empirique pour caractériser la distribution des précipitations journalières et ces effets sur la production herbacée. Premiers résultats acquis sur le Sahel malien. Document de programme CIPEA, n°AZ98, Bamako, Mali.

Holben B.N., 1986, Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.*, vol. 7, pp. 1414-1434.

Huete A.R., Chehbouni A., Van W.J.D. Leeuwen, Hua G., 1991, Normalisation of multidirectional red and NIR reflectances with SAVI, presented at the 5th Conference on Spectral Signature, Courchevel, France, Janvier.

Inada K., 1976, Action spectra for photosynthesis in higher plants. *Cell. Physio.*, vol. 17, pp. 355-365.

Innis G.S., 1978, Grassland simulation model, Ecological studies 26, Springer-Verlag, New York, Heidelberg, Berlin : 298p.

Jackson R.D., Pinter P.J., and Idso S.B., 1977, Wheat canopy temperature. A practical tool for evaluating water requirements. *Water Ressource Research*, vol. 13, n° 3, pp. 651-657.

Jackson J.E. and Palmer J.W., 1979, A simple model of light transmission and interception by discontinuous canopies. *Annals of Botany*, vol. 44, pp. 381-383.

Johnson G.E., van Dijk A. and Sakamoto C.M., 1987, The use of AVHRR data in operational agricultural assessment in Africa. *Geocarto International* n°1, pp. 41-60.

Jordan C.J., 1969, Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor, *Ecology*, n° 50, pp. 663-666.

Justice C. O., Townshend, J. R. G., Holben, B. N., and Tucker, C. J., 1985, Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 6, pp. 1271-1318.

Justice C. O., 1986, Monitoring the grasslands of semi arid Africa using NOAA-AVHRR data. Editorial. *Int. J. Remote Sens.*, vol. 7, pp. 1385-1391.

Justice C., Markham B., Townshend J., Kennardd R., 1989, Spatial degradation of satellite data. *Int. Remote Sens.*, vol. 10, pp. 1539-1561.

Justice C.O., Eck T.F., Tanré D. and Holben B.N., 1991, The effect of water vapour on the normalized difference vegetation index derived for the Sahelian region from NOAA-AVHRR data. *Int. J. Remote Sens*, 12, 1165-1187.

Kanemasu E.T., Stone L.R., Powers W.L., 1976, Evapotranspiration model tested for soybean and sorghum. *Agron. J.*, vol. 68, pp. 569-572.

Katz M., Baille A. et Mermier M., 1981, Influence de la masse d'air et du trouble atmosphérique sur le rayonnement direct photosynthétique actif reçu au sol. *Agronomie*, vol. 1, n°5, pp. 359-364.

Kaufman Y.J., 1987, Satellite remote sensing of aerosol absorption. *J. Geophys. Res.*, vol. 92, pp. 4307-4317.

Kaufman Y.J. and Sendra C., 1988, Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery. *Int J. Remote Sens*, vol. 9, pp. 1357-1381.

Kerr Y.H., Lagouarde J.P., Imbernon J., 1992, Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved Split Window algorithm. *Remote Sens. Environ.*, vol. 40, pp. 1-20.

Koepke P., 1989, Removal of atmospheric effects from AVHRR albedo. 4th AVHRR data user's meeting., Rothenbourg, RFA.

Kumar M. and Monteith J.L., 1981, Remote sensing of crop growth. Plant and daylight spectrum, ed. Smith; Academic Press, pp. 133-134.

Lagouarde J.P. and Brunet Y., 1988, Spatial integration of surface latent heat flux and evaporation mapping. XXVII COSPAR Plenary Meeting, Helsinki (Finland), 18-29 July.

Lagouarde J.P., 1988, Mesure de flux par la méthode directe des fluctuations au moyen de l'anémomètre sonique Campbell. Note interne M/88

Le Houerou H.N. et Hoste J., 1977, Rangeland production and annual rainfall relations in the mediterranean basin and african sahelo-soudanian zone, *Journal of Rang. Management*, vol. 30, n° 3, pp. 181-189.

Lémée G., 1978, Précis d'écologie végétale. éditeur Masson (Paris) : 285p.

Lemeur R. and Blad B.L., 1974, A critical review of light models for estimating the short-wave radiation regime of plant canopies. *Agric. Met.*, vol. 14, pp. 255-286.

Lenoble J., (editeur), 1977, Radiation commission of IAMAP, Standart procedures to compute atmospheric radiative transfer in a scattering atmosphere. Available from Ruttenberg S., NCAR, Boulder, Colorado, 80307, U.S.A.

Lieth H. and Whittaker R.H., 1975, Primary production of the biosphere, Ecological studies 14, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York : 339p.

Lo Seen Chong D., Mouglin E. and Gastellu-Etchegorry J.P., 1993, Relating the Global Vegetation Index to net primary productivity and actual evapotranspiration over Africa. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 14, n° 8, pp. 1517-1546.

Lof G.O.G., Duffi J.A. et Smith C.O., 1966, World distribution of solar radiation. *Sol. Energy*, vol. 10, pp. 27-37.

London J., Bojkove R.D., Oltmans S., and Kelly J.I., 1976, Atlas of the global distribution of total ozone July 1957-June 1967, NCAR/TN-113+STR.

Loomis R.S. and Williams W.A., 1963, Maximum crop productivity : an estimate. *Crop Sci.*, vol. 3, pp. 67-72.

Loudjani P., 1993, *Apport des données satellitaires en vue de l'estimation de la production primaire nette à l'échelle régionale : cas de l'Afrique de l'Ouest*. Thèse de doctorat. Université Orsay-Paris sud, France.

Maas S.J., Richardson A.J., Wiegand C.L., et Nixon P.R., 1985, Use of plant, spectral and weather data in modeling corn growth. In : *Nineteenth International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Michigan 21-25 Octobre, Ann Arbor.

Mc Cree K.J. and Troughton J.H., 1966, Prediction of growth rate at different light levels from measured photosynthesis and respiration rates. *Plant. Physiol.*, vol. 41, n°4, pp. 443-453.

Mc Cree K.J., 1970, An equation for the rate of respiration of white clover plants grown under controlled conditions. In : *Prediction and measurement of photosynthetic productivity-Wageningen (Pays-Bas)*, Center for Agricultural Publishing and Documentation, pp. 221-229.

Mc Cree K.J., 1972, Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric. Meteorol.*, vol. 10, pp. 443-453.

Meek D.W., Hatfield J.L., Howel T.A., Idso S.B., Reginato R.J., 1984, A generalized relationship between photosynthetically active radiation and solar radiation. *Agronomy Journal*, vol.76, pp. 936-945.

Merrien A., 1987, Cahier Technique Irrigation Soja. CETIOM, éd. : 28p.

Miller E.E. and Norman J.M., 1971a, A sunfleck theory for plant canopies. I. Lengths of sunlit segments along a transect. *Agronomy Journal*, vol. 63, pp. 735-738.

Miller E.E. and Norman J.M., 1971b, A sunfleck theory for plant canopies. II. Penumbra effect : intensity distributions along sunfleck segments. *Agronomy Journal*, vol. 63, pp. 739-743.

Monsi M. and Saeki T., 1953, Über den Lichtfactor in der Pflanzengesellschaften und sein Bedeutung für die Stoffproduktion. *Jap. Journ. of Botany*, vol. 14, n° 1, pp. 22-52.

Monteith J.L., Szeicz G. and Yabuki K., 1964, *J. Appl. Ecol.*, vol. 1, pp. 321-337.

- Monteith J.L., 1969**, Physiological aspects of crop yield. Medison.
- Monteith J.L., 1972**, Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*. vol. 9, pp. 747-766.
- Monteith J.L., 1977**, Climate and the efficiency of crop production in Britain, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, B, vol. 281, pp. 277-294.
- Monteith J.L., 1981**, Does light limit crop production? In : *Physiological processes limiting plant production*, éd. par Johnson C.B., pp 23-38. Butterworths (London).
- Monteny B. et Gosse G., 1978**, Variations du rayonnement photosynthétiquement actif en région tropicale humide. *Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B*, vol. 25, pp. 371-382.
- Mooney H.A., Ehleringer J. and Berry J.A., 1976**, High photosynthetic capacity of a winter annual in Death Valley. *Science*, vol. 194, pp. 322-325.
- Myneni R.B., Asrard G. and Gerslt S.A.W., 1990**, Radiative transfer in three dimensional leaf canopies. *Trans. Theory. Stat. Phys.*, vol. 19, pp.205-250.
- Myneni R.B., Asrar G. and Hall F.G., 1992**, A three-dimensional radiative transfer method for optical remote sensing of vegetation land surfaces. *Remote Sens. Environ.*, vol. 41, pp.105-121.
- Myneni R.B. and Williams D.L., 1994**, On the relationship between FAPAR and NDVI, soumis à *Remote Sens. Environ.*.
- Nicholson S.E., 1982**, Le Sahel : présentation du climat. Paris, Club du Sahel OCDE-CILSS, 82p.
- Oort, A.H., 1983**, Global Atmospheric Circulation Statistics, 1958-1973. NOAA Professional Paper 14, Rockville, Md., USA.
- Ouaidrari H., Imbernon J. and Dedieu G., 1994**, Use of meteorological model to correct atmospheric effects in NOAA-AVHRR data. Accepté dans *Int. J. Remote Sens.*, vol. 15, n° 11, pp. 2257-2271.
- Ouaidrari H. and Bégué A., 1994**, Extraction of the spectral response of the landscape components of NOAA-AVHRR mixed pixels-Application to the HAPEX-Sahel degree square. En préparation.
- Ouedraogo J.P., Ouedraogo J.B.G. et Baldy C.M., 1981**, Premières données sur le rayonnement global et la durée d'insolation en Haute-Volta. *La météorologie*, vol.VI, pp. 123-134.
- Paltridge G.W. and Mitchell R.M., 1990**, Atmospheric and viewing angle correction of vegetation indices and grassland field moisture content from NOAA-AVHRR. *Remote Sens. Environ.*, vol. 31, pp.121-135.

Penning de Vries F.W.T., 1975, Use of assimilate in the higher plants. in : Photosynthesis and productivity in different environments. (Eds.) Cooper J., Cambridge Univ. Press : 459-480.

Penning de Vries F.W.T. and Djitéye M.A., 1982, *La productivité des pâturages sahéliens - une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle*, Wageningen, Pays-Bas, Center of Agricultural Publishing and Documentation, 525p.

Penning de Vries F.W.T., Jansen D.M., Ten Berge H.F.M., Bakema A., 1989, Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops, Simulation monographs, n° 29, Pudoc Wageningen : 271p.

Perrier A., Iter B., et Jaussely B., 1977, Etude de la photosynthèse en plein champs, In : Les processus de la production végétale primaire. les travaux français du programme biologique international sur la photosynthèse. Gauthier-Villars (Eds.), pp. 113-136.

Porter J.R., Brag P.L., Rayner J.H., Weir A.H. and Landsberg J.J., 1982, The ARC Winter Wheat Model-Principles and progress. British plant Growth Regulator Group, Monograph 7, 'Opportunities for manipulation of cereal productivity' 1982 (ed. Hawkins A.F. and Jeffcoat B.)

Prescott J.A., 1940, Evaporation from a water surface in relation to solar radiation . Trans. Roy. Soc. So. Aust., Vol. 64, pp. 114-125.

Price J.V., 1983, Estimating surface temperature from satellite thermal infrared data. A simple formulation for the atmospheric effect. *Remote Sens. Environ.*, vol. 13, pp. 353-361

Prince, S. D., and Justice, C. O., 1991, Editorial. *Int. J. Remote Sens.*, vol. 12, pp. 1137-1146.

Prince S.D., Hanan N.P. and Bégué A., 1993, Vegetation primary production efficiency on the West-Central site during HAPEX-Sahel. AGU Fall Meeting, 6-10 December, San Francisco, U.S.A.

Puech J., Cabelguenne M. et Hernandez M., 1986, Réponse du soja aux disponibilités hydrique. In : Le soja. CETIOM éd., pp. 99-106.

Puech J. et Bouniols A., 1986, Besoin en eau et en azote du soja : importance des phases sensibles. In : Le soja - CETIOM éd., pp. 24-32.

Qi J., Chehbouni A., Huete A.R. and Kerr Y.H., Sorooshian S., 1994, A modified Soil Adjusted Vegetation Index: MSAVI, *Remote Sens. Environ.*, vol. 48, n° 2, pp. 119-126.

Rahman H., and Dedieu G., 1994, SMAC : A simplified Methode for the Atmospheric Correction of satellite measurements in the solar spectrum. *Int. J. Remote Sens.* vol. 15, n° 1, pp. 123-143.

Rasmussen M.S., 1992, Assessment of millet yields and production in northern Burkina Faso using integrated NDVI from the AVHRR. *Int. J. Remote. Sens.*, vol. 13, n° 18, pp. 3431-3442.

Rietveld M.R., 1978, A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. *Agric. Meteorol.*, vol.19, pp. 243-252.

Riou C., 1972, *Etude de l'évaporation en Afrique centrale (Tchad, République Centrafricaine, Congo), Contribution à la connaissance des climats*, Paris (France), Thèse de doctorat, Université Paris VI, 205p.

Riou C., Itier B. and Seguin B., 1988, The influence of surface roughness on the simplified relationship between daily evaporation and surface temperature. *Int. J. Remote Sens.*, vol. 9, pp. 1569-1533.

Rosenberg N., 1974, *Micro-climate: The biological Environment*. John Wiley & Sons, New York. pp. 159-205.

Rothman L.S., Gamach R.R., Barbe A., Goldman A., Gillis J.R., Brown L.R., Toth R.A., Flaud J.M. and Camy-Peyret C., 1982, AFLG atmospheric absorption line parameters compilation : 1982 edition. *Appl. Opt.*, vol. 22, pp. 2247-2256.

Ruimy A., Saugier and Dedieu G., 1994, Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research*, vol. 99, pp. 5463-5283.

Saeki T., 1960, Interrelationship between leaf amount, light distribution and total photosynthesis in a plant community. *Bot. Mag.*, Tokyo, vol. 73, pp. 55-63.

Saugier B., 1970, Transports turbulents de CO₂ et de vapeur d'eau au-dessus et à l'intérieur de la végétation. *Oecol. Plant.*, 5, 179-223.

Saugier B., 1986, Productivité des écosystèmes naturels. *Biomasse Actualités*, n° spécial 9, juillet, pp. 42-49.

Saugier B., 1991, Bilan carboné d'un écosystème forestier. *Ecole d'été : Les climats subtropicaux et leur évolution*. pp .587-614

Seguin B., Baelz S., Monget J.M., Petit V., 1982, Utilisation de la thermographie IR pour l'estimation de l'évaporation régionale. I. Mise au point méthodologique sur le site de la Crau. *Agronomie* 2 (1): 7-16. II. Résultats obtenus à partir des données de satellite. *Agronomie*, vol. 2, n° 1, pp. 113-118.

Seguin B. and Itier B., 1983, Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. *Int. J. Rem. Sensing*, vol. 4, n°2, pp. 371-383.

Sellers W.D. (édité par), 1965, *Physical Climatology*, University of Chicago press.

Sellers P.J., 1987, Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. II the role of biophysics in the linearity of their interdependence. *Remote Sens. Environ.*, vol. 21, pp. 143-183.

Siband P., 1981, *Croissance, nutrition et production du mil: essai d'analyse de fonctionnement du mil en zone sahélienne*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, France.

Sionit N. and Kramer J.P., 1977, Effect of water stress during stages of growth of soybean. *Agron. J.* vol. 69, pp. 274-278.

Slater P.N., Jackson R.D., 1982, Atmospheric effect on radiation reflected from soil and vegetation as measured by orbital sensors using various scanning directions. *Appl. Opt.*, vol. 21, pp. 3923-3933.

Squire G.R., Gregory J.P., Monteith J.L., Russel M.B. et Singh P., 1984, Control of water use by pearl millet. *Exp. Agric.*, vol. 20, pp. 135-149.

Steinmetz S., 1990a, *Estimation de l'efficience de conversion en matière sèche du rayonnement solaire intercepté par une culture de blé à partir de la réflectance spectrale*. Thèse de doctorat, Université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, France, 266p.

Steinmetz S., Guerif M., Delécolle R. et Baret F., 1990b, Spectral estimates of absorbed photosynthetically active radiation and light use efficiency of winter wheat crop subjected to nitrogen and water deficiencies. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 4, n° 2, pp. 1979-1808.

Stewart J.I., Danielson R.E., Kanks R.J., Jackson E.B., Hagan R.M., Pruit W.O., Franklin W.T., Riley J.P., 1977, Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil. Utah Water Lab. Tech. Rep. PRWG 151-1. Logan, 191p.

Stigter C.J., 1980, Solar radiation as statistically related to sunshine duration: a comment using low-latitude data. *Agric. Meteorol.*, vol. 21, pp. 173-178.

Sudar R.A. Saxton K.E. and Spomer R.G., 1981, A predictive model of water stress in corn and soybeans. *Trans. ASAE.*, pp. 97-102.

Tanré D., Herman M, Deschamps P.Y. and De Lefte A., 1979, Atmospheric modelling for space measurements of direct solar and circumsolar radiations. *Appl. Opt.*, vol. 25, pp. 1170-1176

Tanré D., Herman M. and Deschamps P.Y., 1983, Influence of the atmosphere on space measurement of directional properties. *Appl. Opt.*, vol. 22, pp. 733-743.

Tanré D., Deroo C., Duhaut P., Herman M., Morcrette J.J., Perbos J., Deschamps P.Y., 1990, Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum : the 5S code. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 11, pp. 659-668.

Tanré D., Holben B.N., Justice C., Kaufman Y.J. and Dedieu G., 1991, Atmospheric correction for improving remotely sensed data of the earth surface. Presented at the Vth International Colloquium on physical measurements and signatures in remote sensing. Courchevel, 14-18 January 1991.

Tanré D., Holben B.N., and Kaufman Y.J., 1992, In: Atmospheric correction algorithm for NOAA products: Theory and application., *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, n° 2, pp. 231-248.

Taupin J., Lebel T., Cazenave F., Gérard M., Kong. J, Lecoq J., Adamson M., D'Amato N., and Mohamed A.B., 1993, Epsat-Niger, campagne 1992. Tech. rep., ORSTOM Niamey.

Teillet P. M., Holben B. N., 1993, Towards operational radiometric calibration of NOAA-AVHRR imagery in the visible and infrared channels. Submitted to *Canadian Journal of Remote Sensing*.

Thekaekara M.P., 1976, Solar radiation measurement: technics and instrumentation. *Sol. Energy*, vol.18, pp. 309-325.

Thornley J.H.M., 1977, Growth, maintenance and respiration : a re-interpretation. *Ann. Bot.*, vol. 41, pp. 1191-1203

Tucker, C. J., Vanpraet, C. L., Sharman, M., and Van Ittersum, G., 1985, Satellite remote sensing of total herbaceous biomass in the Senegalese Sahel: 1980-1984. *Remote Sens. Environ.*, vol. 17, pp. 234-241.

Tucker C. J. and Sellers P. J., 1986, Satellite remote sensing of primary production. *Int. J. Remote Sens.*, vol 7, n° 11, pp. 1395-1417.

Van Keulen H., Penning de Vries F.W.T. and Drees E.M., 1982, A summary model for crop growth. Penning F.W.T. and Van Laar H.H. (Eds): Simulation of plant growth and crop production. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, pp. 87-97.

Van Keulen H. and Wolf J., 1986, Modeling of agricultural production : weather, soil and crops, Simulation monographs, Pudoc Wageningen : 479p.

Varlet-Grancher C., Bonhomme R., 1979, Application aux couverts végétaux des lois de rayonnement en milieu diffusant. *Ann. Agron.*, Vol. 30, n°1, pp. 1-26.

Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Chartier M., et Artis P., 1982, Efficience de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal. *Acta Oecological Oecol. Plant.*, vol. 3, n° 17, pp. 3-26.

Varlet-Grancher C., Gosse G., Chartier M., Sinoquet H., Bonhomme R. et Allirand J.M., 1989, Mise au point : rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert. *Agronomie*, vol. 9, pp. 419-439.

Vignolles C., Puyou Lascassies P., Gay M., 1993, Setting of method of coarse resolution signal deconvolution in order to establish profiles of vegetation index evolution measurement of the time effect. 6th AVHRR data users meeting, Belgirate.

Virmani S.M., Reddy S.J., Bose M.N.S., 1980, Manuel de climatologie pluviale de l'Afrique occidentale. Données pour des stations sélectionnées. Bulletin ICRISAT, vol. 7, 52p.

Wang Y.P. and Jarvis P.G., 1990, Description and validation of an array model-MAESTRO. *Agricultural and forest meteorology*, vol. 51, pp. 257-280.

Woodcock C.E., Strahler A.H., 1987, The factor of scale in remote sensing, *Remote Sens. Environ.*, vol. 21, pp. 311-332.

Wylie B.K., Harrington J.A., Prince S.D. and Denda L., 1991, Satellite and ground-based pasture production assessment in Niger : 1986-1988, *Int. J. Remote Sensing*, vol. 12, n° 6, pp. 1281-1300.

ANNEXE A

**LE MODELE DE CORRECTIONS
ATMOSPHERIQUES "5S"**

ANNEXE A

LE MODELE DE CORRECTION ATMOSPHERIQUE "5S"

Le modèle "5S" (Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire) permet de simuler le signal capté par le satellite dans le domaine spectral compris entre 0.25 et 4 μm (Tanré et al., 1979, 1983, 1990).

Le rayonnement solaire direct émis en direction de la Terre $E_0(\theta_s, \phi_s, \lambda_s)$ est transmis en fonction de l'épaisseur optique τ de l'atmosphère suivant un coefficient d'atténuation égal à $\exp(-\tau/\mu_s)$, où μ_s est le cosinus de l'angle zénithal solaire θ_s . Dans le modèle 5S, la composante diffuse provenant de l'atmosphère est elle aussi modélisée par un coefficient dit de transmission diffuse t_d :

$$t_d(\theta, \phi, \lambda) = E_d(\theta, \phi, \lambda) / (\mu_s \cdot E_0(\theta, \phi, \lambda))$$

On définit alors un coefficient de transmission total par :

$$T(\theta, \phi, \lambda) = \exp(-\tau/\mu_s) + t_d(\theta, \phi, \lambda)$$

Par rapport au modèle décrit ci-dessus, le modèle 5S prend aussi en compte la composante diffuse de l'environnement de la cible, qui parvient à la cible après un certain nombre de diffusions et réflexions entre la Terre et l'atmosphère.

Le signal parvenant au pixel après un nombre i de réflexions-diffusions entre la surface et l'atmosphère s'écrit selon ce modèle :

$$E_{e,i} = E_0(\theta_s, \phi_s, \lambda) \cdot T(\theta_s, \phi_s, \lambda) \cdot (\rho_e(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda) \cdot S)^i$$

avec $\rho_e(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda)$ la réflectance de l'environnement de la cible, et S l'albédo sphérique.

Le signal au niveau de la cible résultant d'un nombre de réflexion-diffusion compris entre 1 et N peut s'écrire:

$$E_c(\theta_s, \phi_s, \lambda) = \sum_{i=1}^N E_{e,i} = \frac{E_0(\theta_s, \phi_s, \lambda) \cdot T(\theta_s, \phi_s, \lambda)}{1 - \rho_e(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda) \cdot S}$$

En général la réflectance de surface n'est pas homogène (entre la cible et son environnement), et le signal peut ainsi s'écrire :

$$E_c(\theta_s, \phi_s, \lambda) = \frac{E_0(\theta_s, \phi_s, \lambda) \cdot T(\theta_s, \phi_s, \lambda)}{1 - \langle \rho_e(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda) \rangle \cdot S}$$

où $\langle \rho_e(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda) \rangle$ désigne la moyenne spatiale prise sur toute la surface de la réflectance de chaque pixel.

Le signal $E_D(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda_s)$ qui parvient au capteur après avoir été réfléchi par la surface et atténué à nouveau par l'atmosphère comprend 3 composantes:

* une composante qui correspond au signal réfléchi directement vers le capteur par la cible formulée par :

$$\exp\left(-\frac{\tau}{\mu_v}\right) \cdot \rho_c(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda) \cdot E_c(\theta_s, \phi_s, \lambda)$$

où μ_v représente le cosinus de l'angle zénithal de visée θ_v

* une composante purement diffuse qui correspond à la cible et son environnement :

$$\langle \rho(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda) \rangle \cdot E_c(\theta_s, \phi_s, \lambda) \cdot t_d(\theta_v, \phi_v, \lambda)$$

* une composante provenant directement de la diffusion par l'atmosphère :

$$E_{da}(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda)$$

Le signal mesuré, qui correspond à une luminance, est ensuite converti en une réflectance bidirectionnelle suivant la relation :

$$\rho^*(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda) = \frac{\pi \cdot E_D(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda)}{\mu_s \cdot E(\lambda)}$$

où $E(\lambda)$ est l'éclairement spectral moyen dans la bande spectrale qui est exprimé en fonction de l'éclairement solaire $E_0(\lambda)$:

$$E(\lambda) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_v(\lambda) \cdot E_0(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_v(\lambda) d\lambda}$$

La réflectance $\rho^*(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda_s)$ est appelée réflectance apparente ou réflectance au sommet de l'atmosphère (TOA), et s'écrit plus communément :

$$\rho^*(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda) = \rho^a(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda) + \frac{T(\theta_s, \phi_s, \lambda)}{1 - \langle \rho_e(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda) \rangle \cdot S}$$

$$\cdot \left[\exp\left(-\frac{\tau}{\mu_v}\right) \cdot \rho_c(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda) + \langle \rho_e(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda) \rangle \cdot t_d(\theta_s, \phi_s, \lambda) \right]$$

où $\rho^a(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda)$ est la réflectance atmosphérique.

Le modèle 5S suppose le découplage entre la diffusion moléculaire et la diffusion par les aérosols, ce qui permet d'écrire (en prenant l'indice p pour les aérosols et m pour les molécules) :

$$\rho^a(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda) = \rho^p(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda) + \rho^m(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda)$$

$$T(\theta, \phi, \lambda) = T_p(\theta, \phi, \lambda) \cdot T_m(\theta, \phi, \lambda)$$

Enfin l'absorption gazeuse qui affecte le signal sur le parcours Soleil-Terre-Capteur est représentée par une transmission gazeuse :

$$T_g = T_g(\theta_s, \phi_s, \lambda) \cdot T_g(\theta_v, \phi_v, \lambda)$$

La transmission gazeuse totale est égale au produit des transmissions gazeuses de chacun des gaz absorbants.

En supposant aussi le découplage entre l'absorption par les gaz et les phénomènes de diffusion, la transmission gazeuse est considérée comme un facteur multiplicatif de la réflectance apparente exprimée précédemment.

Pour plus de clarté, la réflectance apparente sera écrite plus simplement :

$$\rho^* = T_g \cdot \left(\rho_a + \frac{\rho \cdot T}{1 - \rho \cdot S} \right)$$

avec

T : transmission diffuse totale

Tg : transmission gazeuse totale

ANNEXE B

LES RELATIONS ISSUES DU MODELE DE MYNENI

RELATIONS DE MYNENI ENTRE NDVI ET E_a

Avec

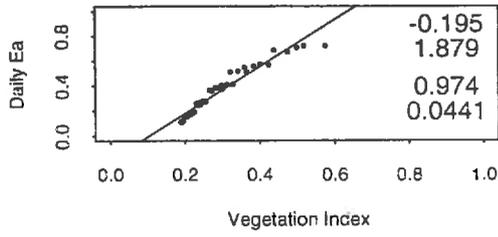
θ_s : angle zénithal solaire.

θ_v : angle zénithal de visée.

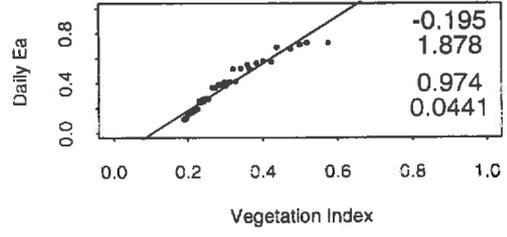
PHI : différence entre les angles azimutaux solaire et de visée.

E_a : efficacité d'absorption journalière

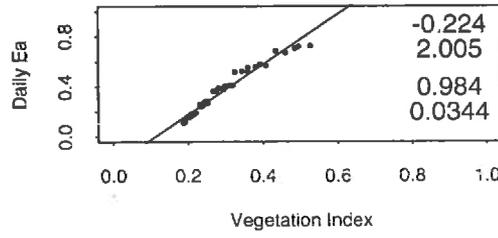
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 0 - \Phi = 15$



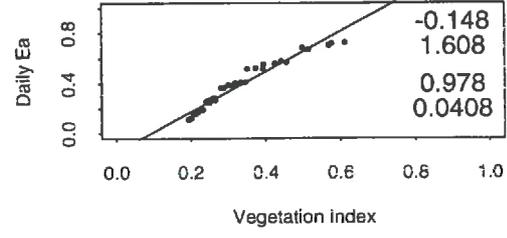
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 0 - \Phi = 190$



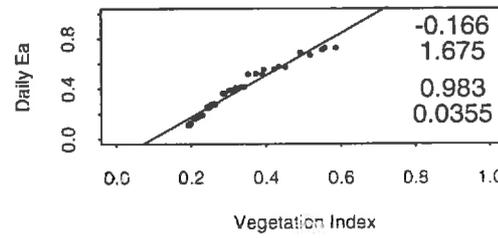
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 10 - \Phi = 15$



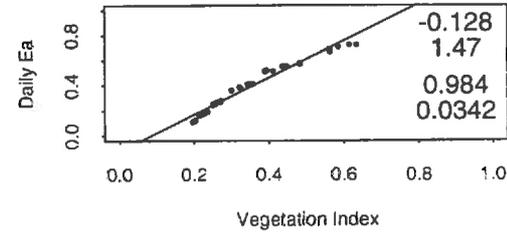
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 10 - \Phi = 190$



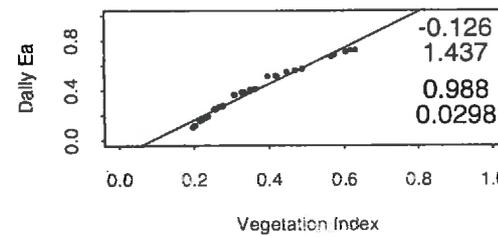
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 20 - \Phi = 15$



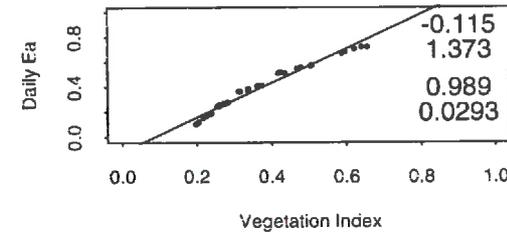
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 20 - \Phi = 190$



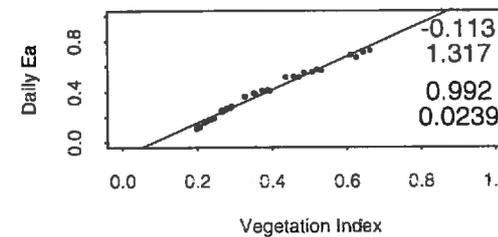
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 30 - \Phi = 15$



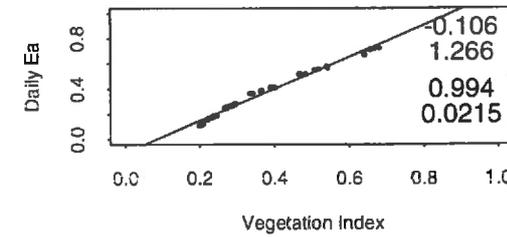
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 30 - \Phi = 190$



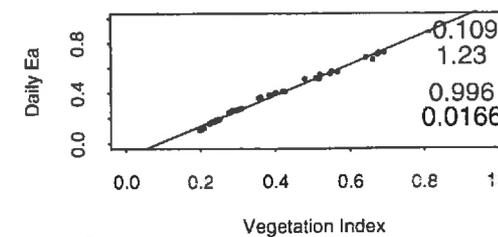
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 40 - \Phi = 15$



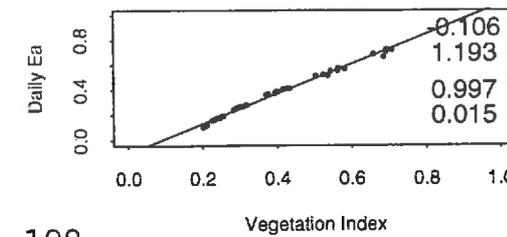
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 40 - \Phi = 190$



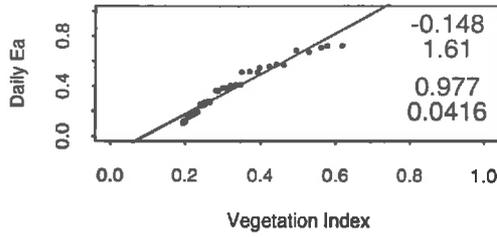
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 50 - \Phi = 15$



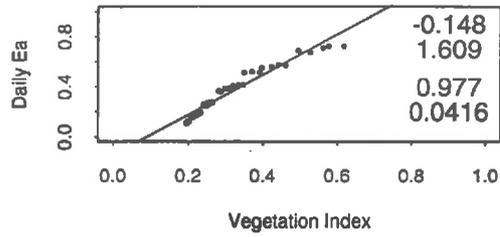
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 50 - \Phi = 190$



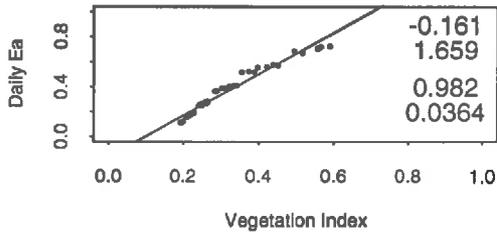
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 0 - \text{Phi} = 15$



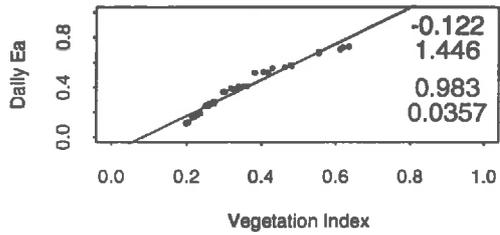
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 0 - \text{Phi} = 190$



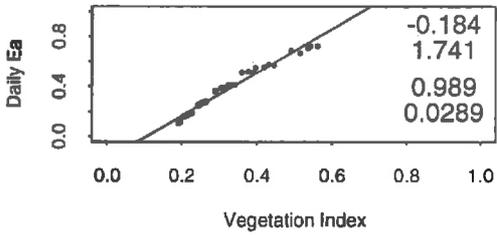
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 10 - \text{Phi} = 15$



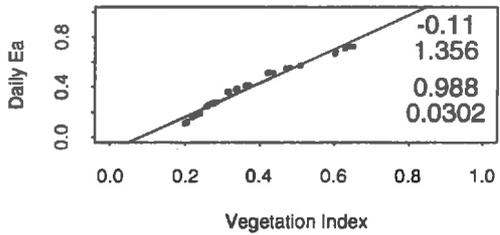
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 10 - \text{Phi} = 190$



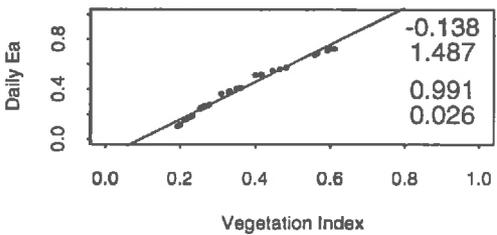
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 20 - \text{Phi} = 15$



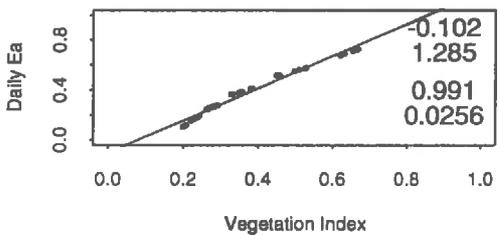
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 20 - \text{Phi} = 190$



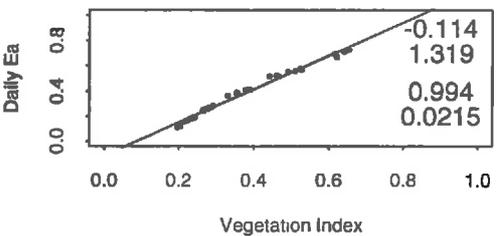
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 30 - \text{Phi} = 15$



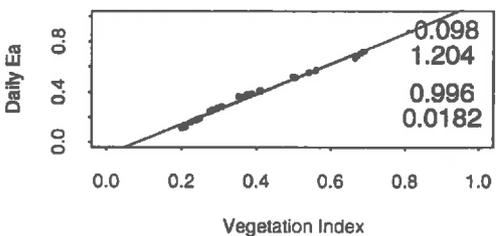
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 30 - \text{Phi} = 190$



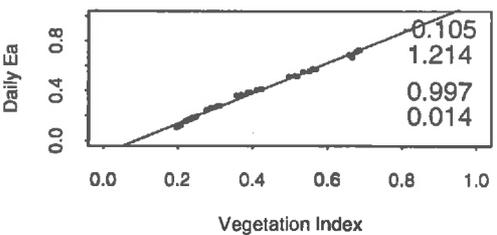
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 40 - \text{Phi} = 15$



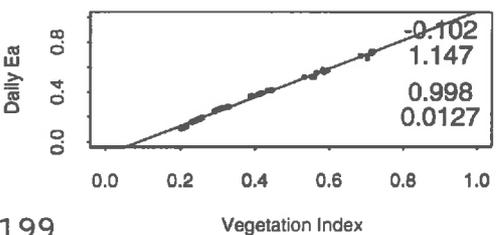
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 40 - \text{Phi} = 190$



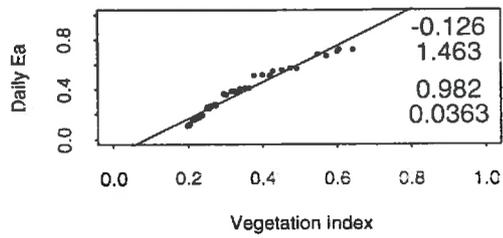
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 50 - \text{Phi} = 15$



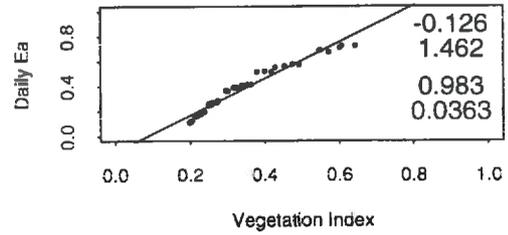
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 50 - \text{Phi} = 190$



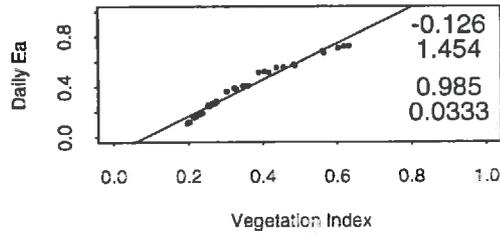
$$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 0 - \Phi = 15$$



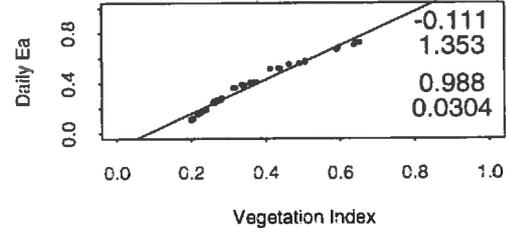
$$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 0 - \Phi = 190$$



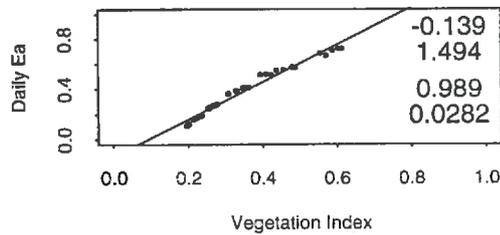
$$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 10 - \Phi = 15$$



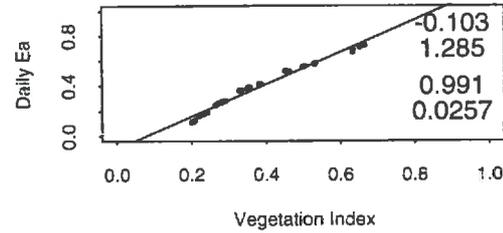
$$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 10 - \Phi = 190$$



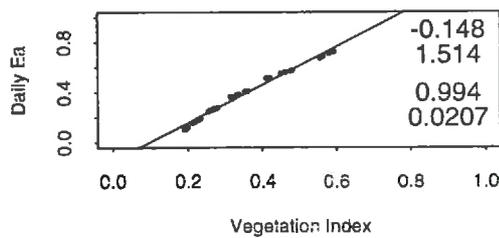
$$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 20 - \Phi = 15$$



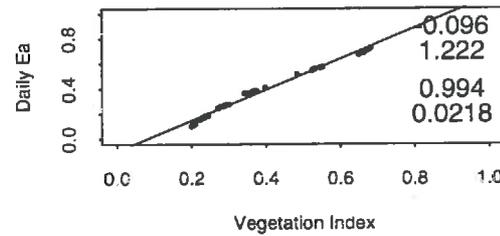
$$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 20 - \Phi = 190$$



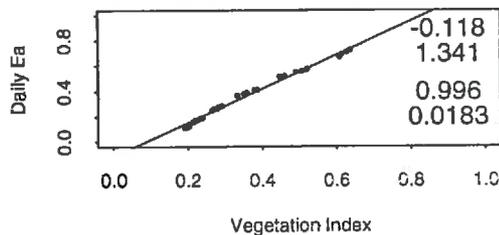
$$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 30 - \Phi = 15$$



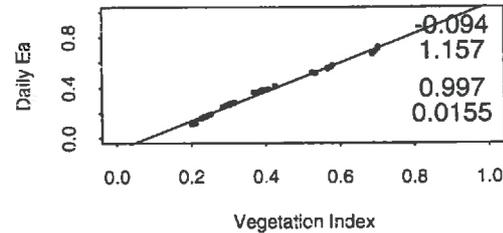
$$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 30 - \Phi = 190$$



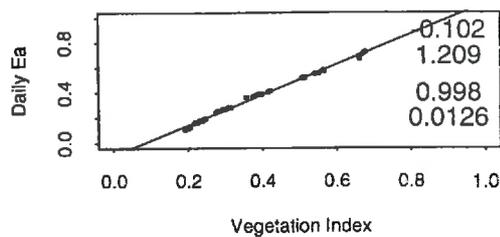
$$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 40 - \Phi = 15$$



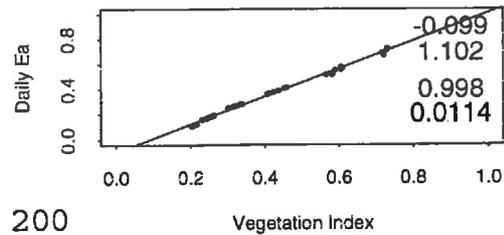
$$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 40 - \Phi = 190$$

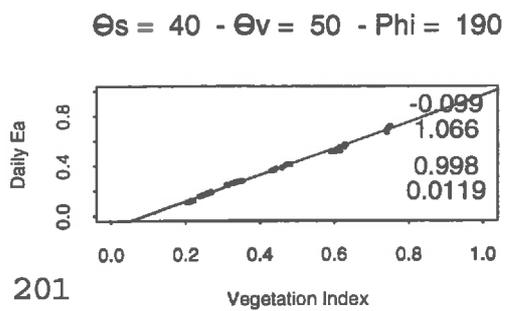
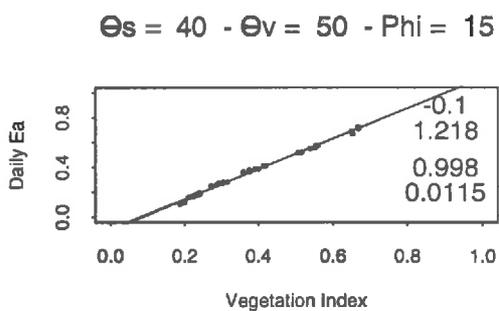
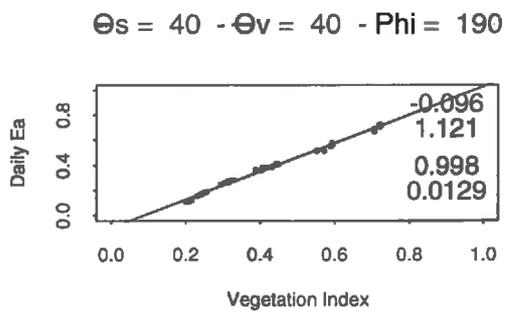
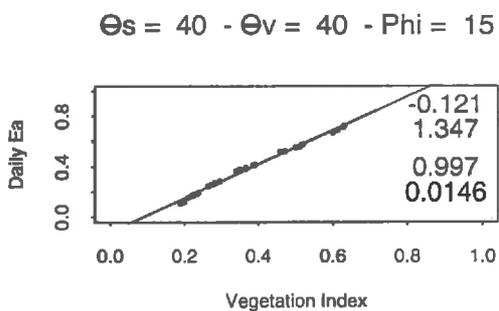
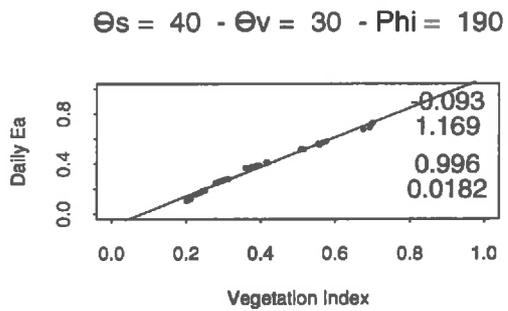
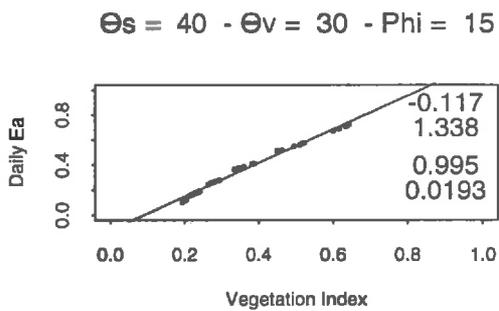
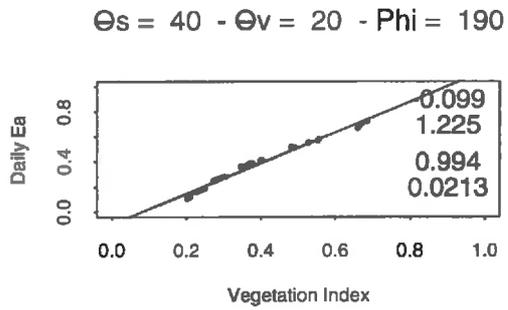
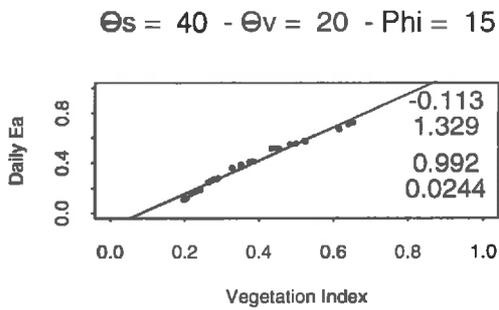
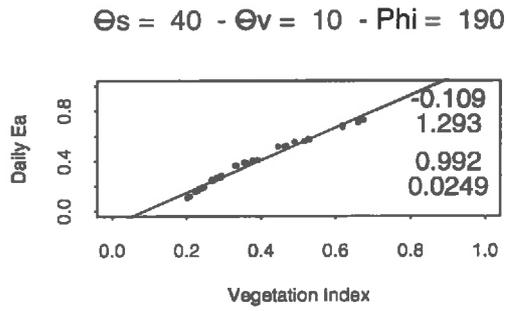
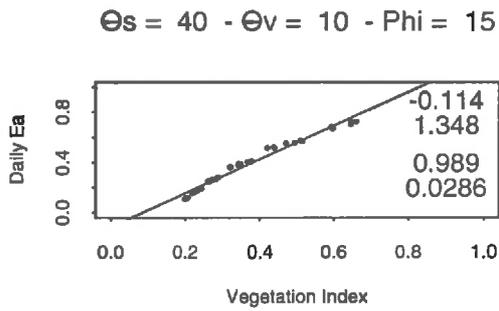
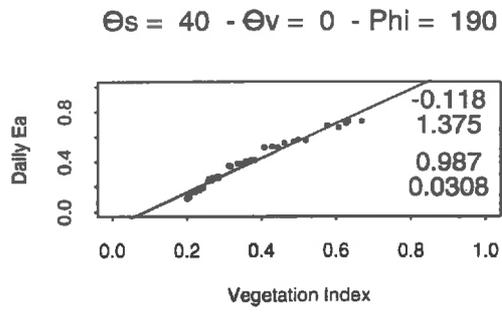
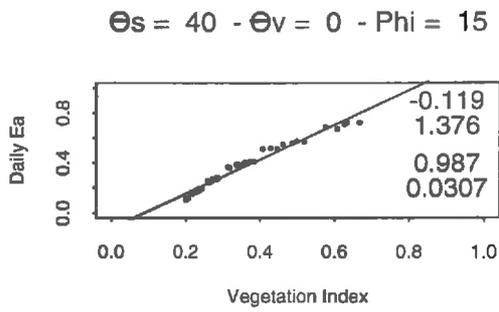


$$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 50 - \Phi = 15$$

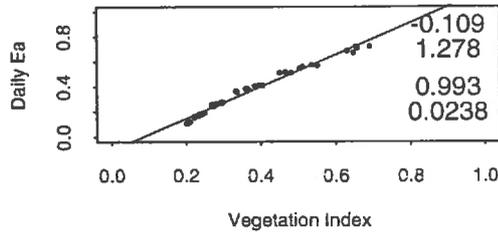


$$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 50 - \Phi = 190$$

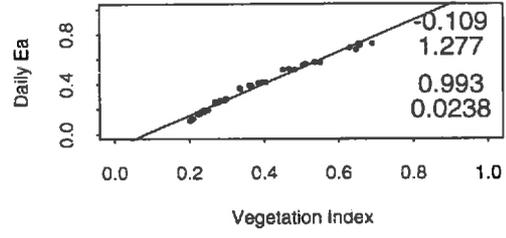




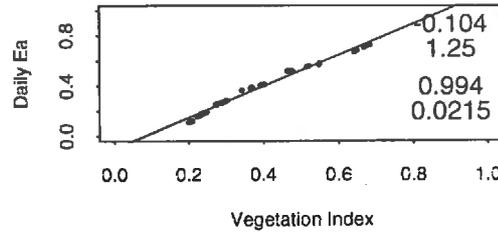
$\Theta_s = 50 - \Theta_v = 0 - \Phi = 15$



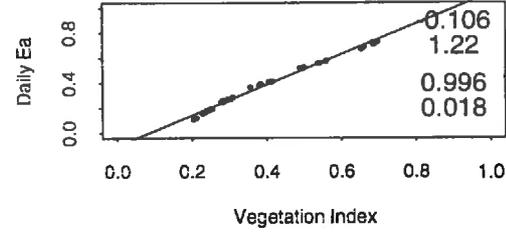
$\Theta_s = 50 - \Theta_v = 0 - \Phi = 190$



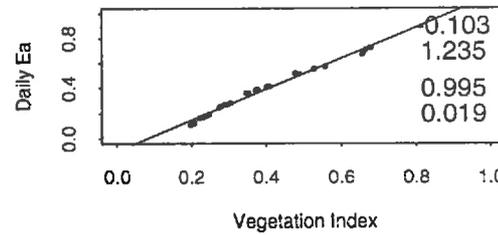
$\Theta_s = 50 - \Theta_v = 10 - \Phi = 15$



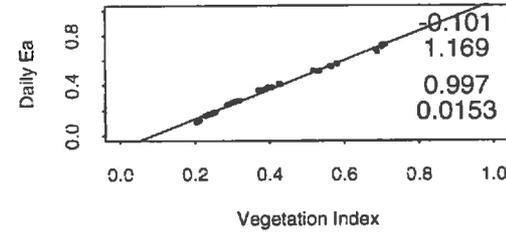
$\Theta_s = 50 - \Theta_v = 10 - \Phi = 190$



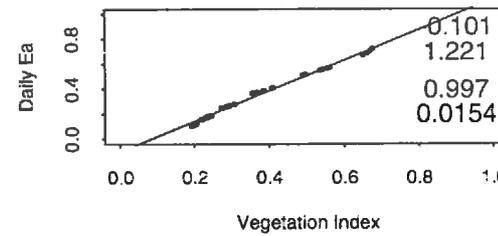
$\Theta_s = 50 - \Theta_v = 20 - \Phi = 15$



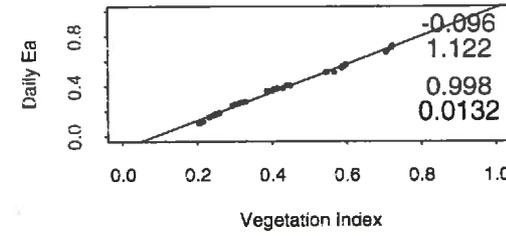
$\Theta_s = 50 - \Theta_v = 20 - \Phi = 190$



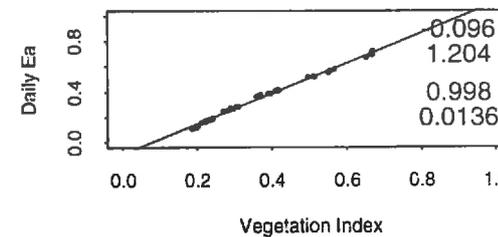
$\Theta_s = 50 - \Theta_v = 30 - \Phi = 15$



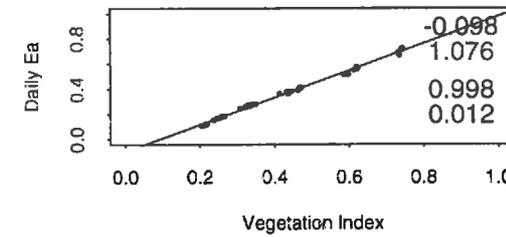
$\Theta_s = 50 - \Theta_v = 30 - \Phi = 190$



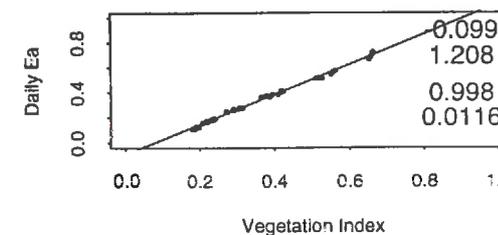
$\Theta_s = 50 - \Theta_v = 40 - \Phi = 15$



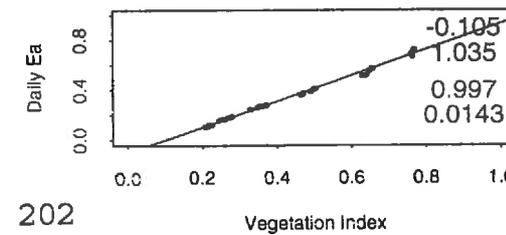
$\Theta_s = 50 - \Theta_v = 40 - \Phi = 190$



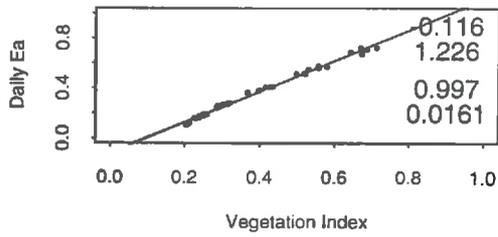
$\Theta_s = 50 - \Theta_v = 50 - \Phi = 15$



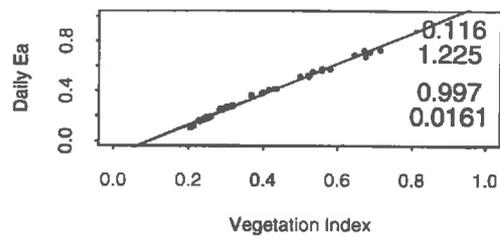
$\Theta_s = 50 - \Theta_v = 50 - \Phi = 190$



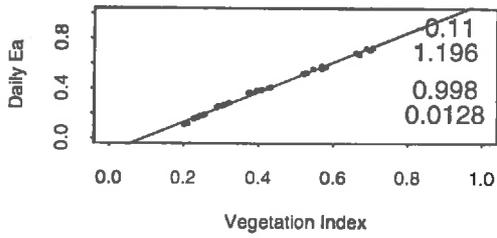
$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 0 - \Phi = 15$$



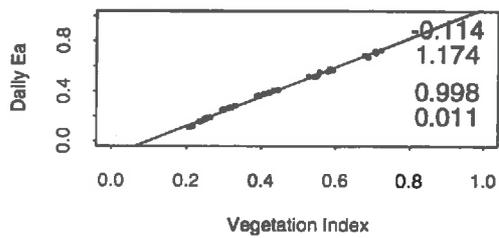
$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 0 - \Phi = 190$$



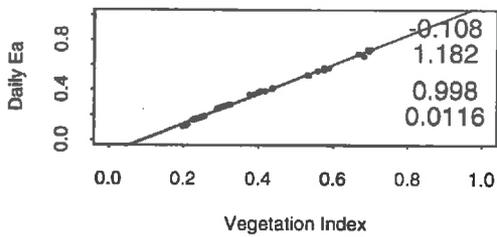
$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 10 - \Phi = 15$$



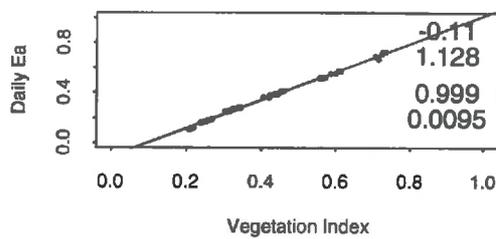
$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 10 - \Phi = 190$$



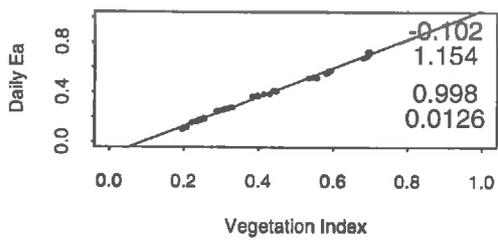
$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 20 - \Phi = 15$$



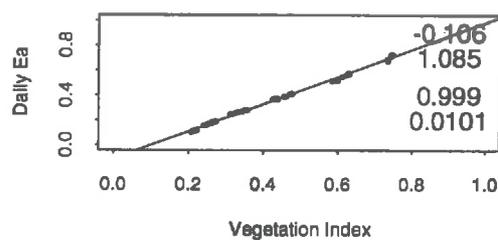
$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 20 - \Phi = 190$$



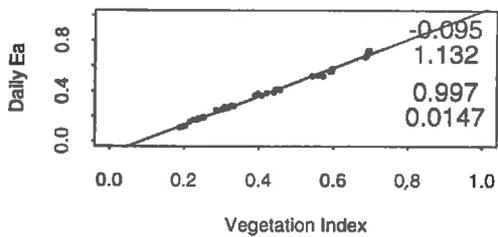
$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 30 - \Phi = 15$$



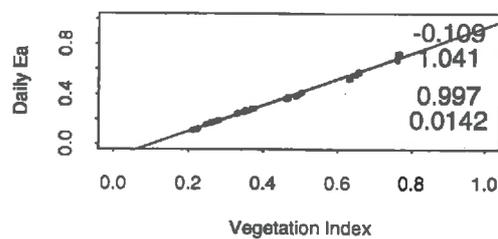
$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 30 - \Phi = 190$$



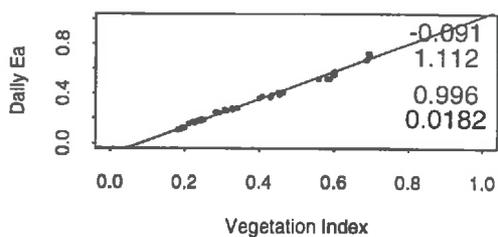
$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 40 - \Phi = 15$$



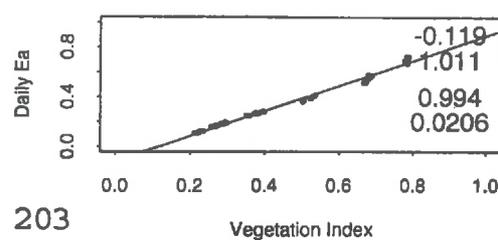
$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 40 - \Phi = 190$$



$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 50 - \Phi = 15$$



$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 50 - \Phi = 190$$



RELATIONS DE MYNENI ENTRE MSAVI ET E_a

Avec

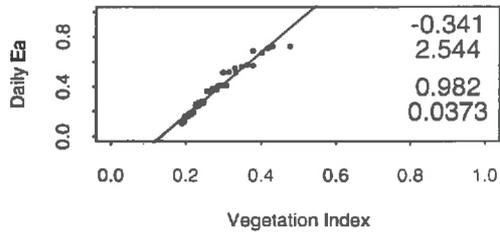
θ_s : angle zénithal solaire.

θ_v : angle zénithal de visée.

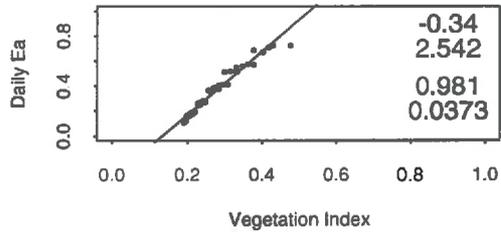
PHI : différence entre les angles azimutaux solaire et de visée.

E_a : efficacité d'absorption journalière

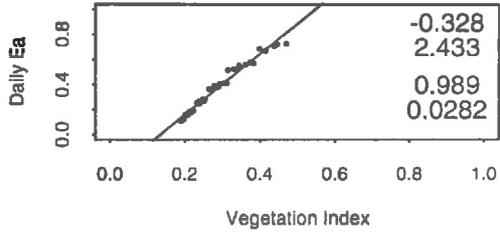
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 0 - \Phi = 15$



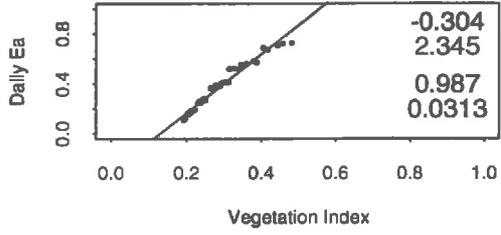
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 0 - \Phi = 190$



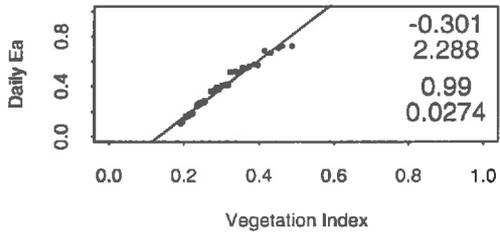
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 10 - \Phi = 15$



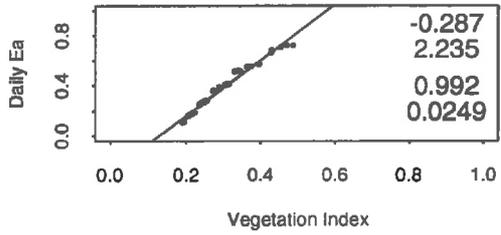
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 10 - \Phi = 190$



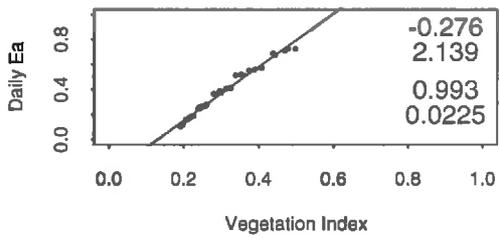
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 20 - \Phi = 15$



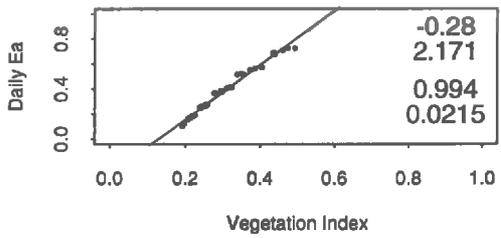
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 20 - \Phi = 190$



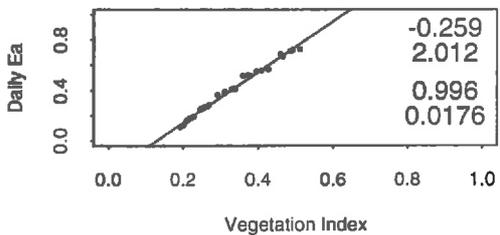
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 30 - \Phi = 15$



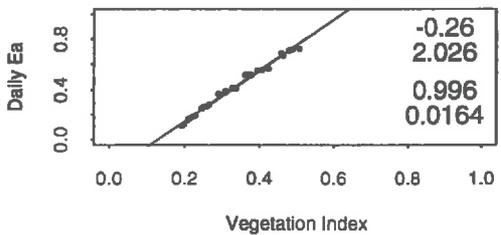
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 30 - \Phi = 190$



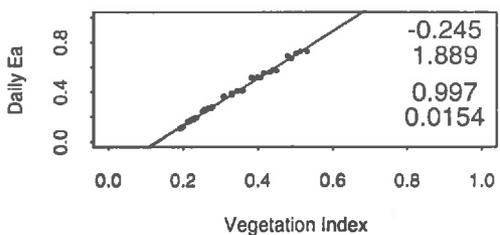
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 40 - \Phi = 15$



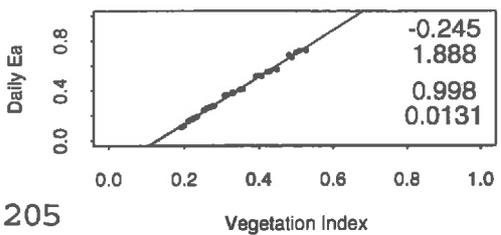
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 40 - \Phi = 190$



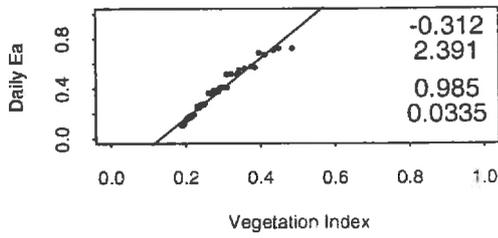
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 50 - \Phi = 15$



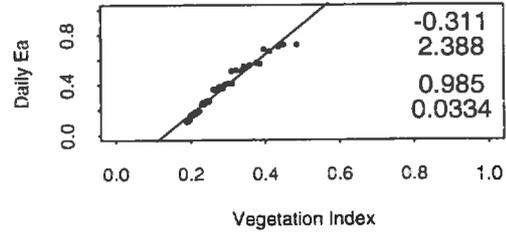
$\Theta_s = 10 - \Theta_v = 50 - \Phi = 190$



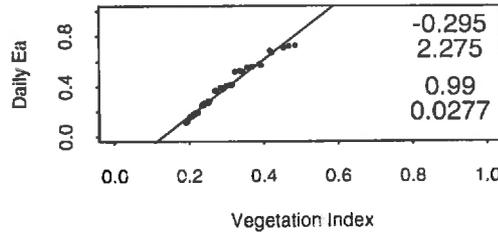
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 0 - \Phi = 15$



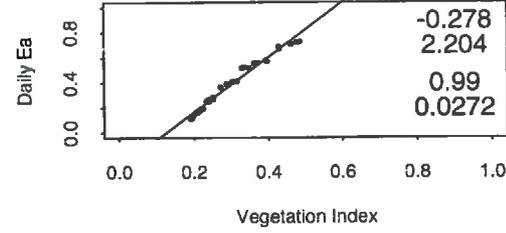
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 0 - \Phi = 190$



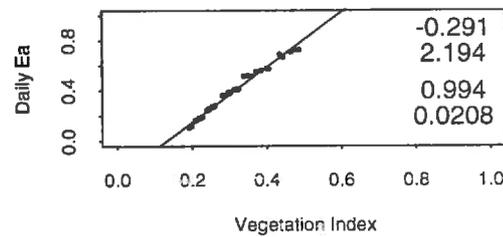
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 10 - \Phi = 15$



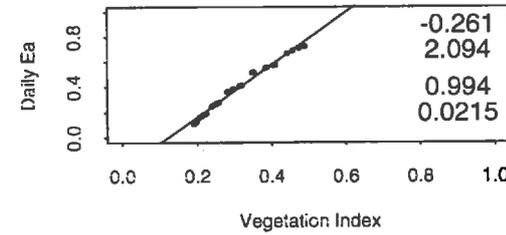
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 10 - \Phi = 190$



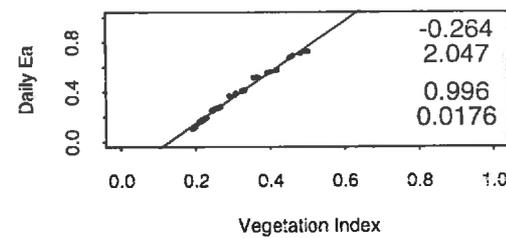
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 20 - \Phi = 15$



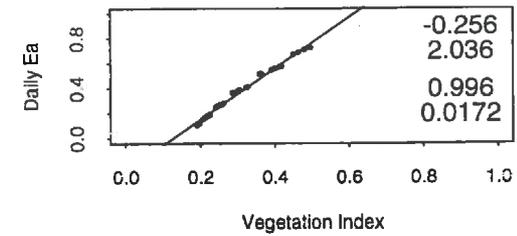
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 20 - \Phi = 190$



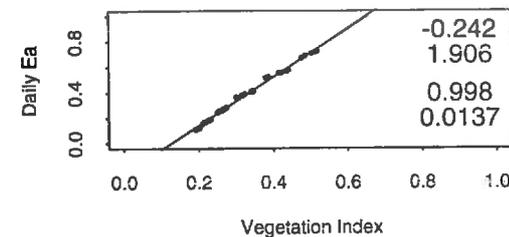
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 30 - \Phi = 15$



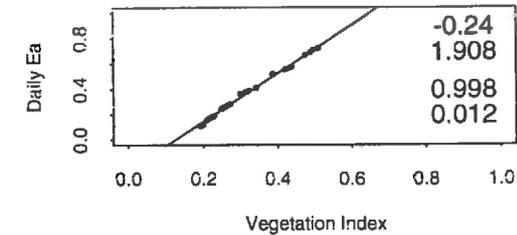
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 30 - \Phi = 190$



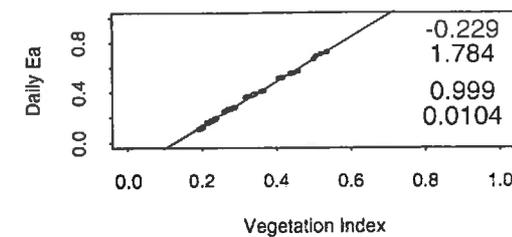
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 40 - \Phi = 15$



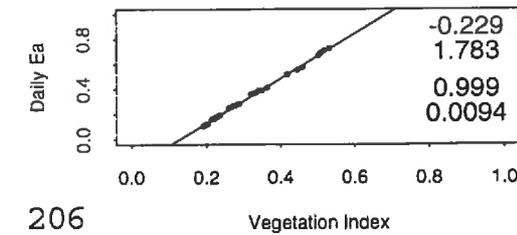
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 40 - \Phi = 190$



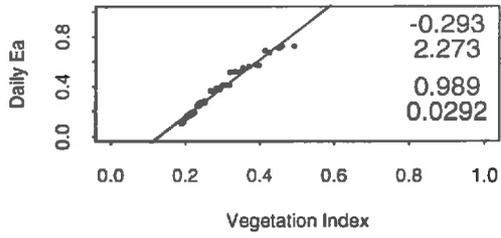
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 50 - \Phi = 15$



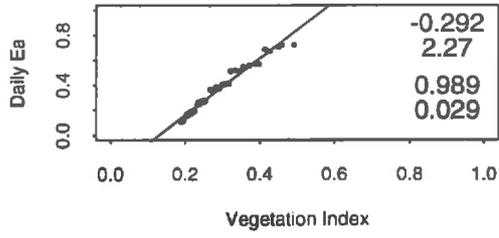
$\Theta_s = 20 - \Theta_v = 50 - \Phi = 190$



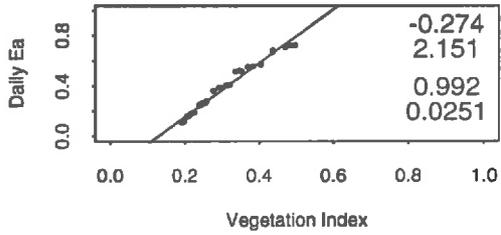
$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 0 - \Phi = 15$



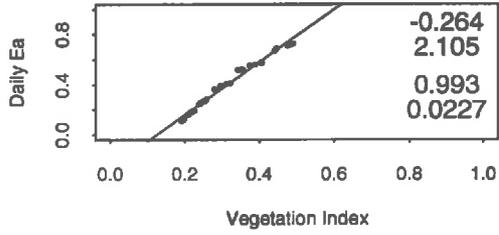
$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 0 - \Phi = 190$



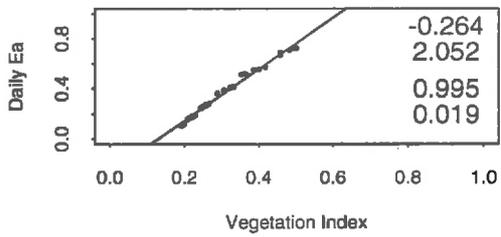
$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 10 - \Phi = 15$



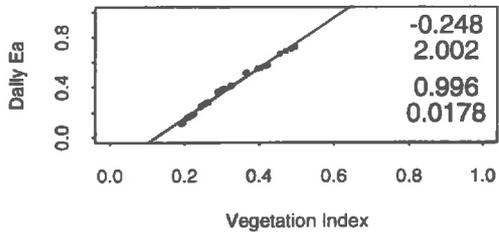
$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 10 - \Phi = 190$



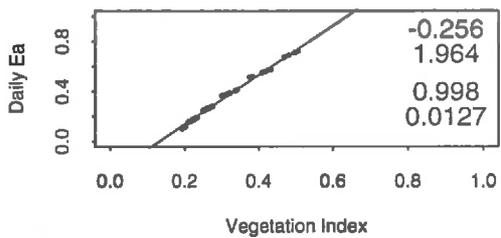
$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 20 - \Phi = 15$



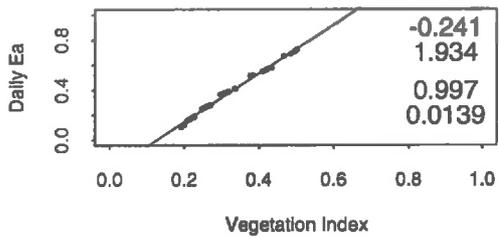
$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 20 - \Phi = 190$



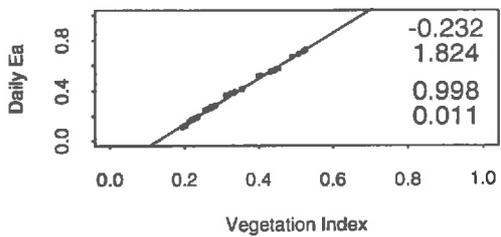
$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 30 - \Phi = 15$



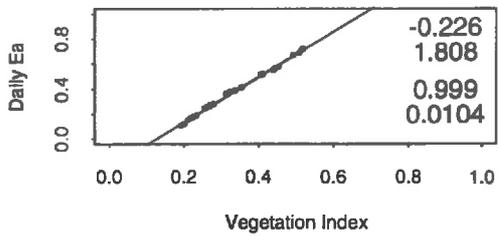
$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 30 - \Phi = 190$



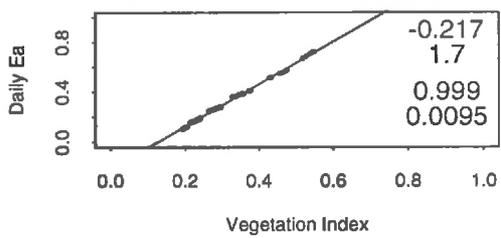
$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 40 - \Phi = 15$



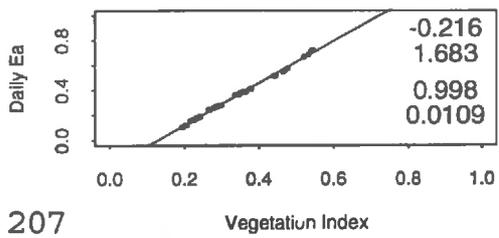
$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 40 - \Phi = 190$



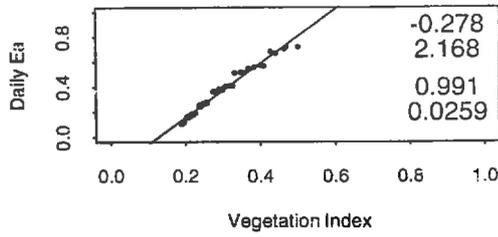
$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 50 - \Phi = 15$



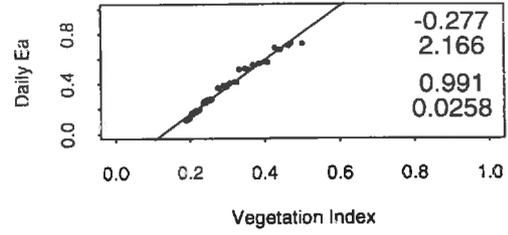
$\Theta_s = 30 - \Theta_v = 50 - \Phi = 190$



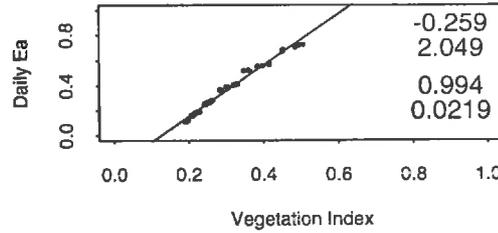
$\Theta_s = 40 - \Theta_v = 0 - \Phi = 15$



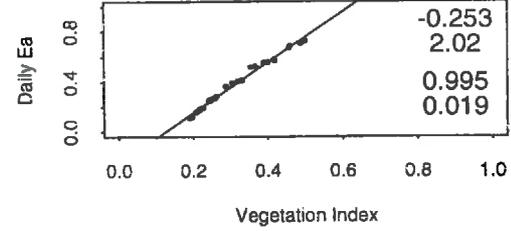
$\Theta_s = 40 - \Theta_v = 0 - \Phi = 190$



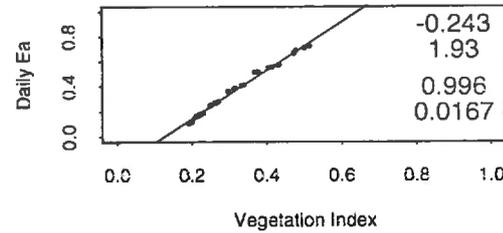
$\Theta_s = 40 - \Theta_v = 10 - \Phi = 15$



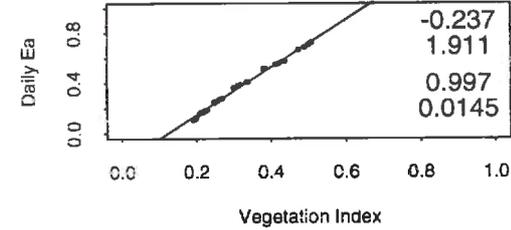
$\Theta_s = 40 - \Theta_v = 10 - \Phi = 190$



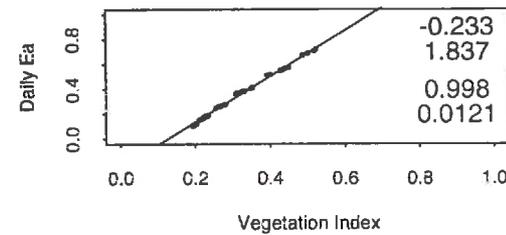
$\Theta_s = 40 - \Theta_v = 20 - \Phi = 15$



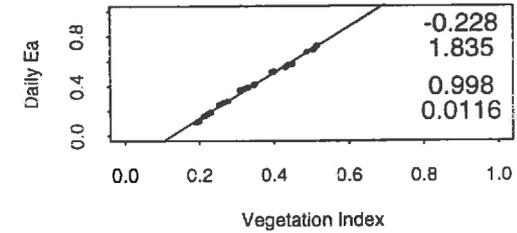
$\Theta_s = 40 - \Theta_v = 20 - \Phi = 190$



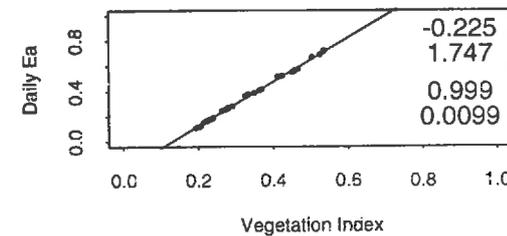
$\Theta_s = 40 - \Theta_v = 30 - \Phi = 15$



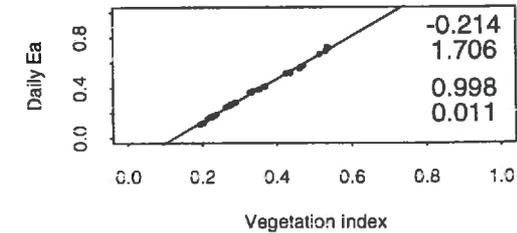
$\Theta_s = 40 - \Theta_v = 30 - \Phi = 190$



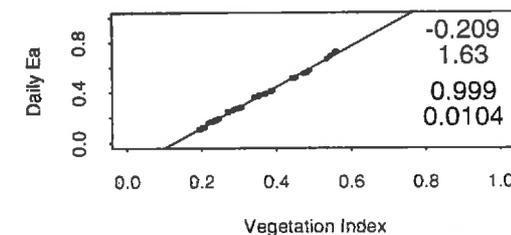
$\Theta_s = 40 - \Theta_v = 40 - \Phi = 15$



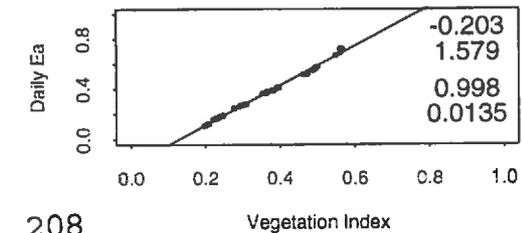
$\Theta_s = 40 - \Theta_v = 40 - \Phi = 190$

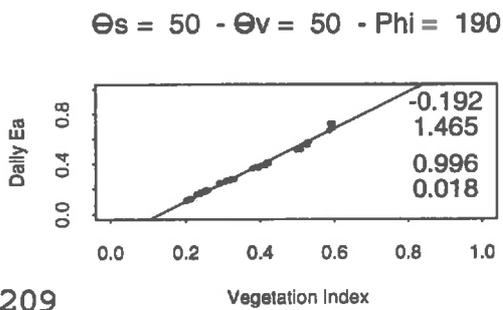
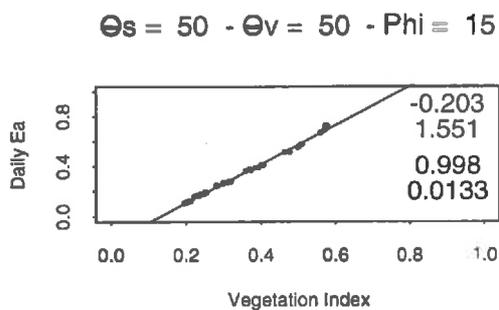
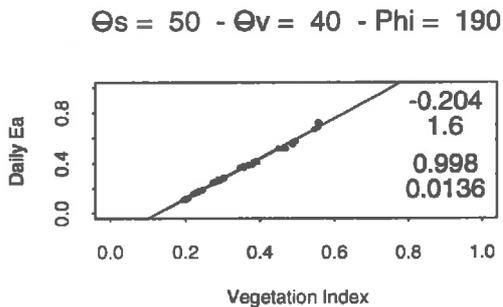
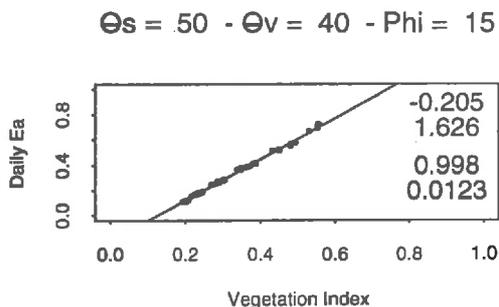
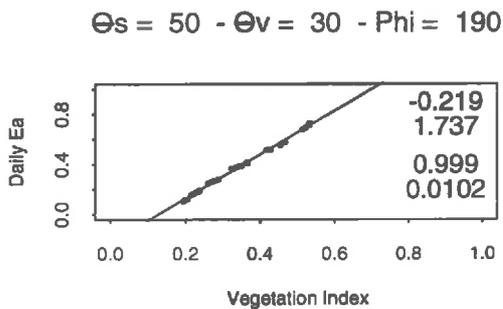
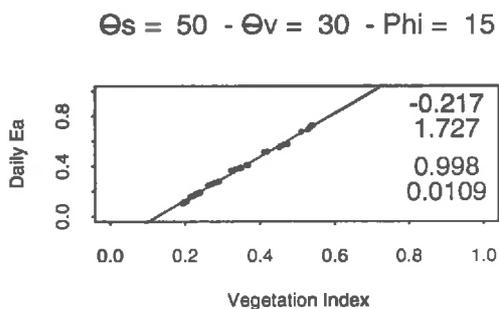
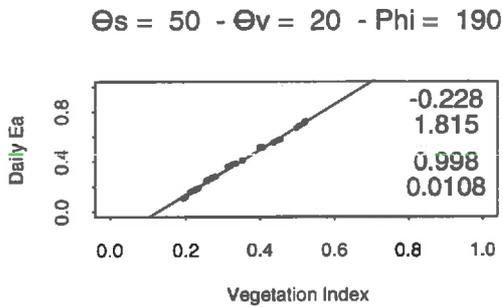
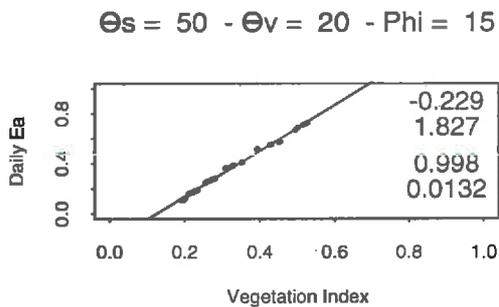
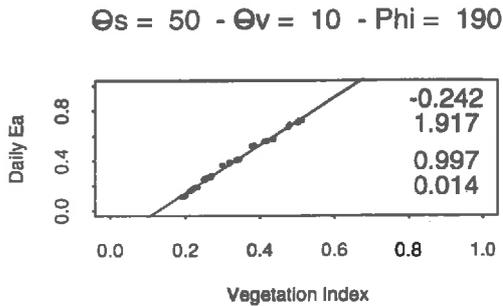
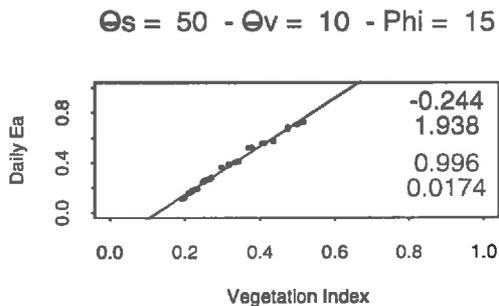
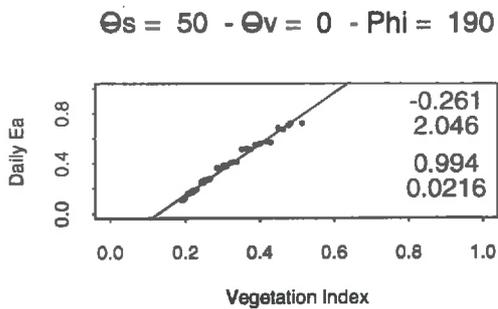
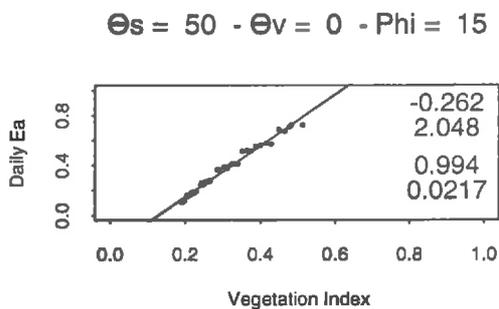


$\Theta_s = 40 - \Theta_v = 50 - \Phi = 15$

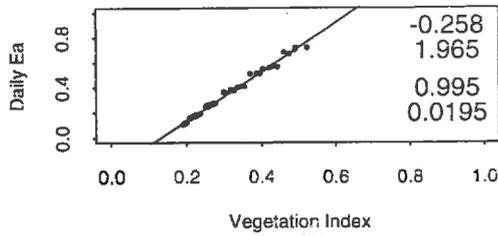


$\Theta_s = 40 - \Theta_v = 50 - \Phi = 190$

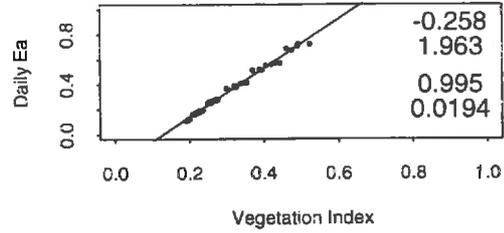




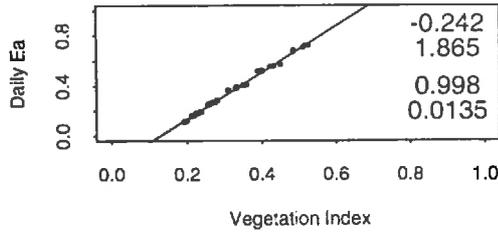
$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 0 - \text{Phi} = 15$$



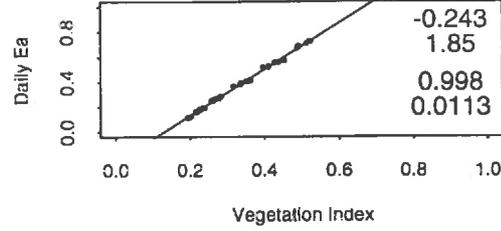
$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 0 - \text{Phi} = 190$$



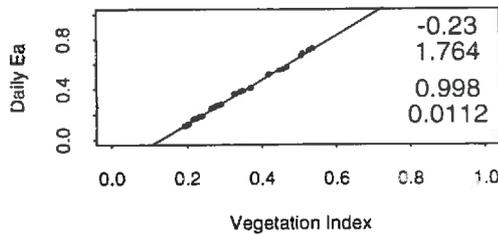
$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 10 - \text{Phi} = 15$$



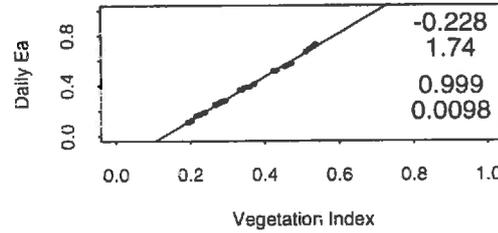
$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 10 - \text{Phi} = 190$$



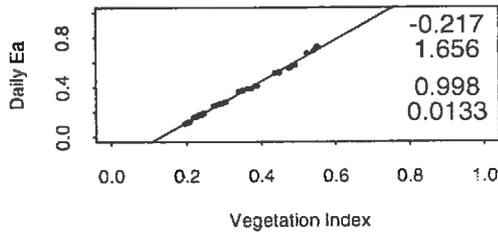
$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 20 - \text{Phi} = 15$$



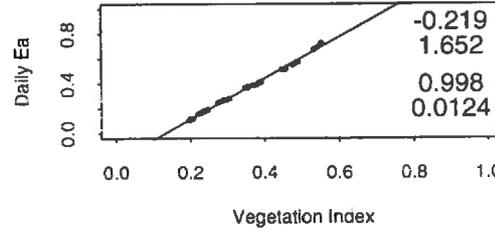
$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 20 - \text{Phi} = 190$$



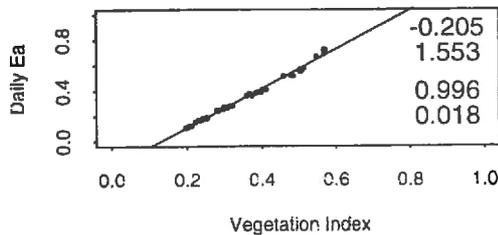
$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 30 - \text{Phi} = 15$$



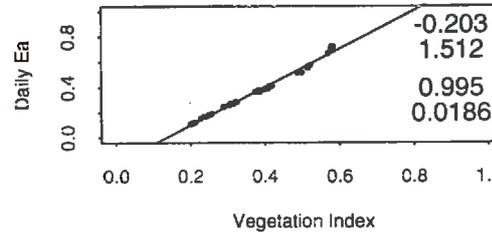
$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 30 - \text{Phi} = 190$$



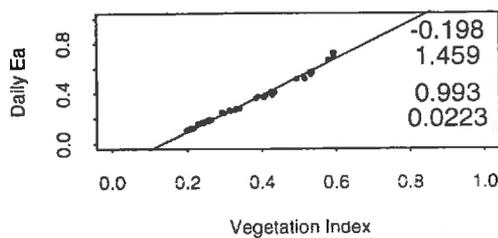
$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 40 - \text{Phi} = 15$$



$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 40 - \text{Phi} = 190$$



$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 50 - \text{Phi} = 15$$



$$\Theta_s = 60 - \Theta_v = 50 - \text{Phi} = 190$$

