Apport des donnees satellitaires en vue de l'estimation de la production primaire nette a l'echelle regionale : cas de l'Afrique de l'ouest

P. Loudjani

▶ **To cite this version:**

P. Loudjani. Apport des donnees satellitaires en vue de l'estimation de la production primaire nette a l'echelle regionale : cas de l'Afrique de l'ouest. Sciences du Vivant [q-bio]. Université Paris Sud - Paris 11; Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Teledetection Spatiale, 1993. Français. NNT : . tel-02850644

HAL Id: tel-02850644
https://hal.inrae.fr/tel-02850644

Submitted on 7 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

TH-EB5

UNIVERSITE ORSAY - PARIS SUD
Laboratoire d'Ecologie Végétale

ECOLE NORMALE SUPERIEURE PARIS
Laboratoire d'Ecologie

N° d'ordre :

THESE

présentée
pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE D'ORSAY - PARIS SUD
DISCIPLINE : SCIENCES DE LA VIE
SPECIALITE : ECOLOGIE VEGETALE
OPTION : ECOPHYSIOLOGIE VEGETALE

APPORT DES DONNEES SATELLITAIRES EN VUE DE L'ESTIMATION DE LA PRODUCTION PRIMAIRE NETTE A L'ECHELLE REGIONALE : CAS DE L'AFRIQUE DE L'OUEST

par

Philippe LOUDJANI

Soutenue le **26 mars 1993** devant le jury composé de :

MM.	**SAUGIER**	**Bernard**	Professeur, LEV, Université Orsay	Président
	MENAUT	**Jean-Claude**	Ingénieur de Recherche, ENS Ecologie, Paris	Examinateur
	SAINT	**Gilbert**	Directeur du LERTS, Toulouse	Examinateur
	KOHLMAIER	**Gundolf**	Professeur, Université Francfort, Allemagne	Rapporteur
	PHULPIN	**Thierry**	Ingénieur CNES, CNES, Toulouse	Rapporteur
	SEGUIN	**Bernard**	Directeur de Recherche, INRA, Avignon	Rapporteur

INRA
STATION DE ZOOTECHNIE
24 SEP. 1993
Domaine St-Paul - B.P. 81
84140 MONTFAVET

A tous ces Homo sapiens generosus

qui m'ont permis d'atteindre ce "tout petit monde".

APPORT DES DONNEES SATELLITAIRES EN VUE DE L'ESTIMATION DE LA PRODUCTION PRIMAIRE NETTE A L'ECHELLE REGIONALE : CAS DE L'AFRIQUE DE L'OUEST

(P. LOUDJANI, France, 1993, V.O.)

une co-production L.E.V., L.E.R.T.S. et E.N.S. Ecologie.
d'après une idée originelle de P.Y. DESCHAMPS
Directeur de la production : B. SAUGIER

Ce manuscrit s'est vu remettre un visa d'exploitation par un jury réuni à Orsay le 26 Mars 1993. Malgré cela, tout public entrant en possession du fascicule est encouragé à y porter un oeil critique. Si une quelconque erreur historique semble s'y être glissée ou si un problème d'interprétation y est relevé, n'hésitez pas à adresser vos remarques au rédacteur en chef :

P. LOUDJANI L.E.R.T.S, 18 avenue Edouard Belin, 31055 TOULOUSE Cedex.

Cet ouvrage n'aurait pu être réalisé sans la contribution, à des degrés divers, de nombreuses personnes dont les noms vont apparaître dans le générique qui suit.

En-cadreurs :
Gérard DEDIEU
Jean-Claude MENAUT
Alain PODAIRE
Gilbert SAINT
Bernard SAUGIER

Correcteurs script et scénario :
Gérard DEDIEU
Gundolf KOHLMAIER
Jean-Claude MENAUT
Thierry PHULPIN
Alain PODAIRE
Gilbert SAINT
Bernard SAUGIER
Bernard SEGUIN

Soutiens à effets spéciaux (1) :
Véronique LEFEBVRE
Eliane DESPICIE
Michel DESPICIE
Fernande PY
Soeurs, frère, *et al.*

Soutiens à effets spéciaux (2) :
Jeanine BATLLE
Béatrice BERTHELOT
François CABOT
Gérard DEDIEU
Christine FAURE
Alexandre FAIZOUN
Valery GOND
Yann KERR
François LAVENU
Alain PODAIRE
Jean-Philippe PUYRAVAUD
Géraldine VERRIERES
Nicolas VIOVY
Pierre THIBAUT
Babs, Biquet, Patio *et al.*
Babeth, Yvette, André *et al.*

Assistants informatique :
François CABOT
Philippe CHIBAUDEL
Jane LECOMTE
Carlos PRADO
Nicolas VIOVY

Assitants accueil :
Marguerite DAUNIS
Lionel GOURDEAU
Juliette ISSOT
Elisabeth LEFEBVRE
Yves VIVEN

Sparring partners :
Olivier ARINO
Béatrice BERTHELOT
François CABOT
Alexandre FAIZOUN
Valéry GOND
Laurent KERGOAT
Alain PODAIRE
Pierre THIBAUT

avec, par ordre alphabétique :

Angora AMAN
Jeanine BATLLE
François CABOT
Sabine DE BRISIS et Grégoire
Ramata DIOFFO
Olivier ARINO
Béatrice BERTHELOT
Ghani CHEHBOUNI
Gérard DEDIEU
Alexandre FAIZOUN et Solange
Mamoudou BA
Annick BLUSSON
Philippe CHIBAUDEL
Pierre-Yves DESCHAMPS
Christine FAURE

avec, par ordre alphabétique (suite) :

Carole FERRIE	Alberte FISCHER et Bertrand	Catherine FOUQUET
Maylis GALAUP	Jacques GIGNOUX	Valery GOND et Florence
Lionel GOURDEAU et Anne	Christian JACQUET	Laurent KERGOAT et françoise
Yann KERR	Laurent LAGUERRE	François LAVENU
Michèle LASEK	Jane LECOMTE	Véronique LEFEBVRE
Catherine LEPRIEUR	Sami LOUAHALA	Sylvie MAGGION
Gilles MERSADIER	Philippe MAISONGRANDE	Jean-Claude MENAUT
Frédérique MEUNIER et Jérôme	Sophie MOULIN	Marianne MOUSSEAU
Thérèse NGUYEN	Bernard PINTY	Alain PODAIRE
Carlos PRADO	Jean-Philippe PUYRAVAUD	Jaguo QI et Ouioui
Hafizur RAHMAN	Paul RANDRIAMANANTENA	Jean-Louis ROUJEAN et Marie
Anne RUIMY et Alan	Gilbert SAINT	Bernard SAUGIER
Françoise SAUNIER	George SERPANTIE	Laurent THEZENAS
Pierre THIBAUT et Sophie	Géraldine VERRIERES et Marc	Jean-Bruno VICKOS
Nicolas VIOVY	Stéphane WAGNER	Jean-Pierre WIGNERON

et Daniel HOSTE...

Certaines scènes ont été tournées hors des studios du LERTS, nous remercions donc les "habitants" du "DEA Ecophysiologie Orsay", de "l'ENS Ecologie Paris", du "Vers luisant Toulouse", et du "Flamingo Toulouse".

A tous merci de m'avoir supporté...
et surtout merci pour tout ce que vous m'avez apporté

REMERCIEMENTS

Sous cette forme plus conventionnelle, je tiens à exprimer ma reconnaissance et mon respect au Professeur **B. SAUGIER**, Responsable du Laboratoire d'Ecologie Végétale de l'Université d'Orsay, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de diriger cette thèse ainsi que d'en présider le jury. L'apport de son expérience et de ses critiques ont été d'une aide très précieuse tout au long de mes travaux.

Ma reconnaissance va également au Professeur **R. BARBAUT**, Responsable du Laboratoire d'Ecologie de l'Ecole Normale Supérieure de Paris, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire.

Ma profonde gratitude et mon respect vont à **G. SAINT**, Directeur du Laboratoire d'Etudes et de Recherches et Télédétection Spatiale de Toulouse, pour m'avoir également accueilli dans son laboratoire et pour ces critiques, la grande patiente et le soutien dont il m'a accordé le privilège. Merci enfin d'avoir accepté de prendre part au jury de ma thèse.

J'exprime mes plus vifs remerciements au Professeur **G. KOHLMAIER** (Professeur à l'Université de Physique-Chimie de l'atmosphère de Francfort), au Docteur **T. PHULPIN** (Ingénieur au CNES Toulouse) et au Docteur **B. SEGUIN** (Directeur de recherches à la station de bioclimatologie de l'INRA d'Avignon) qui ont accepté la lourde charge d'être rapporteurs de ce travail.

Ma profonde gratitude et mon amitié vont ensuite au Docteur **J.C. MENAUT**, Ingénieur de recherches au Laboratoire d'Ecologie de l'ENS Paris, qui m'a largement fait bénéficier de ses connaissances sur les savanes et qui a accepté d'être examinateur.

Je garde une grande reconnaissance à **A. PODAIRE** (Ingénieur CNES Toulouse) et au Docteur **G. DEDIEU** (Ingénieur CNES Toulouse) pour l'encadrement qu'ils ont assuré pendant une partie de ma thèse ainsi que pour la grande amitié dont ils m'ont fait part.

Merci à toutes ces personnes qui ont eu la gentillesse de me faire confiance et qui m'ont apporté un soutien moral, matériel et financier à mon retour "d'une année d'exil".

Je tiens à remercier les différentes personnes qui, au court de ma thèse, m'ont fourni des documents ainsi que de précieux conseils; je citerai tout particulièrement **F. BLASCO** (Responsable de l'ICIV de Toulouse) ainsi que **G. LEMAIRE** et ses collaborateurs de l'INRA de Lusignan.

Enfin, cette thèse n'aurait pu être menée à bien sans le travail, les conseils et le soutien moral de nombreuses personnes qui m'ont côtoyé durant ces trois années. Qu'ils sachent qu'ils m'ont beaucoup apporté et que je leur suis énormément redevable.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Depuis quelques années, la communauté scientifique internationale a mis l'accent sur l'observation de modifications de composition de l'atmosphère terrestre, d'évolution de paysages d'ampleur planétaire. Les phénomènes à l'origine de cette prise de conscience et maintenant bien connus du grand public sont :

- en tout premier lieu, l'augmentation de la teneur atmosphérique en CO_2, CH_4 et certains autres gaz dits à "effet de serre" ;

- les variations de teneur en ozone troposphérique conduisant à l'observation d'un "trou d'ozone" au dessus de l'Antarctique ;

- la chute de pluies "acides" en Europe du Nord et en Amérique du Nord.

La compréhension des phénomènes qui sont responsables de ces changements ne peut se faire que par une étude globale de l'état et de la dynamique des processus qui gouvernent les interactions sols-plantes-atmosphère. Parmi ceux-ci, le processus de productivité primaire nette (PPN = taux d'absorption nette du CO_2 par les végétaux) joue un rôle majeur. La PPN est à la base de toute installation de chaînes alimentaires. De plus, de par la position qu'elle occupe dans le cycle global du carbone, elle joue un rôle important sur les variations saisonnières de la teneur en CO_2 atmosphérique. Son intensité résulte de l'action conjointe des conditions climatiques, des conditions édaphiques et de l'action de l'homme. Toute variation intervenant sur l'un de ces facteurs devrait donc être reflété au niveau de la PPN. L'évaluation et l'amélioration des connaissances sur la production primaire sont donc d'un très grand intérêt pour les climatologues, les écologues et pour les gestionnaires des ressources naturelles.

Depuis longtemps les écologues ont tenté de mettre au point ou d'améliorer des méthodes d'estimation de la production primaire. A l'échelle de la parcelle, la méthode la plus traditionnelle consiste en des prélèvements et pesées d'échantillons de biomasse sur des surfaces relativement restreintes. D'autres méthodes non destructrices ont également été testées telles que l'estimation à vue, la méthodes des points quadrats, etc. Ces différentes méthodes seront un peu plus détaillées ultérieurement dans la partie présentation bibliographique de ce travail. Pour des raisons de limitations techniques, de lourdeur financière et temporelle, leur application sur de très larges surfaces est actuellement impossible.

Pouvoir disposer de données fiables, sur l'ensemble de la planète, avec une répétitivité temporelle élevée requiert donc l'utilisation de nouvelles méthodes et de nouveaux types d'outils. Les satellites, par leurs caractéristiques, sont rapidement apparus comme des instruments pouvant répondre à ce type d'exigence. En fonction du satellite utilisé, la couverture complète du globe peut aller de 2 fois par mois (SPOT) jusqu'à 2 fois par jour (NOAA/AVHRR). Une partie du traitement des données enregistrées est souvent automatisée, ce qui conduit à une réduction encore plus importante des délais d'obtention de ces données. Ces instruments permettent ainsi d'avoir une vision quasi instantanée des zones étudiées et offrent également une homogénéité des informations nettement supérieures à celles provenant de mesures locales. De plus, les satellites

permettent de fournir des informations concernant des zones où l'accès est très difficile voir impossible (régions montagneuses, forêts denses, ...). Ils peuvent s'avérer également fort utiles pour de nombreux pays où l'information, même peu précise, fournie par les satellites peut pallier la quasi-inexistence de bases de données.

La possibilité d'utiliser les enregistrements multispectraux satellitaires dans l'étude de la végétation a vu le jour dans les années 1970 (Rouse *et al.*, 1974; Richardson and Wiegand, 1977). Ces études ont montré que l'énergie solaire réfléchie dans les longueurs d'onde du rouge et du proche infrarouge était fonction de la quantité de matière végétale verte située dans le champ de vue du capteur. Une présentation plus détaillée de la télédétection sera faite dans la partie bibliographie. Les combinaisons les plus utilisées sont le rapport simple (SR) et l'indice de végétation normalisé (NDVI). Cependant, la réflectance des sols influe plus ou moins fortement sur la valeur de ces indices. De ce fait, d'autres combinaisons de canaux ont été testées pour tenter d'isoler la réponse du sol de celle de la végétation.

A présent, de nombreux travaux font état de relations entre ces indices et l'indice foliaire (LAI), le taux de recouvrement du sol, la quantité de biomasse végétale (Wiegand and Richardson, 1984; Asrar *et al.*, 1985; Gallo *et al.*, 1985; Asrar *et al.*, 1986).

Plusieurs travaux ont consisté en l'établissement de relations empiriques entre le cumul de NDVI et la quantité de biomasse observée en fin de saison de végétation (Tucker *et al*, 1985; Diallo *et al.*, 1991; Prince, 1991; Wylie *et al*, 1991). Etant établies à partir des données de terrain ces relations donnent, bien évidemment, des estimations en accord avec les observations. Seulement, chaque relation est spécifique d'une région particulière. L'estimation de la biomasse produite à l'échelle globale ou même régionale nécessite donc l'établissement de nombreuses relations. De plus, les milieux naturels présentant une variabilité interannuelle assez forte, chaque relation doit être recalculée chaque année. Cette démarche, pour être valide à grande échelle, nécessite donc la mise en place régulière de lourdes campagnes de mesures de biomasse. A ce jour, peu de régions ont été suivies de la sorte. En Afrique de l'Ouest, seules quelques régions sahéliennes ont ainsi été concernées (Nord du Sénégal, "Gourma" malien, Niger). Enfin, les écarts par rapport à la droite de régression sont souvent assez conséquents ce qui entraîne une forte incertitude sur les valeurs de biomasse ainsi estimées.

Une autre approche se base sur la mise en évidence d'une relation quasi linéaire entre le NDVI et l'interception du Rayonnement Photosynthétiquement Actif (RPAi) par le couvert végétal (Wiegand and Richardson, 1984; Asrar *et al.*, 1986; Choudhury, 1987). L'intensité photosynthétique étant corrélée à la quantité de RPA incident, il semblait donc possible d'estimer la productivité primaire à partir de données de réflectances rouge et proche infrarouge. Ainsi, Asrar *et al.* (1985), en adaptant le modèle déterministe de Monteith (1972) (détaillé ultérieurement), ont obtenu de bonnes corrélations à l'échelle d'une parcelle de Blé. Ils ont ainsi montré, que lorsqu'il est possible de caractériser correctement le milieu étudié et que les conditions de mesures radiométriques sont bien maîtrisées, cette démarche d'estimation de la PPN semble largement satisfaisante. En effet, dans leur travail, leurs mesures radiométriques ont

été effectuées au sol à l'aide d'un radiomètre portable. Les mesures ont toujours été faites à la même heure, par temps clair avec une visée au nadir. Il n'y a donc pas eu de problème de perturbations du signal d'ordre atmosphérique ou directionnel. Les caractéristiques spectrales du sol sous-jacent étaient connues. La végétation étudiée n'était constituée que d'une seule espèce dont les caractéristiques biologiques sont bien connues. Il leur a été également possible d'estimer le stress hydrique imposé par le milieu.

Prince (1991) a discuté des possibilités d'extension de la démarche d'Asrar *et al.* (1985) à l'échelle globale sans cependant réaliser d'application. L'auteur porte deux critiques principales :

- les données nécessaires à l'application à l'échelle globale risquent d'être insuffisantes ou trop imprécises. Ainsi, sont posés les problèmes de disponibilité de valeurs d'efficience de conversion et de perturbation des enregistrements radiométriques satellitaires ;
- une étude de sensibilité du modèle est nécessaire afin de discuter de la validité d'utilisation de certains paramètres en tant que valeurs constantes (efficience photochimique, respiration de croissance, respiration de maintenance).

Goward et Dye (1987) ont, quant à eux, estimé la productivité de plusieurs biomes répartis sur l'ensemble du continent nord-américain. Pour cela, ils ont adapté le modèle de Terjung *et al.* (1976) dans lequel les valeurs de photosynthèse maximale sont fonction de la température et du rayonnement global. L'application a été faite pour 48 sites régulièrement enquêtés et qui ont été regroupés en 12 biomes différents. Les résultats obtenus ont montré une tendance générale à la sous estimation de la PPN avec un comportement beaucoup plus marqué pour des biomes particuliers tels que les toundras. Lors de cette étude, les auteurs ont été confrontés à plusieurs problèmes :

- le manque de données climatiques (température, rayonnement global) ;
- le besoin d'identifier à l'avance le biome étudié ;
- le manque de données concernant les caractéristiques du biome étudié (bilan hydrique, taux moyen de respiration de la végétation, résistance à la diffusion du CO_2,...).

Actuellement, malgré les résultats encourageants obtenus par les différents auteurs décrits ci-dessus, aucune estimation réelle de la PPN n'a été réalisée à l'échelle globale ou régionale. Le but de ce travail est de tester les possibilités d'utilisation de l'outil satellitaire pour estimer la Production Primaire Nette à l'échelle globale. Pour cela, les données satellitaires ont été combinées à un modèle semi-empirique mettant en relation la PPN avec la quantité de rayonnement solaire interceptée par le couvert végétal.

L'Ecologie et la Télédétection ont, jusqu'à présent, été peu mises en relation. Les premiers chapitres de ce manuscrit consisteront donc en une présentation bibliographique de quelques notions de base.

Dans le premier chapitre, après différents rappels sur la photosynthèse, quelques méthodes d'estimations de la PPN à différentes échelles de mesures seront présentées. Nous

verrons que la modélisation constitue le seul moyen disponible actuellement pour estimer la PPN à l'échelle globale.

Le modèle déterministe de Monteith (1972), qui relie la PPN au rayonnement solaire absorbé par les végétaux, par ses différentes propriétés m'a paru être le modèle le plus apte à répondre à la problématique posée par ce travail. Une présentation détaillée en est faire dans le deuxième chapitre.

Dans le chapitre trois, quelques rappels seront faits concernant la tétédétection en insistant sur les paramètres qui peuvent être utiles à l'estimation de la PPN.

Une présentation rapide du milieu d'étude retenu sera donnée au chapitre quatre.

Le chapitre cinq sera consacré aux différents traitements effectués sur les données satellitaires.

Dans le chapitre six, sera exposée la démarche suivie pour proposer une version modifiée du modèle de Monteith utilisant des données satellitaires à haute résolution temporelle. Quelques hypothèses testées pour extraire, des données satellitaires, des informations concernant les caractéristiques des couverts végétaux observés, y seront également exposées.

Puis, les résultats seront présentés, suivis d'une discussion. L'accent sera surtout porté sur les avantages et les inconvénients de la méthodologie proposée dans ce travail par rapport à une approche de modélisation statistique de type modèle de Lieth and Whittaker (1975). Cette approche, mettant en relation des données climatologiques et des données de PPN, constitue actuellement la seule méthode proposant des estimations de PPN à l'échelle globale.

Enfin, ce travail sera conclu en effectuant un rapide bilan des différents enseignements apportés (limitations, perspectives, améliorations envisageables), puis en exposant les applications en cours ou à venir permises par ce type d'approche.

CHAPITRE I

PHOTOSYNTHESE
ET
PRODUCTION PRIMAIRE

CHAPITRE I

PHOTOSYNTHESE ET PRODUCTION PRIMAIRE

1.1) Mécanismes de la photosynthèse

1.11) Définition

La photosynthèse est le processus biologique caractéristique des plantes vertes et de quelques bactéries et qui utilise l'énergie lumineuse pour transformer chimiquement le dioxyde de carbone de l'atmosphère (CO_2) en glucides. Cette production de matière organique est accompagnée d'une production d'oxygène (O_2). Les pigments responsables de la photosynthèse sont des chlorophylles, d'où le terme d'**assimilation chlorophyllienne** donné comme synonyme.

L'équation globale de la photosynthèse peut simplement être résumée sous la forme:

$$CO_2 + 2\ H_2O + \text{énergie lumineuse} \text{ ------> } (CH_2O) + O_2 + H_2O$$

En plus du carbone (C), de l'hydrogène (H) et de l'oxygène (O), les plantes incorporent également de l'azote (N) et du soufre (S) via les réactions photosynthétiques. Bien que la photosynthèse puisse être résumée sous la forme d'une équation simple, le processus global photosynthétique est extrêmement complexe. Il comporte une centaine d'étapes qui sont subdivisées en deux séquences, d'abord les réactions dites lumineuses, ou **phase claire**, suivies des réactions dites obscures ou **phase sombre.**

Comme nous l'avons mentionné, la photosynthèse ne se produit que s'il y a apport d'énergie lumineuse. Cependant, l'utilisation de l'énergie solaire à des fins photosynthétiques est effectuée avec une très faible efficacité chez les végétaux. Pour un couvert végétal, environ 20 % du rayonnement global incident est réfléchi ou transmis. Sur les 80 % absorbés, la majeure partie sert aux processus de transpiration ou est dissipée par pertes thermiques. En fait, **au maximum 3 à 5 % du rayonnement global incident est utilisé pour la photosynthèse.**

1.12) Les pigments assimilateurs et leur localisation

Chez les végétaux supérieurs, les pigments assimilateurs sont regroupés en deux catégories : les pigments chlorophylliens et les caroténoïdes.

Les **chlorophylles a** et les **chlorophylles b** présentent des pics d'absorption dans les longueurs d'onde bleue (vers 450 nm) et rouge (vers 650 nm) (fig.1.1).

Figure 1.1 .a

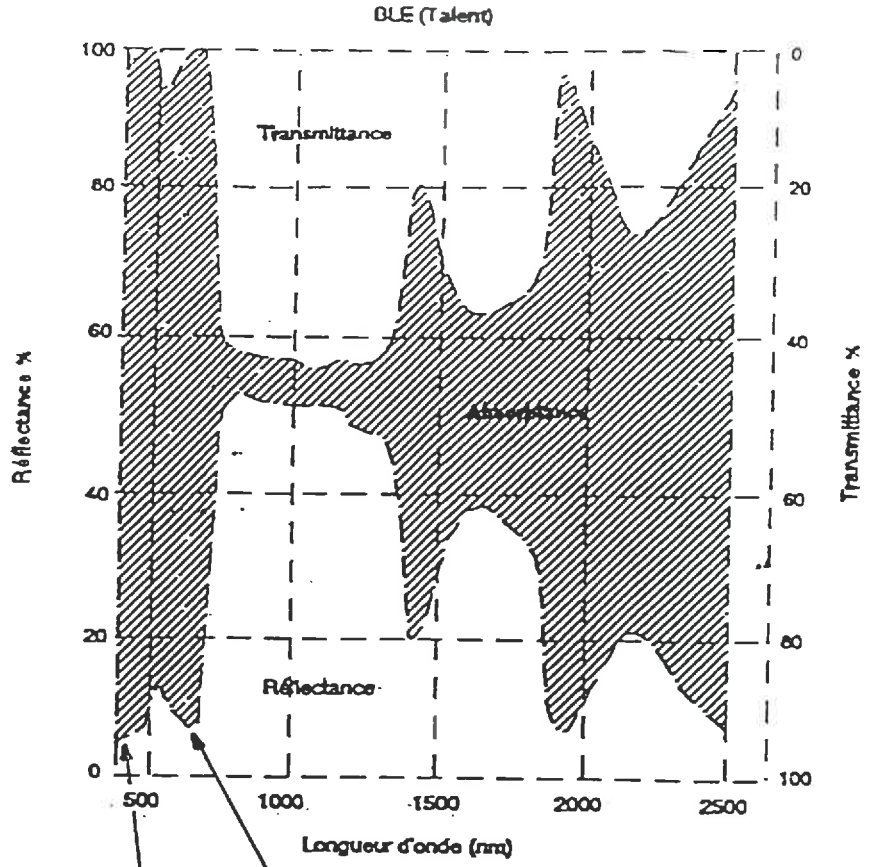


Figure 1.1.b

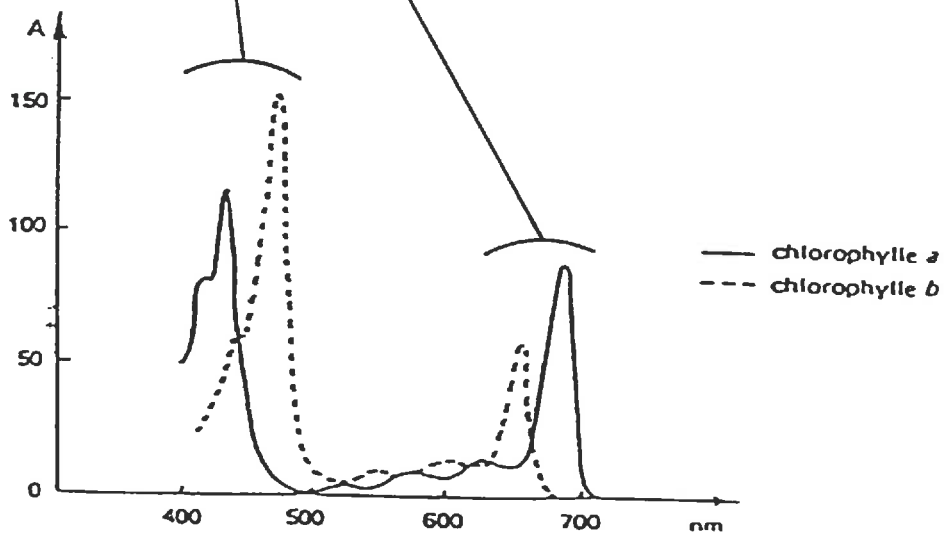


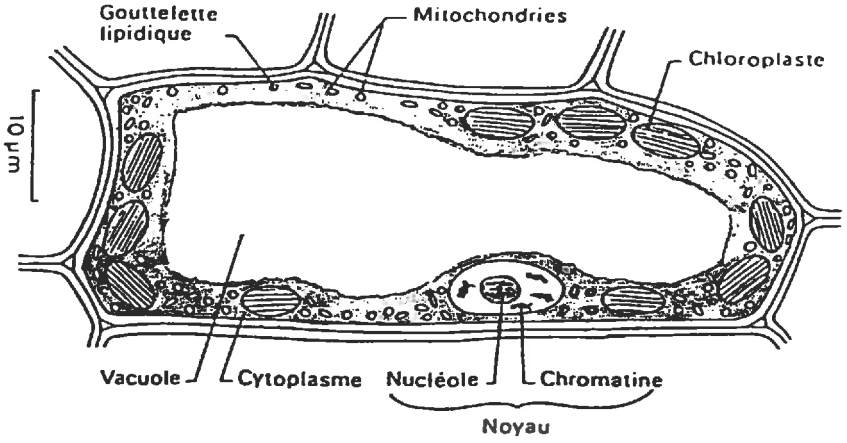
Figure 1.1 .a : Evolution des propriétés optiques d'une feuille de blé en fonction de la longueur d'onde spectrale.

d'après Guyot, (1983).

Figure 1.1.b : Spectres d'absorption des chlorophylles a et b. En abscisse λ en nm; en ordonnée, absorbance (log(Io/I) avec Io lumière incidente et I lumière transmise) pour une solution molaire (une mole par litre, éther éthylique) dans une cuve de 1cm d'épaisseur.

d'après Heller, (1989).

(A)



(B)

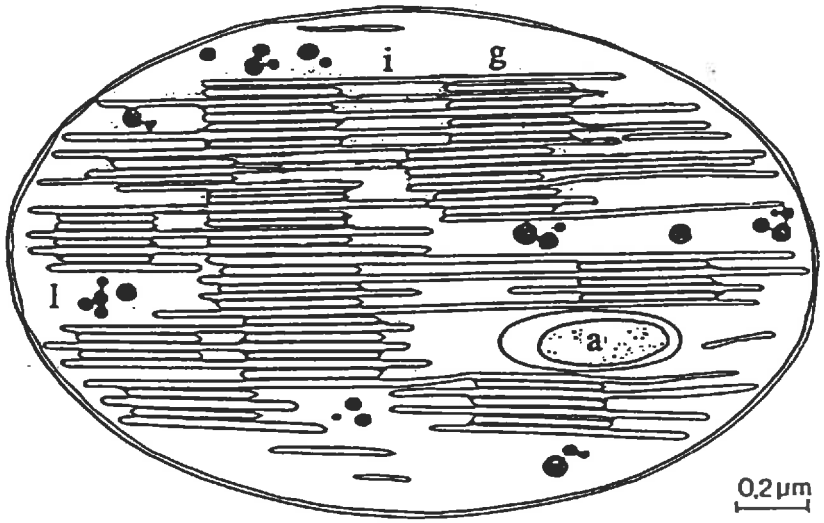


Figure 1.2 : Schéma d'une cellule végétale (A) et d'un chloroplaste (B)(Helodea).

a : grain d'amidon
g : granum (empilement de thylacoïdes)
i : lamelle intergranaire (= thylacoïde du stroma)
l : globule lipidique

d'après Heller, (1989).

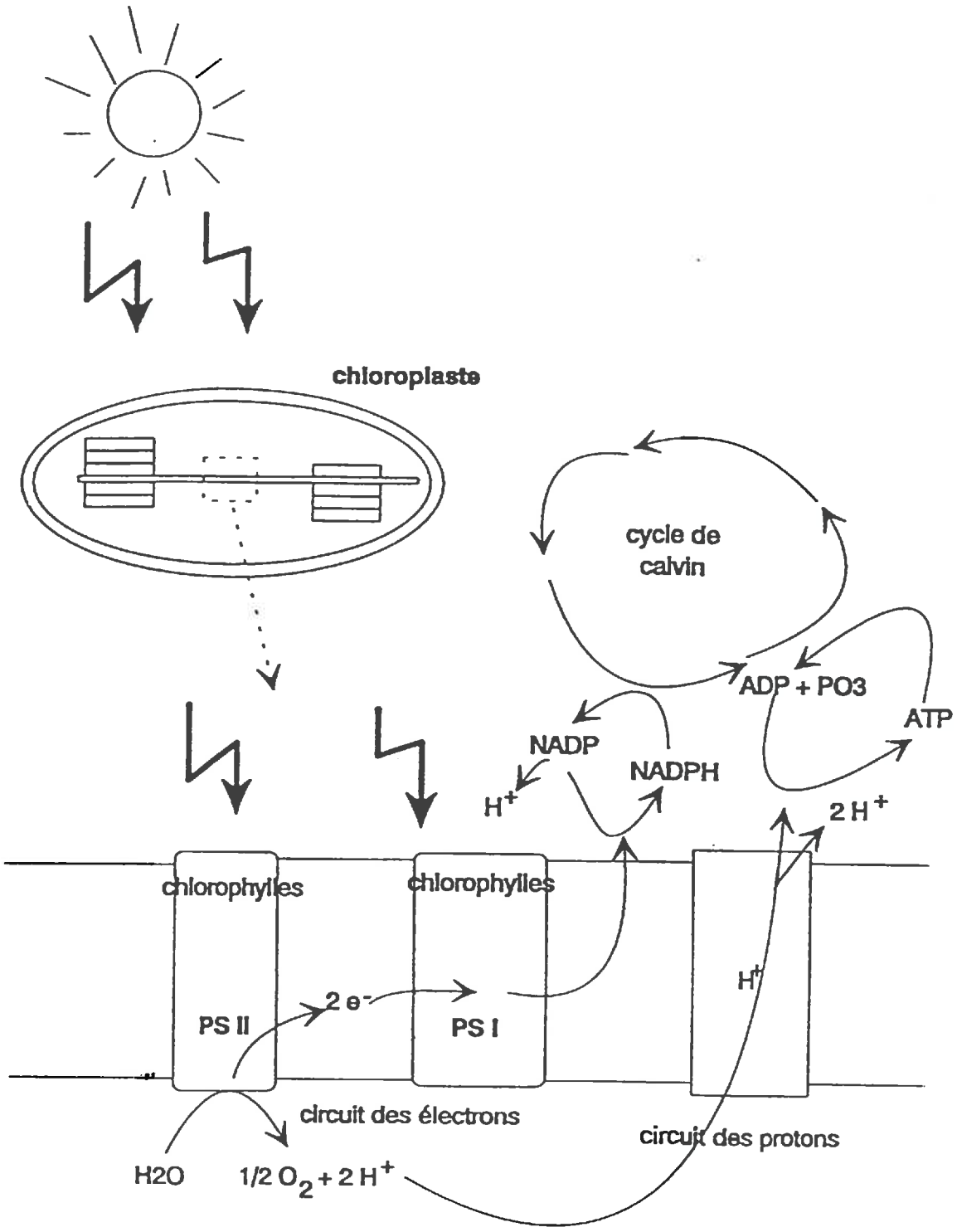


Figure 1.3 : Présentation schématique des réactions de la phase claire de la photosynthèse.

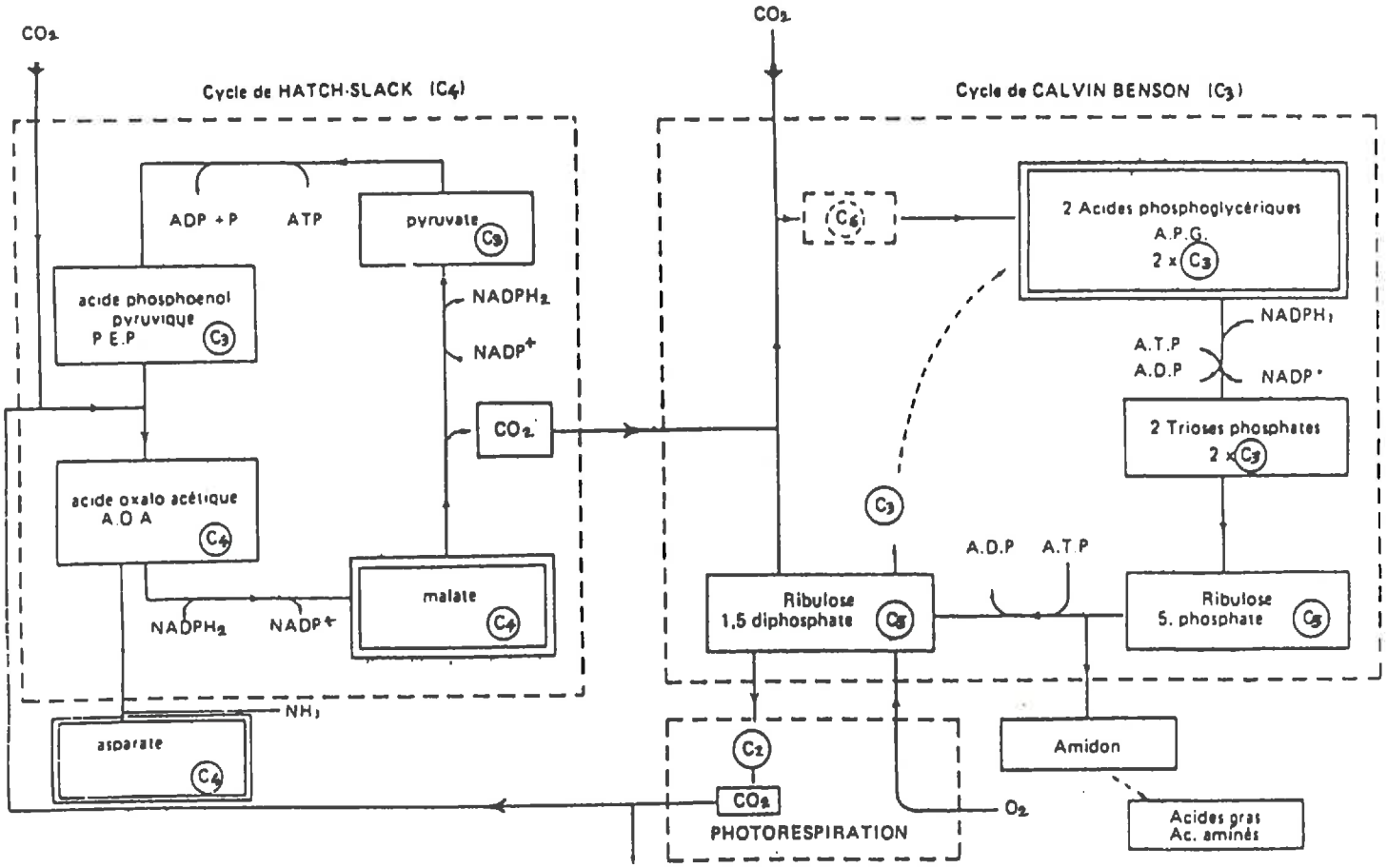


Figure 1.4 : Présentation schématique des cycles de corboxylation en C_3 et C_4.
1- Cycle de CALVIN-BENSON pour les plantes en C_3
2- Cycle de HATCH-SLACK associé au cycle de CALVIN-BENSON pour les plantes en C_4

Les deux premiers produits formés sont doublement encadrés.
C_5 : composé à 5 atomes de carbone.

d'après Vilain, (1987).

Les caroténoïdes, qui comprennent **carotènes** et **xanthophylles,** absorbent dans le bleu-vert avec un maximum vers 480-500 nm.

Chez les végétaux supérieurs, les pigments assimilateurs sont localisés dans des **chloroplastes**. Ce sont des organites ayant généralement l'aspect de lentilles arrondies d'une longueur variant de 3 à 10 µm et d'une épaisseur allant de 1 à 4 µm (fig.1.2). Les pigments sont situés dans les membranes des **thylacoïdes**. Dans le **stroma** (intérieur non différencié du chloroplaste), se déroulent les étapes chimiques de la photosynthèse depuis la fixation du CO_2 jusqu'à la synthèse de glucides.

1.13) Les réactions lumineuses ou phase claire

Dans les membranes des thylacoïdes sont fichées des structures protéiniques associées à des pigments assimilateurs nommées **photo systèmes**. Il existe deux types de photo systèmes dont l'un (**PS II**) absorbe l'énergie lumineuse dans le rouge (vers 680 nm) et l'autre (**PS I**) vers 700 nm. Dans le PS II, l'énergie absorbée par les chlorophylles a, ou qui leur est transmise par les pigments accompagnateurs (chlorophylles b, caroténoïdes), sert à dissocier des molécules d'eau en deux composants : l'hydrogène (protons) et l'oxygène avec libération d'électrons (**photolyse de l'eau**). Les réactions s'opérant au niveau des PS I et PS II conduisent à la synthèse d'**ATP** (Adénosine Tri Phosphate, molécule énergétique) et de **NADPH** (réducteur) (Fig. 1.3).

1.14) Les réactions obscures ou phase sombre

L'énergie lumineuse transformée en énergie chimique sous forme de NADPH et d'ATP, durant la phase claire, est utilisée dans différents mécanismes chez les plantes. Il en est ainsi pour le métabolisme de l'Azote et du Soufre. Cependant, la principale utilisation demeure l'assimilation du CO_2 et sa transformation en matière organique. Le cycle d'incorporation du CO_2 est communément appelé **cycle de Calvin-Benson** (Calvin, 1956) (Fig.1.4).

La première étape du cycle consiste en une carboxylation d'un corps à cinq carbones (C5), le Ribulose 1-5 bi-phosphate (**RubP**), pour donner deux corps en C3 (acide phospho glycérique = APG). L'enzyme responsable de cette carboxylation s'appelle la RubP carboxylase/oxygénase ou plus communément **Rubisco**. Il est à noter que cette enzyme représente souvent près de la moitié des protéines solubles du chloroplaste. L'APG formé est transformé en triose phosphate grâce à l'NADPH et l'ATP fournis durant la phase claire. Les triose phosphates (C3) pourront, soit être polymérisés en glucides de poids moléculaire plus élevé, soit servir à régénérer du RubP.

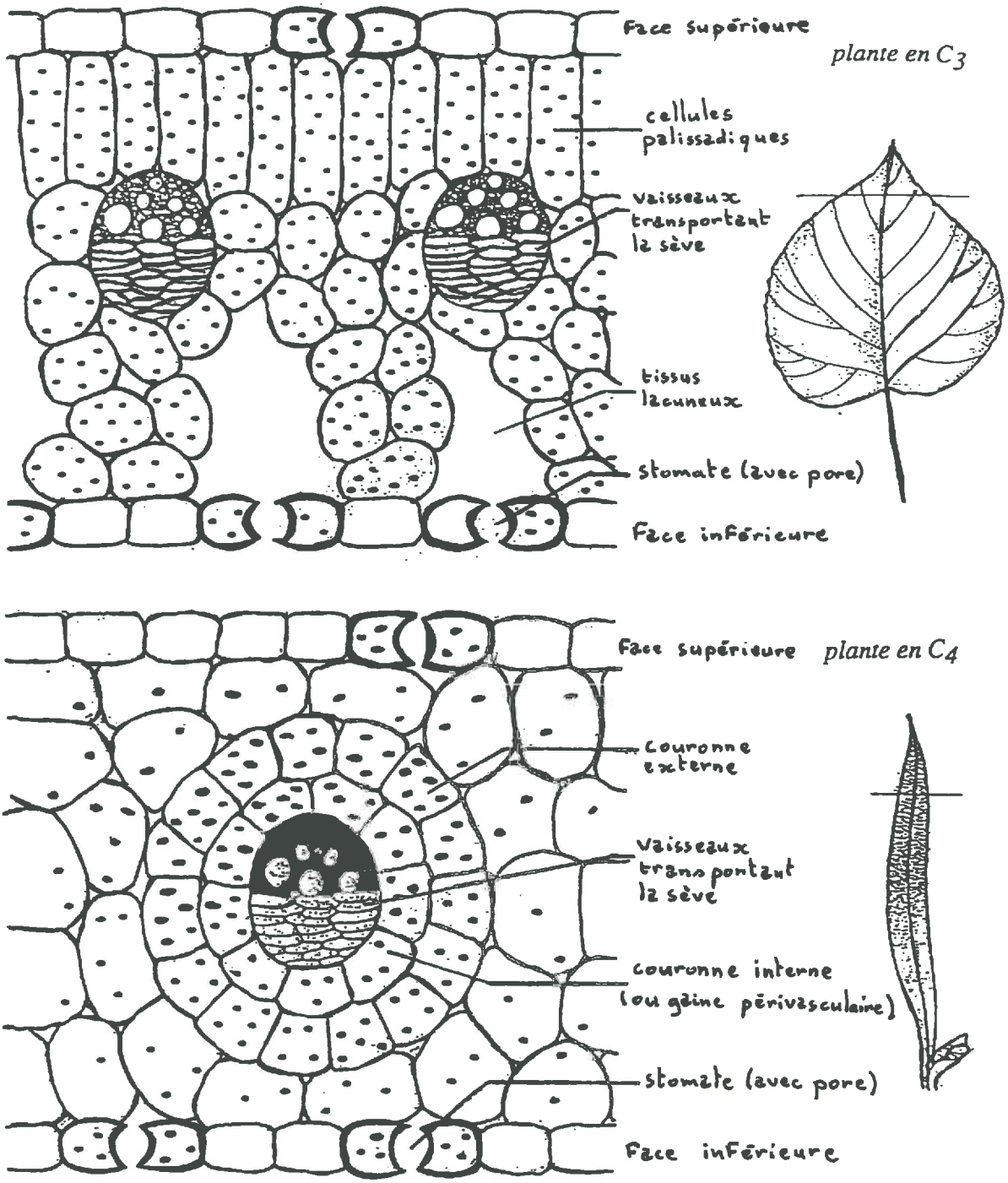


Figure 1.5 : Coupes transversales d'une feuille de plante en C_3 et d'une feuille de plante en C_4 montrant les différences de structures anatomiques conduisant à des systèmes différents d'assimilation du CO_2.

d'après Somerville et Somerville, (1984).

1.15 La photorespiration

La cause de la photorespiration réside dans les propriétés de la Rubisco. En effet, cette enzyme peut procéder à des carboxylations mais également à des oxygénations du RubP. Ce cycle métabolique se déroule en même temps que la photosynthèse (donc à la lumière) et se traduit globalement par une consommation d'O_2 et un rejet de CO_2 d'où le terme de **photorespiration.** En conséquence, ce mécanisme réduit donc l'efficacité de la photosynthèse. Il peut, selon les espèces végétales, diminuer le rendement photosynthétique de 30 à 50 %.

1.2) Les différents mécanismes photosynthétiques

Bien que le cycle d'assimilation du CO_2 (Calvin-Benson) soit un mécanisme existant chez toutes les plantes vertes, certaines ont développé un mécanisme supplémentaire d'absorption du CO_2. Cette particularité a permis d'établir un nouveau mode de classification des plantes. Ainsi, selon le mode d'assimilation initial du CO_2 elles sont regroupées sous le nom de **C3, C4 et CAM.**

1.21) Les plantes en C3

Chez les plantes dites en C3, le type d'assimilation du CO_2 est celui décrit jusqu'à présent, c'est à dire le cycle Calvin-Benson. Dans ce mécanisme, le premier corps formé est un corps en C3 (APG) d'où l'appellation de ces plantes. Les "C3" représentent le type le plus répandu à travers le monde. C'est le cas de tous les arbres et de la grande majorité des plantes des zones tempérées.

1.22) Les plantes en C4

Chez les "C4", le CO_2 est initialement fixé sur une molécule en C3 (Phospho Enol Pyruvate PEP) pour donner un corps en C4 (acide malique ou acide aspartique). L'enzyme responsable de cette fixation est la **PEP carboxylase.** Contrairement à la Rubisco, elle ne présente pas de propriété oxygénase et possède une très forte affinité pour le CO_2. Le corps en C4 formé est ensuite transformé en un corps en C3 (acide oxalo acétique AOA) avec libération de CO_2, qui est ensuite incorporé dans le cycle de Calvin-Benson. Ce cycle supplémentaire est communément appelé **cycle de Hatch et Slack** (Hatch et Slack, 1966) (Fig.1.4). Anatomiquement, les C4 diffèrent des C3. Chez les C3, les cellules contenant les pigments chlorophylliens sont réparties dans toutes les couches cellulaires. Le CO_2 diffuse directement depuis les stomates (ouvertures fichées dans l'épiderme) jusque dans les cellules chloroplastiques (fig.1.5). Chez les C4, les cellules chloroplastiques sont concentrées autour des vaisseaux transporteurs de sève. Le CO_2 diffuse jusque dans une "couronne externe" où il forme le composé en C4 puis est transféré dans la gaine péri vasculaire. Ce mécanisme entraîne une très

forte concentration en CO_2 dans les cellules de la couronne interne, ce qui rend quasi inopérante la fonction oxygénase de la Rubisco. Ainsi, par ce mécanisme, les plantes C4 ont une efficacité photosynthétique supérieure à celle des C3. Les espèces en C4 sont nombreuses dans diverses familles végétales, dont les Graminées où l'on compte une centaine d'espèces. Les C4 sont surtout répandues dans les pays tropicaux où ce type de fonctionnement est très bien adapté aux conditions climatiques.

1.23) Les plantes CAM (Crassulacean Acid Metabolism)

Ces plantes fonctionnent selon le même mécanisme que les C4 avec cependant deux distinctions. Les cycles de Calvin-Benson et de Hatch et Slack ne se font pas dans des cellules différentes. De plus, il intervient un **déphasage dans le temps** entre la formation du corps en C4 et le passage du CO_2 dans le cycle de Calvin-Benson. Les stomates ne sont ouverts que la nuit, le CO_2 est assimilé et stocké sous forme d'acide malique ou acide aspartique dans les vacuoles des cellules. La journée, les stomates sont fermés et le CO_2 stocké est utilisé dans le cycle photosynthétique. Ce mécanisme permet de limiter, par la fermeture des stomates la journée, les déperditions en eau. Les plantes de ce groupe sont des plantes adaptées aux conditions désertiques. Ce sont toutes des plantes grasses, comme les Cactées, Euphorbiacées, Crassulacées.

1.3) La respiration

La **respiration** se caractérise par une absorption d'O_2 servant à oxyder des substrats respiratoires avec relargage de CO_2. Elle constitue donc un **terme négatif du bilan carboné**. La respiration fournit des matériaux nécessaires aux synthèses, de plus elle permet de dégager l'énergie contenue dans les métabolites; elle la transfère sur des composés susceptibles de la libérer ultérieurement (le plus souvent il s'agit d'ATP). Les substrats les plus fréquemment utilisés sont les glucides. Cependant, les acides aminés peuvent également être utilisés en cas de carence glucidique; il en est de même pour les acides gras (graines oléagineuses) et les acides organiques (plantes succulentes).

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

$$C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 \text{ -------> } 6\,CO_2 + 6\,H_2O \qquad \Delta G'_0 = -2870 \text{ kJ / mole (pour le glucose)}$$

1.31) Mécanismes et localisation

Le cycle respiratoire se déroule principalement dans les **mitochondries**. Deux voies peuvent être empruntées. La première et la plus générale, utilise la **glycolyse** et le **cycle de Krebs**. La seconde est appelée la **voie des pentoses**.

Les composés réducteurs formés dans les deux voies seront, soit oxydés par des mécanismes appelés **oxydations terminales** pour fournir de l'énergie, soit serviront de réducteurs dans les biosynthèses.

1.32) Les différentes respirations

Des expériences ont permis de montrer que la respiration varie en fonction de la photosynthèse du jour précédent d'une part, et de la masse de matière végétale d'autre part (Mc Cree and Troughton, 1966). Ces observations ont conduit à la définition de deux types de respiration: la **respiration d'entretien** et la **respiration de croissance**. A ces types de respiration qui opèrent de jour comme de nuit, il faut ajouter l'existence de la **photorespiration** pour les cellules chlorophylliennes.

1.32a) La respiration d'entretien

C'est elle qui assure la maintenance de la structure cellulaire et en particulier le renouvellement des protéines. Elle entretient également les gradients ioniques entre l'extérieur et l'intérieur des cellules. Dans des conditions poussées de stress, c'est par cette respiration que la plante tente d'assurer sa survie. En fonctionnement "normal", la respiration d'entretien est considérée proportionnelle à la masse de végétal. Selon certains auteurs, elle ne procéderait qu'à la dégradation d'assimilats anciennement formés (Thornley, 1970 ; McCree, 1972).

1.32b) La respiration de croissance

La respiration de croissance a pour rôle de transformer les molécules produites par la photosynthèse et permet ainsi la synthèse de tissus végétal. Cette respiration utiliserait donc les assimilats récents et serait proportionnelle à la quantité de métabolites issus de la photosynthèse du jour précédent (Penning de Vries, 1975).

De nombreux auteurs ont essayé de représenter la respiration de croissance par une formulation simple de type:

$$R = a\,P + b\,B$$

où :

R = respiration obscure totale (g MS m^{-2} j^{-1}),

P = photosynthèse (g MS m^{-2} j^{-1}),

B = masse du végétal (g MS m^{-2}).

Les valeurs obtenues pour la **respiration de croissance** représentent en moyenne **25 à 30 % du CO_2 fixé par la plante**. Les valeurs obtenues pour la **respiration d'entretien** se situent pour une jeune plante aux environs de **1.5 % de la biomasse B par jour à 25°C.**

1.33) Facteurs de variation de la respiration

En conditions environnementales non limitantes, l'intensité respiratoire atteint des valeurs de 1.5 ml de CO_2 dégagé par gramme de matière sèche et par heure. Cette valeur correspond au dixième de l'intensité photosynthétique obtenue dans des conditions optimales. De même que pour la photosynthèse, cette valeur est rarement atteinte car il existe des facteurs limitants.

1.33a) l'age de la plante

L'intensité respiratoire est très faible dans les graines, puis elle s'élève fortement lors de la germination. Elle demeure élevée tout le long de la croissance de la plantule. Une diminution intervient ensuite. Des pics d'intensité sont enfin observés lors de la floraison et de la maturation des fruits.

1.33b) La teneur en oxygène

L'intensité augmente avec la teneur en oxygène puis atteint un plateau pour des valeurs proches de 1 à 4 %. Lorsque la teneur en oxygène est trop faible, les mécanismes de respiration sont stoppés et remplacés par des phénomènes de fermentation.

1.33c) La teneur en CO_2

L'activité photosynthétique est stimulée lorsque la quantité de CO_2 augmente, ce qui entraîne un accroissement de la teneur en glucides et stimule la respiration chez certaines espèces. Toutefois on a observé chez d'autres espèces que la respiration diminue lorsque la teneur en CO_2 augmente.

1.33d) La température

L'action de la température sur la respiration est semblable à celle exercée sur la photosynthèse en CO_2 non limitant. Il y a tout d'abord stimulation de la respiration lorsque la température augmente jusqu'à atteindre un maximum. Ensuite, il s'opère une décroissance rapide due à une altération thermique du système respiratoire.

1.33e) La lumière

La lumière a une action stimulante sur la respiration. En effet, la lumière favorisant la photosynthèse, des glucides sont synthétisés puis convertis.

1.4) Production primaire brute (PPB), production primaire nette (PPN) et biomasse

La **production primaire brute** (PPB) correspond à la somme, pour une surface donnée, des photosynthèses qui se sont produites pendant un laps de temps défini. Lorsque de cette grandeur sont déduites les pertes dues aux respirations on accède au terme de **production primaire nette** (PPN).

$$PPN = PPB - (R_c + R_e + R_p)$$

où :

R_c = respiration de croissance

R_e = respiration d'entretien

R_p = photorespiration

En théorie, en condition de vie optimale, la PPN devrait représenter la quantité de matière végétale réellement observable sur le terrain pour les plantes annuelles. Cependant, au cours du temps, certaines parties des plantes peuvent être consommées ou disparaître suite à des phénomènes de sénescence. De ce fait, la quantité de matière végétale réellement observable sur le terrain est désignée par le terme de **biomasse végétale ou phytomasse.**

$$\text{phytomasse} = \int_0^t [PPB - (R_c + R_e + R_p + C + S)]$$

$$= \int_0^t [PPN - (C + S)]$$

où : C = pertes par les consommations animales

S = pertes par sénescence

Pour les plantes pluriannuelles, la production et la biomasse traduisent deux réalités bien différentes. La production représente la quantité de matière produite par unité de surface et par unité de temps. La biomasse désigne la masse totale de matière sur une surface donnée. Ainsi, une chênaie adulte possède une production primaire nette d'environ 10 tonnes ha^{-1} an^{-1} alors que sa biomasse est d'environ 300 tonnes ha^{-1}.

1.5) Facteurs de variations de la production primaire

Le niveau de productivité d'un couvert végétal dépend de l'action complexe de facteurs abiotiques tels que le climat, le type de sol et de facteurs biotiques tels que l'action de l'homme et les consommations animales.

1.51) Facteurs abiotiques

1.51a) L'énergie incidente

L'augmentation de la quantité d'énergie lumineuse conduit à une accélération des échanges gazeux et augmente donc l'activité photosynthétique. Cependant, en conditions naturelles l'énergie devient rapidement non limitante. Ainsi, pour une feuille de plante de type C3, une saturation apparait dès ≅ 25 % du rayonnement maximal (≅ 500 µmol de quanta m^{-2} s^{-1}) (Beadle *et al.*, 1985). Pour les plantes de type C4, ce point de saturation est beaucoup plus élevé (≅ 1200 µmol de quanta m^{-2} s^{-1}). Lorsque l'on considère le couvert végétal dans son ensemble et non plus une feuille isolée, le point de saturation est beaucoup plus élevé. L'énergie non interceptée par les feuilles situées au dessus du couvert est récupérée par les feuilles se trouvant en éclairement non saturant, l'ensemble constituant ainsi un capteur efficace (Saugier, 1986).

Il est courant de définir pour la lumière un **point de compensation**. Celui-ci représente la quantité d'énergie lumineuse pour laquelle les pertes dues à la respiration sont compensées par la synthèse de métabolites. En dessous de ce point, la plante doit puiser dans ses réserves pour subsister.

Selon les plantes, la valeur du point de compensation est plus ou moins élevée. De façon générale, les plantes sont réparties en deux grands groupes:

- Les plantes de soleil ou **héliophiles**,
- Les plantes d'ombre ou **sciaphiles**.

De fortes différences peuvent être observées au sein même d'une seule plante. Chez le frêne (Fraxinus excelsior), les feuilles développées à la lumière ont un point de compensation aux environs de 7 W m^{-2} alors qu'il est d'environ 2 W m^{-2} pour les feuilles ombragées (Heller *et al.*, 1989).

Les plantes héliophiles différent des sciaphiles par des valeurs de point de compensation plus fortes mais également par des valeurs de saturation plus élevées. Chez les sciaphiles, au-delà d'un certain seuil, des détériorations cellulaires apparaissent, dues à des photo oxydations. Ce seuil se situe généralement aux environs de 25 % du rayonnement solaire direct maximal.

De façon générale, en conditions naturelles, les plantes se sont bien adaptées aux conditions d'illumination du milieu (structure foliaire, surface foliaire, concentration en chlorophylles adaptées de façon à contituer un capteur efficace) et l'énergie incidente ne constitue que très rarement un facteur limitant de la productivité primaire.

1.51b) La température

Comme pour toute activité métabolique, on observe d'abord un accroissement de la productivité primaire avec l'augmentation de température pour atteindre un optimum vers 25 à

30°C, puis une diminution jusqu'à un arrêt complet et irréversible vers 45°C. Cet arrêt est dû à des actions létales de la température telles que la déstructuration des enveloppes membranaires.

L'écart d'intensité photosynthétique entre les plantes en C3 et en C4 augmente au fur et à mesure que la température croît. Ce fait s'explique par une décroissance plus rapide de l'affinité de la Rubisco pour le CO_2 par rapport à l'O_2. Les pertes dues à la photorespiration augmentent donc avec la température chez les C3 alors que chez les C4, la photorespiration demeure inexistante par le biais du cycle de Hatch-Slack. Dans les zones tropicales, la température ne constitue donc pas un facteur limitant de l'activité photosynthétique. Cependant, dans ces régions et principalement en zone de forêts denses, les valeurs de production primaire nette qui ont été mesurées ne sont pas très élevées (Bernhartd-Reversat *et al.*, 1978). Certains auteurs pensent que la présence d'une température constamment élevée conduit à une forte augmentation de l'activité respiratoire entrainant ainsi une baisse de la productivité primaire nette.

1.51c) La pluviométrie

Dans les régions arides et semi-arides, la productivité des couverts végétaux est fortement dépendante de la pluviométrie. Walter (1964), dans un étude menée en Afrique du Sud, a montré une augmentation linéaire de la production avec la pluviométrie annuelle à raison de 1 t matière sèche ha^{-1} an^{-1} par 100 mm de pluviométrie supplémentaire. Cependant, cette relation s'estompe rapidement dès lors que la pluviométrie annuelle devient supérieure à 500 mm. Plusieurs auteurs ont ainsi établi des relations pluviométrie/production primaire ou pluviométrie/biomasse de façon à estimer la productivité d'une région à partir de relévés de pluviométrie (Diarra et Breman, 1975 ; Le Houerou et Hoste, 1977 ; Deshmukh, 1984). Cependant, la limite de validité demeure toujours inférieure à 600 mm.

Au dela de cette limite, la pluviométrie ne constitue plus le facteur limitant principal de la productivité primaire. A ce stade, ce sont généralement les caractéristiques physico-chimiques des sols qui deviennent les facteurs de dépendance prépondérants.

1.51d) Facteurs édaphiques

* Bilan hydrique du sol

L'eau constitue le composant essentiel des cellules végétales (60 à 90 % du poids frais) et le milieu où s'opèrent de nombreuses réactions biochimiques. Son rejet par évaporation assure le refroidissement des organes de la plante et constitue le moteur principal de la circulation de la sève. Elle sert, comme nous l'avons vu, de molécule de base dans la phase claire de la photosynthèse.

Si un déficit hydrique se produit, la plante limite ses déperditions en eau en procédant à une fermeture des stomates. Si le stress se poursuit trop longtemps, il se produit, comme pour la température, des dégradations cellulaires conduisant à la mort de la plante. La fermeture des

stomates entraîne une limitation des échanges gazeux et par conséquent une diminution de l'activité photosynthétique.

Les plantes en C4 présentent une meilleure efficience photosynthétique que les C3 lorsqu'un déficit hydrique intervient. La PEP-carboxylase ayant une affinité pour le CO_2 nettement plus forte que la Rubisco, le CO_2 peut continuer à être acheminé vers le cycle photosynthétique alors que l'ouverture des stomates est faible. Les plantes en C4 ont ainsi une **efficience d'utilisation de l'eau** (quantité de matière sèche produite/quantité d'eau absorbée) beaucoup plus élevée que les C3.

Bien qu'il soit reconnu que la quantité d'eau disponible dans le sol constitue l'un des facteurs fondamentaux déterminant la productivité des végétaux, son effet est difficilement quantifiable. L'etablissement du bilan hydrique d'un sol est très lourd et très couteux à mettre en oeuvre. Les réponses photosynthétiques des plantes face à un stress hydrique semblent énormément varier en fonction du type de végétal, du type de sol, de la durée du stress induit, de la période du cycle végétal pendant laquelle le stress intervient.

* la salinité des sols

Lorsque la salinité d'un sol devient trop élevée on assiste à une baisse de la productivité des plantes qui résulte à la fois d'une réduction des surfaces foliaires ainsi que du taux d'assimilation photosynthétique. Les mécanismes intervenant sont de différents types. D'une part, lorsque la salinité devient trop élevée, la pression osmotique du sol devient trop forte et la plante ne peut plus absorber l'eau. D'autre part, il a été montré qu'un excès de NaCl dans le sol entraine une inhibition de l'absorption d'ions K^+, NH_4^+, NO_3^- et $Fe^{3+/2+}$. La déficience induite aura un effet dépresseur sur la photosynthèse car certains ions tels que K^+ jouent un rôle majeur dans les mécanismes d'ouverture des stomates (Solov'ev *in* Beadle *et al.*, 1985).

* Les éléments nutritifs

Lorsque l'on considère l'effet d'un seul élément minéral en supposant que tous les autres éléments assurent une alimentation suffisante, la réponse observée est identique quel que soit le nutriment considéré. A partir d'une faible concentration du sol en cet élément, l'application de doses croissantes provoque en augmentation de la production. La courbe de production en fonction des doses en nutriment montre l'existence d'un optimum suivi d'une régression de la production généralement due à un effet de toxicité de l'élément en surdose.

L'azote est l'élément dont l'action sur l'activité photosynthétique a été le plus étudié. Cet élément joue un rôle majeur dans la production puisqu'il entre dans la constitution des chlorophylles et des proteines dont la RubisCO qui, à elle seule, peut représenter jusqu'à 50 % des protéines foliaires. Garcia *et al.* (1988), dans une étude menée sur du blé en Amérique du nord, ont montré que l'augmentation de biomasse obtenue après fertilisation azotée provenait

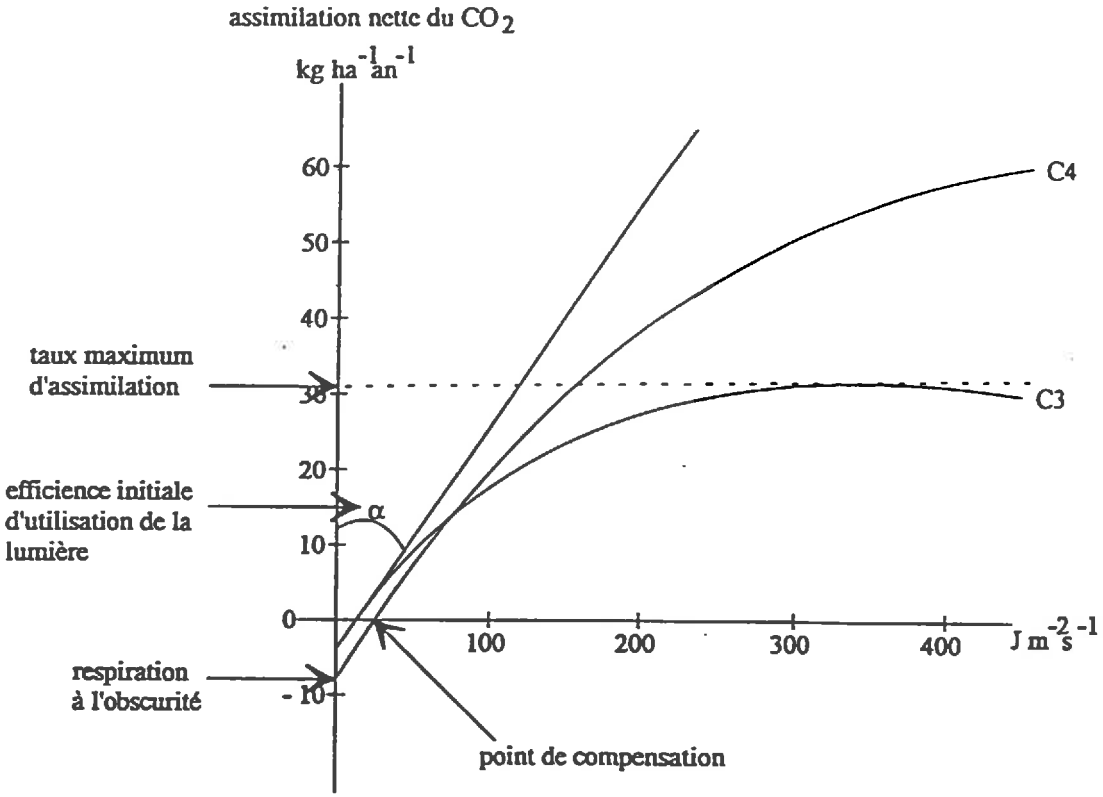


Figure 1.6 : Caractéristiques d'assimilation nette du CO_2 par des feuilles de plantes en C_3 et C_4.

d'après Van Keulen et Wolf, (1986).

surtout d'une augmentation de la surface foliaire et donc de la surface photosynthétiquement active, plutôt que d'un accroissement de l'intensité photosynthétique.

1.6) Méthodes d'estimation de la production primaire

L'évaluation de production primaire peut se faire à différentes échelles par plusieurs méthodes de mesure (§ 1.61) : la mesure des échanges de CO_2 à l'échelle de la feuille (§ 1.61a), de la plante ou du couvert (§ 1.61b). On peut aussi mesurer la production primaire nette en suivant les variations de biomasse à l'échelle de la parcelle (§ 1.61c) et l'estimer à l'échelle régionale par des relations statistiques (§ 1.61d).

La mise au point de modèles constitue la deuxième voie d'estimation de la production primaire (§1.62). Les contraintes particulières imposées par chaque niveau d'échelle d'estimation considéré ont conduit à l'élaboration de modèles spécifiques à chacun de ces niveaux.

1.61) Estimations à l'aide de méthodes de mesure

1.61a) Estimations à l'échelle de la feuille

* Chambres d'assimilation

L'échelle de la feuille est le niveau permettant de mettre en oeuvre le plus facilement les techniques de mesures d'échanges gazeux. L'échantillon est placé dans une chambre à circuit ouvert dont l'ambiance gazeuse est maintenue à l'aide d'un débit d'air constant. Il est possible de mesurer assez précisément les échanges de CO_2 et d'O_2. L'utilisation d'isotopes radioactifs (^{14}C) ou stables (^{13}C) est une pratique également courante à cette échelle. Elle permet de mesurer l'intensité de l'absorption du CO_2 ainsi que de localiser les lieux de transit et de stockage du CO_2 incorporé.

Lorsque le taux d'assimilation du CO_2 est effectué à plusieurs intensités lumineuses, une courbe de réponse à l'éclairement peut être établie (fig 1.6). Différents paramètres peuvent être extrait de cette courbe :

- l'efficience initiale d'utilisation de la lumière qui est donnée par la pente à l'origine de la courbe,
- le taux de respiration à l'obscurité, donné par l'ordonnée à l'origine,
- le point de compensation, qui résulte des deux premiers paramètres, et qui est défini lorsque l'activité photosynthétique compense les pertes respiratoires,
- et enfin, le taux maximum d'assimilation nette du CO_2 lorsque l'intensité lumineuse est saturante.

De fortes variations de ces paramètres sont observées en fonction du type de plante considéré et des conditions environnementales. Ainsi, pour des plantes de type C4, des mesures de taux maximum d'assimilation ont fourni des valeurs allant de 4 à 60 µmol. de CO_2 assimilées

m^{-2} de feuille $seconde^{-1}$ selon l'espèce (Saugier, 1986). Des valeurs variant de 10 à 30 µmol. m^{-2} s^{-1} ont été enregistrées pour des C3 (Van Keulen and Wolf, 1986).

1.61b) Estimation à l'échelle de la plante, du couvert

* Chambres d'assimilation

Des techniques identiques à celles décrites dans le paragraphe précédent sont utilisées. Une ou plusieurs plantes sont enfermées dans une enceinte. Aux problèmes d'étanchéité du système, viennent s'ajouter des problèmes de parasitage des mesures dus à la respiration du sol sous-jacent ainsi que des problèmes d'homogénéisation de l'air ambiant. Les mesures en continu sont impossibles. L'accès à des valeurs journalières ne se fait que par l'intégration de mesures instantanées.

D'autres techniques de mesures ont été développées telles que les mesures de flux turbulents de CO_2 au sommet et à la base d'un couvert (Perrier *et al.*, 1977 ; Monteith *et al.*, 1964 ; Saugier, 1970).

1.61c) Estimation à l'échelle de la parcelle

Les chambres à assimilation deviennent, à cette échelle de travail, des méthodes non réalisables aussi bien financièrement que techniquement. De ce fait, de nombreuse autres pratiques ont été testées afin d'estimer la production primaire.

* Techniques de prélèvements

La technique la plus couramment utilisée pour l'estimation de la production nette aérienne de la végétation herbacée consiste à récolter et à sécher toutes les parties aériennes sur une surface donnée (de 1 à quelques m^2). Suivant les techniques utilisées, plusieurs prélèvements sont effectués au cours du cycle de végétation ou alors, une seule coupe est réalisée au moment du maximum de biomasse. Pour les plantes annuelles, la biomasse et la production primaire sont théoriquement peu différentes. Elles ne diffèrent que par les pertes dues à la chute des premières feuilles, à la sénescence de petites parties du végétal, à des consommations animales. Pour accéder à des valeurs de production, toutes les pertes ayant eu lieu avant la récolte doivent être prises en compte. Pour ce qui concerne les pluriannuelles, l'évaluation est plus difficile car il ne faut pas prendre en compte la biomasse éventuellement présente qui résulte de la production des années précédentes. De même, il est difficile d'estimer la quantité de biomasse aérienne produite par ces plantes et qui résulte de la transformation des réserves accumulées dans les parties racinaires.

L'estimation de la précision et la comparaison des résultats obtenus à l'aide de ces techniques sont très difficiles à réaliser. L'estimation des pertes n'est pas effectuée de façon

Site		Année	Production aérienne t/ha	Production souterraine t/ha	Production totale t/ha	Rapport. prod. aérien./souter.	Phytomasse maximale t/ha	Rapport. prod. aérienne /phytomasse maximale
LAMTO								
— site 1	1	1969	8,30	24,25	32,55	0,34	6,94	1,20
— site 2	2		9,20	41,82 (2)	51,02	0,22	7,01	1,31
— site 3	3		15,40 (1)	25,20	40,60	0,61	9,88	1,56
— site 4	4		14,90	31,32	46,22	0,47	11,11	1,34
— site 5	5		12,80	19,64	32,44	0,65	6,96	1,84
— site 6	6		16,10	16,82	32,92	0,96	8,30	1,94
— site 7	7		14,50	12,65	27,15	1,15	6,89	2,10
LAMTO								
— site 1	8	1981	9,31	14,75	24,06	0,63	6,98	1,33
— site 2	9		13,65(3)	14,42(3)	28,07	0,95	9,82	1,39
OUANGO-FITINI								
— site 1	10	1980	6,41	14,39	20,80	0,45	5,80	1,10
— site 2	11		5,02(4)	14,80	19,82	0,34	4,98	1,01
NAZINGA								
— site 1	12	1985	3,83	9,07	12,90	0,47	3,22	1,19
— site 2	13		3,51 (5)	7,80	11,31	0,45	3,45	1,02
— site 3	14		4,80	9,41	14,21	0,62	4,78	1,00
— site 4	15		3,12	non			3,20	1,00
— site 5	16		5,34	mesurée	—	—	5,15	1,04
— site 6	17		7,66				7,65	1,00

(1) d'après MENAUT et CESAR (1982) dans l'ordre :

1 — savane herbeuse de bas de pente à *Loudetia simplex*
2 — savane herbeuse de transition à *Loudetia simplex*
3 — savane herbeuse à Andropogonées
4 — savane arbustive de transition à Andropogonées
5 — savane arbustive à Andropogonées, zone ouverte
6 — savane arbustive à Andropogonées, zone dense
7 — savane boisée à Andropogonées

(2) calculé d'après les données de CESAR (1971)

(3) d'après ABBADIE (1983) dans l'ordre :

8 — savane herbeuse de bas de pente à *Loudetia simplex*
9 — savane arbustive de transition à Andropogonées

(4) d'après FOURNIER et LAMOTTE (1983) dans l'ordre :

10 — savane arbustive à *Detarium microcarpum*
11 — savane herbeuse à *Loudetia simplex* et *Andropogon ascinodis*

(5) sites décrits dans le texte, dans l'ordre :

12 — savane herbeuse de plateau à *Andropogon ascinodis* et *Schizachyrium sanguineum*
13 — savane arbustive claire de haut de pente à *Gardenia erubescens* et *Terminalia laxiflora*
14 — savane arborée de mi-pente à *Terminalia laxiflora* et *Detarium microcarpum*
15 — savane boisée de haute de pente à *Terminalia laxiflora* et *Crossopteryx febrifuga*
16 — savane boisée de mi-pente à *Isoberlinia doka* et *Acacia dudgeoni*
17 — Savane à annuelles sur bowal

Tableau 1.1 : Valeurs de la production primaire annuelle de divers sites de savane brûlée en zones guinéenne, soudano-guinéenne et soudanienne.

d'après Fournier, (1987).

systématique. Le nombre de répétitions, la surface échantillonnée varient d'un travail à un autre. Parfois, seules les espèces dominantes sont prélevées. Fournier (1987), dans une étude portant sur différents types de savanes d'Afrique de l'Ouest, a étudié le rapport "production primaire nette aérienne/phytomasse maximale" (tableau 1.1). Les valeurs calculées varient entre 1 et 2,1 selon les milieux. Long *et al.* (1989) fournissent, pour quatre sites en végétation naturelle (Brésil, Mexique, Kénya, Thaïlande), des rapports allant de 1,5 à 3,6 entre la production primaire nette maximale aérienne et les techniques de maximum de biomasse utilisées de façon standard lors des expériences du PBI (Programme Biologique International).

La production primaire nette totale est rarement mesurée car l'estimation de la production des parties racinaires est très difficile à réaliser. Différentes techniques ont été mises au point. Une revue détaillée a été faite par Böhm (1979). On peut citer :

- la technique d'excavation, qui consiste à dégager sur le terrain le volume de sol entourant les racines (technique très lourde à mettre en oeuvre et souvent limitée par la profondeur d'enracinement trop élevée ou la dureté du sol) ;

- des techniques de culture en pot ou de culture sans sol (dans ces conditions, la biomasse racinaire est souvent très inférieure aux situations naturelles. Les racines n'ont pas suffisamment de place pour se développer ou elles se développent peu car les éléments nutritifs sont largement disponibles) ;

- des techniques de prélèvement de sol et de lavage des racines (les fines racines échappent à cette échantillonnage alors qu'elles représentent un pourcentage très élevé de la production racinaire) ;

Il existe encore d'autres techniques telles que des évaluations indirectes à partir de points-contact mesurés sur une vitre posée verticalement dans le sol ou l'utilisation de traceurs radioactifs.

Ces techniques ne prennent pas en compte l'estimation des exsudats racinaires qui, selon certains auteurs, pourraient constituer un pourcentage non négligeable de la production primaire souterraine.

* Techniques non destructrices

Les techniques de prélèvements décrites ci-dessus, outre le fait qu'elles soient très consommatrices en temps et en moyens, sont également destructrices. Différentes méthodes non destructrices ont été proposées. Tucker (1980) a effectué une synthèse bibliographique critique de ces différentes pratiques. Parmi celles-ci citons :

- l'estimation visuelle qui consiste en une appréciation visuelle de la biomasse par une personne connaissant bien le type de parcelle enquêté ;

- le "weighted disk" : l'estimation de la biomasse est reliée au niveau d'affaissement de la végétation provoqué par la pose d'un disque métallique de masse connue ;

- L'atténuation des particules β : cette technique relie l'absorption des particules β d'un couvert à sa densité. L'intégration des densités mesurées sur toute la hauteur du couvert permet de faire une approximation de la biomasse du végétal étudié.

L'emploi de ces procédures sur de grandes surfaces est largement entravé par des problèmes d'étalonnage et de calibration, chaque type de couvert offrant généralement une réponse différente.

Les techniques de mesures radiométriques dans les longueurs d'ondes rouge et proche infrarouge seront détaillées dans les chapitres suivants. Contrairement aux démarches précédentes, ces procédures sont les seules qui puissent être utilisées pour fournir des mesures aussi bien à l'échelle de la plante qu'à l'échelle globale.

1.61d) Estimation à l'échelle régionale ou globale

* Relations statistiques

Les mesures de prélèvements de biomasse n'étant pas réalisables sur de larges surfaces, certains auteurs ont tenté d'établir des relations entre ces valeurs et des données aisément accessibles et mesurables à grande échelle telles que les données climatologiques. Ainsi, Lieth et Whittaker (1975) fournissent des relations statistiques, considérées comme valides à l'échelle globale. Elles relient la production primaire à la pluviométrie annuelle et à la température moyenne annuelle ou à l'évapotranspiration réelle.

$PPN = 3000 . (1 - e^{-0.000664 . x})$ en g. MS m^{-2} an^{-1}

ou $PPN = 3000/ (1 + e^{1.315-0.119 . y})$ en g. MS m^{-2} an^{-1}

où :

PPN = production primaire aérienne nette,

x = pluviométrie annuelle en millimètres,

y = température moyenne annuelle en Celsius.

Puis seule la valeur minimum des deux estimations est retenue.

D'autres relations ont été établies par différents auteurs pour des régions plus restreintes telles que la zone soudano-sahélienne (Diarra et Breman, 1975 ; Le Houerou et Hoste, 1977), l'Afrique de l'Est et l'Afrique du Sud (Deshmukh, 1984).

1.62) Estimations à l'aide de modèles

1.62a) Estimation à l'échelle de la feuille

Plusieurs auteurs ont formulé des équations permettant d'estimer l'activité photosynthétique foliaire instantanée (Goudriaan, 1982 ; Charles-Edwards, 1984). Ces formulations décrivent les courbes "taux de photosynthèse instantanée/intensité lumineuse" décrites au paragraphe précédent. Elles sont de la forme :

$$Pb = Pmax \cdot (1 - \exp^{(-\alpha \cdot \frac{PAR}{Pmax})})$$ (Goudriaan, 1982)

Où :

Pb = photosynthèse foliaire instantanée brute (µmol. CO_2 m^{-2} s^{-1}),

Pmax = photosynthèse instantanée brute maximale (µmol. CO_2 m^{-2} s^{-1}),

α = efficience initiale d'utilisation de la lumière (µmol. CO_2 m^{-2} s^{-1} (J m^{-2} s^{-1})$^{-1}$),

PAR = rayonnement photosynthétiquement actif (J m^{-2} s^{-1}).

ou encore :

$$Pn = \frac{\alpha \cdot PAR \cdot Pmax}{(\alpha \cdot PAR - Pmax) - R_d}$$ (Charles-Edward, 1984)

Où :

Pn = photosynthèse instantanée nette (µmol. CO_2 m^{-2} s^{-1}),

Rd = respiration obscure (µmol. CO_2 m^{-2} s^{-1}).

1.62b) Estimation à l'échelle de la plante ou du couvert

La démarche la plus couramment utilisée pour modéliser la photosynthèse d'un couvert "fermé", consiste en une sommation des photosynthèses instantanées de chaque feuille. Pour estimer la quantité de lumière incidente sur une feuille située à une hauteur donnée dans le couvert, des lois de pénétration de la lumière dans le couvert ont été formulées. Généralement, elle est exprimée par l'intermédiaire de la loi exponentielle d'extinction de la lumière définie par Monsi et Saeki (1953). Elle est de type :

$$I_L = I_o \cdot \exp^{(-KL)}$$

où :

I_L = rayonnement incident au dessous d'un indice foliaire de valeur L,

I_o = rayonnement incident à la surface au sommet du couvert,

K = coefficient d'extinction de la lumière.

Appliquée à l'ensemble d'un couvert, on aboutit à des formulations du type :

$$Pb = \int_0^{LAI} \frac{\alpha \cdot Io \cdot Pmax \cdot (1 - \exp^{(-KL)})}{(\alpha \cdot K \cdot Io + Pmax)} - Rd$$ (Charles-Edwards, 1984)

La mise en oeuvre de ce type de modèle pour de grandes surfaces suppose la prise en compte d'un nombre de paramètres important (variation de l'angle d'incidence de la lumière au cours de la journée, structure du couvert, diffusion de la lumière dans le couvert, respiration de croissance, respiration de maintenance) (Charles-Edwards, 1984 ; Sellers, 1985 ; Sellers, 1987 ; Penning de Vries *et al.*, 1989).

1.62c) Estimation à l'échelle de la parcelle

De nombreux auteurs ont produit des modèles de production primaire qui reprennent généralement les déterminismes utilisés à l'échelle de la plante. Ces modèles sont souvent complétés par une prise en compte des différents compartiments de la plante, du compartiment sol et de l'influence des facteurs climatiques (Innis, 1978 ; Van Keulen and Wolf, 1986 ; Penning de Vries *et al.*, 1989). Je ne détaillerai pas ces modèles car ils ne peuvent être utilisés dans notre étude. En effet, le nombre de paramètres qui les composent ainsi que le nombre de données qui sont requises en entrées interdisent toute utilisation à une échelle régionale ou globale. Ceci, soit parce que les temps de calcul seraient prohibitifs, soit tout simplement parce que les données nécessaires ne sont pas disponibles à ces échelles spatiales et/ou temporelles.

Cependant, **Monteith (1972) a proposé un modèle déterministe** simple permettant de relier la production de biomasse à la quantité de rayonnement intercepté par le couvert végétal. Ce modèle, qui sera détaillé ultérieurement, permet, par le peu de paramètres qu'il utilise, d'envisager son utilisation à de plus larges échelles.

1.62d) Estimation à l'échelle régionale ou globale

Quelques modèles, décrivant les mécanismes principaux de la production primaire (respiration, photosynthèse, stades phénologiques) et prenant également en compte les interactions avec le sol (disponibilité en eau et nutriments) ont été proposés récemment (Esser, 1991 ; Janececk *et al.*, 1991 ; Raich *et al.*, 1991). Ils sont encore dans une phase préliminaire de développement.

De l'échelle de la feuille jusqu'à celle du couvert, il existe de nombreux modèles explicitant de façon détaillée les différents processus de la production primaire. Malheureusement, ces modèles sont complexes, fonctionnent à un pas de temps trop fin pour notre étude et nécessitent des données d'entrée qui ne sont pas facilement accessibles à l'échelle régionale ou globale. Il est nécessaire de travailler avec un modèle simple qui travaille à une échelle de temps de l'ordre de la semaine. Pour ces raisons, j'ai préféré porter mon choix sur l'utilisation du modèle semi-empirique de Monteith (1977) dont l'approche m'a paru être la mieux adaptée à la problématique posée dans ce travail. Ce modèle va être présenté dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE II

ESTIMATION DE LA PRODUCTION PRIMAIRE

APPROCHE PAR LE MODELE DE MONTEITH

CHAPITRE II

ESTIMATION DE LA PRODUCTION PRIMAIRE APPROCHE PAR LE MODELE DE MONTEITH

Comme nous l'avons vu précédemment, le pas de temps qu'il est souhaitable d'obtenir dans les modèles de production primaire est de **un jour**. Cependant, il est souvent techniquement impossible ou financièrement trop lourd de mesurer quotidiennement et sur de grandes surfaces les paramètres nécessaires à la validation de tels modèles. Ces difficultés contraignent le modélisateur à utiliser des pas de temps plus longs (1 semaine, 10 jours). L'adoption de tels pas de temps ne peut se faire que dans l'hypothèse où la somme des effets dus aux différentes conditions environnementales observées durant un laps de temps donné est très proche des effets dus à des conditions moyennes et constantes sur ce même laps de temps. Elle suppose aussi que les conditions d'environnement sont très peu fluctuantes durant cette période. Ces conditions correspondent à une situation où la plante se développe dans un milieu dépourvu de contraintes (absence de déficit hydrique, présence d'éléments minéraux en quantité suffisante et disponible, absence de températures trop élevées ou trop basses,...) c'est à dire en **conditions du milieu non limitantes.**

Les seuls paramètres environnementaux disponibles à une échelle régionale, sont des paramètres climatologiques (pluviométrie, durée d'insolation, température, humidité). C'est donc un modèle utilisant ce type de facteur qui devra être privilégié pour cette étude. D'autres données existent pour ce type d'échelle (cartes pédologiques). Les renseignements qu'elles fournissent présentent cependant un caractère très statique et la définition des différentes unités est généralement trop grossière pour permettre d'apporter une information pertinente pour la modélisation. Ainsi, dans les cartes de types de sols de Zobler (Staub et Rosenweig, 1987) ou de Wilson/Henderson-Sellers (Henderson-Sellers *et al.*, 1986) la résolution est de 1 degré et les sols de l'Afrique de l'Ouest sont regroupés sous quatre classes.

Enfin, l'algorithme du modèle retenu ne doit pas être trop complexe. En effet, le but de ce travail étant également de tester l'apport des données satellitaires, il est important dans cette première approche de ne pas complexifier le modèle de façon à pouvoir discerner, dans les résultats obtenus, l'influence respective des différents paramètres mis en jeu. De même, l'utilisation d'un modèle peu complexe est souhaitable pour réaliser une étude de sensibilité des différents paramètres ainsi que pour calculer la précision d'estimation de celui-ci. En effet, une obtention de la précision du modèle est nécessaire, car c'est par son intermédiaire que l'on pourra évaluer la validité du modèle selon des critères tels que :

- les valeurs estimées répondent-elles à la gamme de précision requise par la communauté scientifique ?
- le modèle apporte t'il des améliorations par rapport aux modèles existants ?

Aux vues de toutes ces conditions imposées, le modèle de Monteith (1972) est celui qui, parmi les modèles existants, m'a paru le plus apte à servir de base à notre travail.

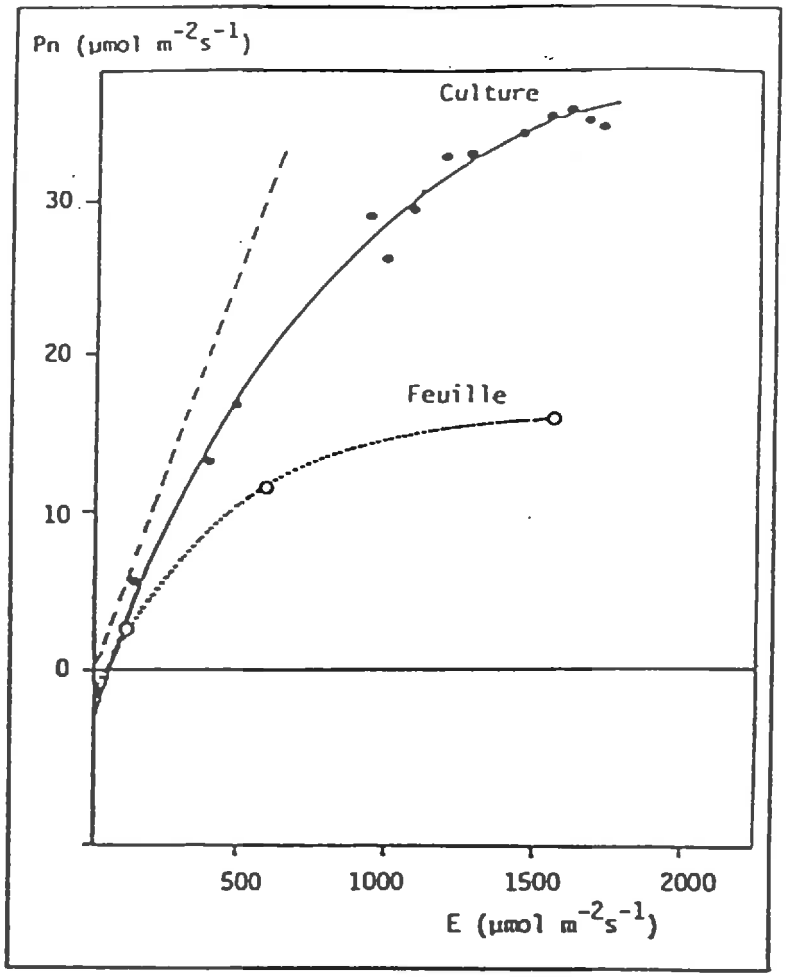


Figure 2.1 : Réponses photosynthétiques à l'éclairement de :

a- Culture de *Dactylis glomerata* d'indice foliaire 6 (résultats exprimés par unité de surface au sol).

b- Feuille de *Dactylis glomerata* d'indice foliaire 6 (résultats exprimés par unité de surface foliaire).

La droite correspond à un rendement quantique de 0.05 mol.CO_2/quantum.

d'après Saugier, (1986).

Lorsque l'on représente la photosynthèse d'une feuille isolée en fonction du rayonnement absorbé, on observe une courbe présentant un plateau (fig. 2.1). A l'obscurité, la feuille dégage du CO_2 par respiration. Lorsque le rayonnement augmente, la photosynthèse (absorption de CO_2) augmente proportionnellement puis atteint un palier de saturation. Quand on considère un couvert, l'ensemble des feuilles contribue à la photosynthèse de celui-ci et constitue un capteur du rayonnement beaucoup plus efficace qu'une feuille isolée. Il en résulte que la photosynthèse du couvert présente une moins forte saturation à fort éclairement qui se traduit par une **quasi linéarité entre la photosynthèse du couvert et le rayonnement qu'il absorbe** (fig. 2.1). Cette observation ne se fait que lorsque les plantes sont en **conditions d'alimentation hydrique et minérale non limitantes**. Il faut noter que ce caractère linéaire subsiste lorsque l'on considère la photosynthèse nette (pertes respiratoires déduites). C'est sur cette base de linéarité entre la production de matière sèche et l'apport d'énergie solaire que repose le modèle de Monteith (1972). Celui-ci s'applique lorsque l'on est en conditions environnementales non limitantes, l'utilisation de ce modèle avec un pas de temps allant de 8 à 10 jours est donc possible. Cela suppose, également, de disposer de valeurs de paramètres compatibles avec le pas de temps utilisé.

2.1) Description générale

Monteith (1972) introduit la notion d'**efficience énergétique** (ε) qu'il définit comme étant égale au rapport entre la quantité d'énergie solaire stockée par photosynthèse en un temps donné et la constante solaire intégrée sur la même période.

Il décompose l'**efficience énergétique** en un produit de sept efficiences distinctes, destinées à prendre en compte l'influence de facteurs physiques ou biologiques sur le taux de croissance.

Le modèle qui en résulte peut être écrit sous la forme :

$$\frac{dB}{dt} = \varepsilon \cdot I_o \qquad \text{avec : } \varepsilon = \varepsilon_g \cdot \varepsilon_a \cdot \varepsilon_c \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_q \cdot \varepsilon_d \cdot \varepsilon_r$$

où :

dB = différentielle de la matière sèche produite,

dt = différentielle du temps

Io = constante solaire (1360 W m^{-2}),

ε_g = **facteur géométrique**,

il est égal au rapport entre le rayonnement solaire extraterrestre reçu par une surface plane parallèle à la surface de la terre et la constante solaire. ε_g correspond au *cosinus* de l'angle d'incidence par rapport à la verticale.

ε_a = **transmittance atmosphérique,**

Ce facteur est égal au rapport entre le rayonnement effectivement reçu à la surface du sol et le rayonnement incident au sommet de l'atmosphère.

ε_c = **facteur spectral** ou **efficience climatique,**

L'efficience climatique est égale au rapport entre le **rayonnement photosynthétiquement actif (RPA)** et le rayonnement total.

ε_i = **efficience d'interception du rayonnement incident,**

Il correspond à la fraction de rayonnement incident interceptée par le couvert végétal.

ε_q = **efficience photochimique,**

L'efficience photochimique est définie comme étant égale au rapport entre l'énergie stockée sous forme de composés organiques photosynthétisés et l'énergie totale interceptée.

ε_d = **efficience de diffusion,**

Elle exprime la limitation due à la diffusion des molécules de CO_2 depuis l'atmosphère environnant les feuilles jusqu'aux chloroplastes des cellules. $\varepsilon_d = 1$ lorsque la concentration en CO_2 est saturante.

ε_r = **Facteur de respiration,**

Il rend compte de la fraction de matière synthétisée non utilisée par les mécanismes de respiration ($\Delta B/\Delta$ glucose consommé par la plante).

2.2) Discussion - Simplification du modèle

Le modèle qui vient d'être décrit prend en compte des composantes qui, pour la plupart, sont difficilement mesurables directement (taux de diffusion du CO_2, taux de respiration) ou qui font intervenir un nombre élevé d'hypothèses ou de paramètres (modèle d'estimation de la diffusion du CO_2 dans le couvert). Ces problèmes rendent impossible l'application du modèle à grande échelle. Il est donc souhaitable, pour des raisons qui ont déjà été spécifiées, d'aboutir à une simplification du modèle. Il faut cependant, pour préserver la validité de la démarche du modèle, conserver l'hypothèse de linéarité. Tout nouveau paramètre simplificateur intégré, doit pouvoir être rattaché au terme d'efficience.

* Dans le modèle de Monteith, l'apport d'énergie au "système" plante est établi à partir de la constante solaire. Le rayonnement solaire incident à la surface du sol (**Rg**) est une donnée classiquement enregistrée par les stations météorologiques et qui peut être utilisée pour rendre compte de l'énergie mise à la disposition des couverts végétaux. Cette mesure présente l'avantage de regrouper en un terme plusieurs paramètres du modèle de Monteith. En effet, le rayonnement

global n'est autre que la modification de la constante solaire après avoir traversé l'atmosphère. Le rayonnement global peut se résumer à :

$$Rg = I_o \cdot \varepsilon_g \cdot \varepsilon_a$$

* La gamme de mesures permettant d'estimer l'efficacité de transformation de l'énergie fournie en composés organiques est, quant à elle, peu étendue. Les plus fréquentes sont des mesures de photosynthèse nette. Ces valeurs font état de la transformation du CO_2 absorbé en tenant compte des pertes respiratoires. L'efficience photochimique (ε_q), l'efficience de diffusion (ε_d) et le facteur de respiration (ε_r) peuvent donc être regroupés sous une efficience globale.

A l'aide de ces démarches, il est possible de présenter une formulation simplifiée du modèle de Monteith exprimée sous la forme suivante :

$$\frac{dB}{dt} = Rg \cdot \varepsilon_c \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_b \qquad \text{où :}$$

dB = différentielle de la production primaire nette ou brute exprimée en matière sèche,

dt = différentielle du temps,

Rg = **rayonnement solaire** incident à la surface de la terre ($Rg = \varepsilon_g \cdot \varepsilon_a \cdot I_o$),

ε_c = **efficience climatique** (RPA/Rg),

ε_i = **efficience d'interception**, qui est égale au rapport entre RPA intercepté par le végétal et le RPA incident total,

ε_b = **efficience de conversion du rayonnement**, qui correspond au rapport entre la quantité de matière sèche produite et stockée dans les plantes et la quantité de RPA intercepté ($\varepsilon_b = \varepsilon_q \cdot \varepsilon_d \cdot \varepsilon_r$).

Cette formulation simplifiée a été utilisée par Varlet-Grancher *et al.* (1982) comme outil d'analyse de la croissance végétale de plusieurs types de plantes cultivées. Leurs travaux montrent que l'utilisation de cette formulation donne des résultats aussi satisfaisants que les résultats obtenus lors d'une analyse classique de la croissance. Cependant, ils se sont tout de même heurtés à des difficultés similaires à ceux de l'analyse classique, c'est à dire à des problèmes d'estimation de la partie racinaire, des problèmes d'estimation de la respiration ainsi que de la répartition des assimilats. De plus, cette formulation ne permet pas d'appréhender les variations de quantités de matière sèche produite, qui ne dépendent pas uniquement des mécanismes photosynthétiques.

2.3) Détermination des paramètres du modèle simplifié

2.31) Le rayonnement global (Rg)

2.31a) Méthodes de mesure

Le rayonnement global est mesuré à l'aide d'appareils appelés pyranomètres. Cependant, peu de stations météorologiques sont équipées avec ce type d'instrument. Les seules mesures largement disponibles sont des durées d'insolation mesurées par des héliographes (héliographe de Campbell). Des formulations reliant le rayonnement global à la durée d'insolation ont été proposées.

* Estimation par des formulations

La méthode la plus utilisée jusqu'à présent, consiste en une évaluation indirecte à partir de la durée d'insolation. Rietvild (1978) propose, à partir d'une compilation de nombreux travaux, une relation applicable à l'ensemble du globe :

$$Rg = Rg^{o} \cdot (0.18 + 0.62 \cdot \frac{h}{H})$$

où :

Rg = rayonnement global journalier,

Rg^{o} = rayonnement global journalier à l'entrée dans l'atmosphère,

h = durée réelle d'insolation journalière (donnée par un héliographe),

H = durée astronomique du jour (lever-coucher du soleil).

Les valeurs de Rg^{o} et H sont fournies par des tables et sont fonction des coordonnées géographiques du lieu considéré et de la date.

* Mesure directe à l'aide d'un pyranomètre

Les pyranomètres, ou parfois solarimètres, sont, dans les cas les plus courants, des radiomètres thermoélectriques. Ils absorbent le rayonnement solaire et le transforment en un signal électrique. Leur réponse est indépendante de la longueur d'onde et ils peuvent donc être utilisés dans différentes conditions (dans un couvert, en lumière artificielle, etc.). Plus récemment, ont été développés des pyranomètres dont le capteur est une cellule photovoltaïque au silicium. La réponse de ces capteurs dépend de la longueur du rayonnement dans une gamme inférieure au rayonnement solaire totale (généralement 400 à 1100 nm). Un étalonnage doit donc être effectué avant toute utilisation de ce type de pyranomètre.

2.31b) Facteurs de variation, valeurs de rayonnement

Lors de leur traversée dans l'atmosphère, les très faibles longueurs d'onde ($\lambda < 0.3$ µm) du rayonnement solaire sont fortement, voir totalement absorbées, notamment par l'ozone (O_3).

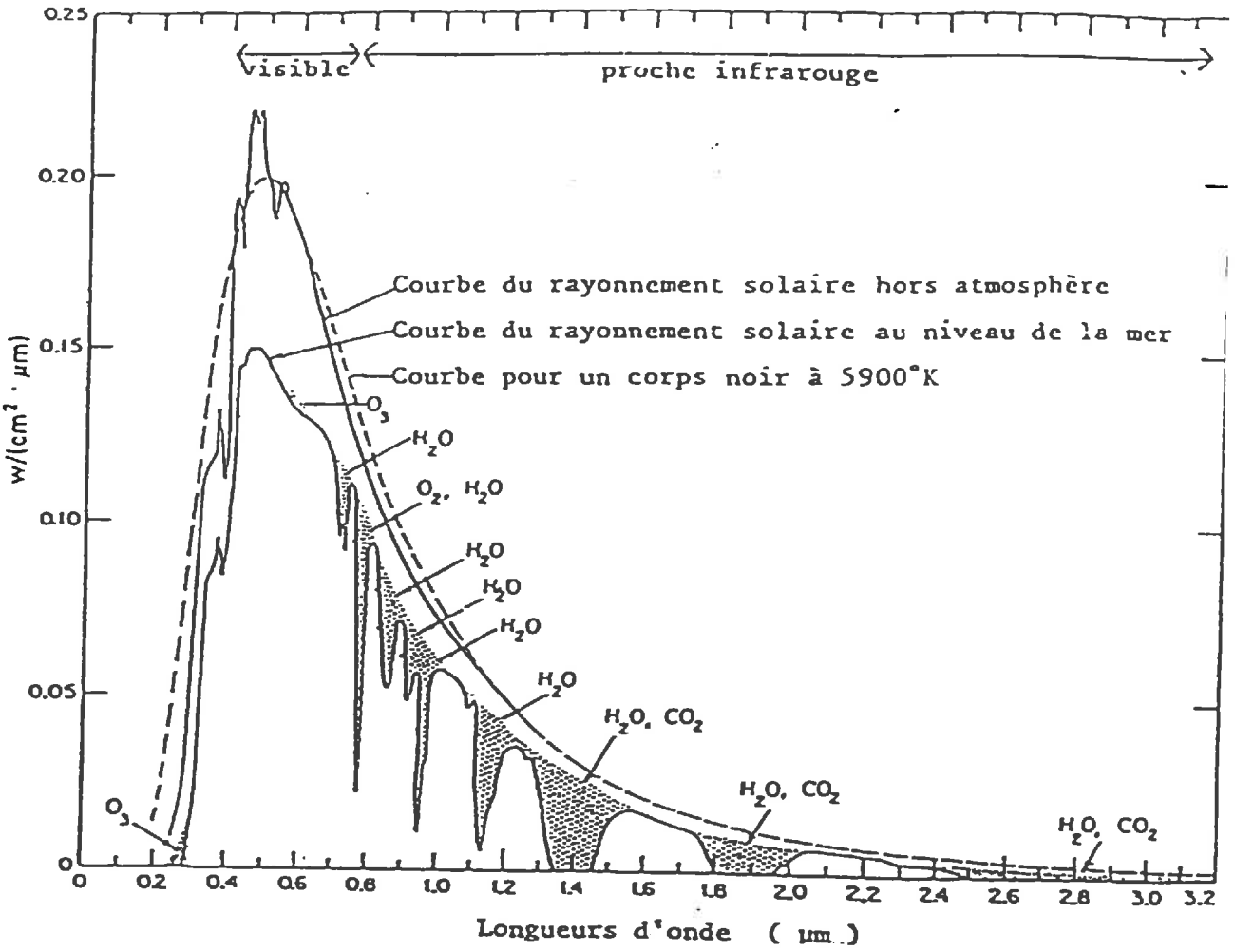


Figure 2.2 : Spectre du rayonnement solaire.

Dans le visible (0.4 µm à 0.7 µm) intervient surtout le phénomène de diffusion par les molécules et les aérosols, relayé dans le proche et moyen infrarouge (0.7 µm à 4 µm) par les processus d'absorption par les gaz atmosphériques (H_2O, O_2, O_3, CO_2) (fig. 2.2).

* Processus de diffusion

Le rayonnement incident peut être source d'excitation pour les particules chargées qu'il rencontre. Ces dernières lorsqu'elles retournent à leur niveau d'équilibre, peuvent émettre à leur tour un rayonnement (réémission ou diffusion). L'intensité de la diffusion est fonction du diamètre des particules excitées par rapport à la longueur d'onde (λ) considérée. On observe principalement deux types de diffusion :

- la diffusion élastique de **Mie**, qui concerne les particules dont les dimensions sont du même ordre de grandeur que la longueur d'onde (**aérosols**); le coefficient de diffusion (rapport de l'énergie diffusée sur l'énergie incidente) varie en $1/\lambda$ ou $1/\lambda^2$;

- la diffusion élastique de **Rayleigh**, qui concerne les particules de tailles très inférieures à la longueur d'onde (**molécules**); le coefficient varie en $1/\lambda^4$;

* Processus d'absorption

Dans certaines longueurs d'onde, les photons sont fortement absorbés par des constituants de l'atmosphère (ozone, gaz carbonique, oxygène, eau). Ces absorptions interviennent pour des gammes de longueurs d'onde bien définies, séparées par des "fenêtres" de l'atmosphère (visible, infrarouge, hyperfréquence). Dans ces "fenêtres" la transmission du rayonnement est forte (fig. 2.3).

Monteith (1972) a procédé à des évaluations de ε_a, la transmittance moyenne de l'atmosphère, en divisant l'insolation mensuelle moyenne mesurée pour trois stations en Afrique, par la valeur correspondante de rayonnement extraterrestre. La valeur annuelle moyenne de transmittance a varié de 0.48 à Kinshasa (Zaïre), où la couverture nuageuse est persistante presque toute l'année, à 0.58 à Sumaru (Nigeria), où les mois d'hiver sont peu nuageux (fig. 2.4).

De façon plus générale, le Rg est en moyenne égal à 40 % de la constante solaire (I_o) en régions tropicales humides, à 70 % dans les zones tropicales semi-arides et atteint 85 % en haute montagne. En valeur instantanée, il peut atteindre 1200 W m^{-2} à midi et par ciel clair en zone tropicale mais peut descendre à 50 W m^{-2} sous un plafond de nuages bas (Lemée, 1978).

2.31c) Précision des mesures de rayonnement global

La précision, en valeur absolue, généralement admise pour les mesures faites à l'aide de pyranomètres est de l'ordre de **10 à 20 W m^{-2}**. Cette précision correspond à l'erreur instrumentale fournie par le constructeur.

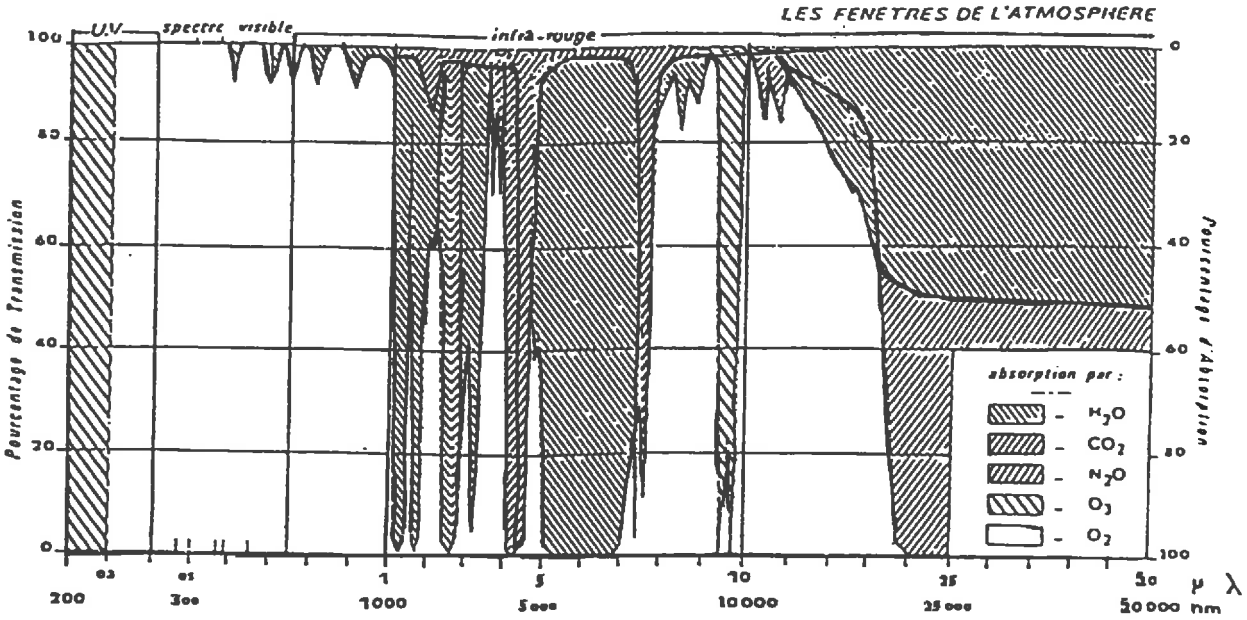


Figure 2.3 : Fenêtres de transmission-absorption utilisées en télédétection.

d'après Scanvic, (1983).

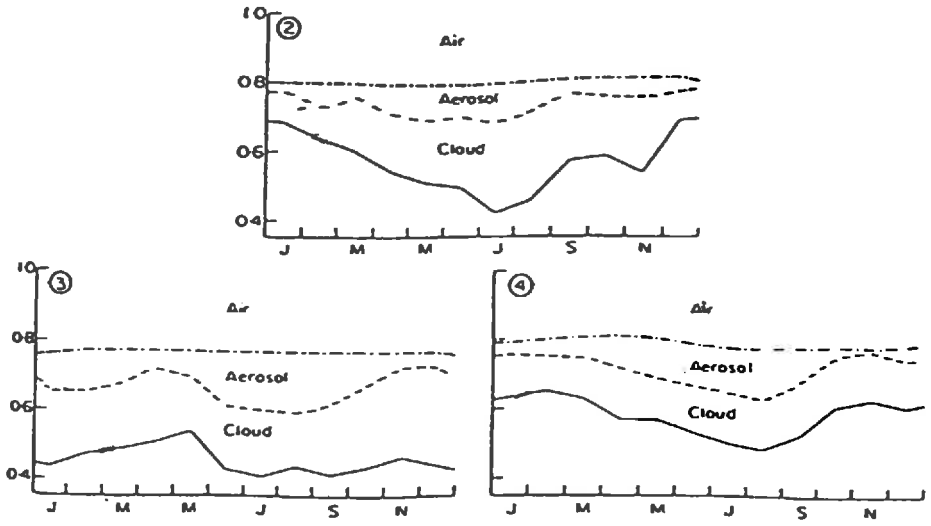


Figure 2.4 : Variation annuelle à Sumaru (Nigéria schéma 2), Kinshasa (Zaïre, schéma 3) et Mugugu (Kénya, schéma 4) du :

- facteur de transmission atmosphèrique $\mathcal{E}a$ (——)
- maxima moyen mensuel du flux extra-terrestre (- - - -)
- facteur de transmission calculé pour une atmosphère sans nuages et sans aérosols (- · - · -).

d'après Monteith, (1972).

2.32) L'efficience climatique (ε_c)

Cette efficience, rappelons-le, est définie comme étant égale au rapport entre le rayonnement photosynthétiquement actif (RPA) et le rayonnement global (Rg).

Comme nous l'avons vu dans le chapitre I, la conversion de l'énergie des photons incidents en énergie chimique par l'appareil photosynthétique n'est réalisée que dans les longueurs d'onde comprises entre 350 et 750 nm, ceci avec une efficacité plus ou moins forte dans cet intervalle. Depuis les travaux de McCree (1972) la gamme **400-700 nm** est communément admise pour définir le **RPA**. Le RPA peut être exprimé soit en flux de photons, soit en énergie.

2.32a) Mesure du RPA en éclairement énergétique

La mesure du RPA est généralement obtenue par différence entre les mesures effectuées à l'aide de deux pyranomètres dont l'un possède un filtre "passe-haut" ne permettant que la transmission des radiations infrarouges (>700 nm). Cependant, une légère erreur de mesure du RPA intervient car les radiations inférieures à 400 nm ne sont pas éliminées ($\cong$ 5 % du Rg). De plus, des erreurs peuvent résulter de parasitages dus à des phénomènes d'échauffement des instruments (Varlet-Grancher *et al.*, 1989).

De nouveaux instruments sont apparus récemment sur le marché qui ont une réponse en longueur d'onde correcte mais pour lesquels les phénomènes d'échauffement subsistent.

2.32b) Facteurs de variation, valeurs d'efficience climatique

Hors de l'atmosphère, la valeur de ε_c est de l'ordre de 0.38 (Thekaekara, 1976). Cependant, en traversant l'atmosphère, les phénomènes d'absorption et de diffusion modifient la composition du spectre incident à la surface du sol.

De nombreux travaux ont montré que la durée d'intégration des mesures (heure, journée,...), les conditions atmosphériques et le lieu modifient très peu la part du rayonnement utile à la photosynthèse dans le rayonnement global (Varlet-Grancher *et al.*, 1981 ; Varlet-Grancher *et al.*, 1982 ; Meek *et al.*, 1984). Les valeurs de ε_c obtenues à partir de ces nombreux travaux, varient le plus souvent dans une gamme de **0.45** à **0.51** qui est du même ordre de grandeur que celle correspondant à la précision des mesures.

2.32c) Précision des mesures

Varlet-Grancher *et al.* (1981) et Meek *et al.* (1984), suite à des mesures faites pour plusieurs pas de temps (heure, journée) ainsi que pour différents sites, estiment que la valeur de

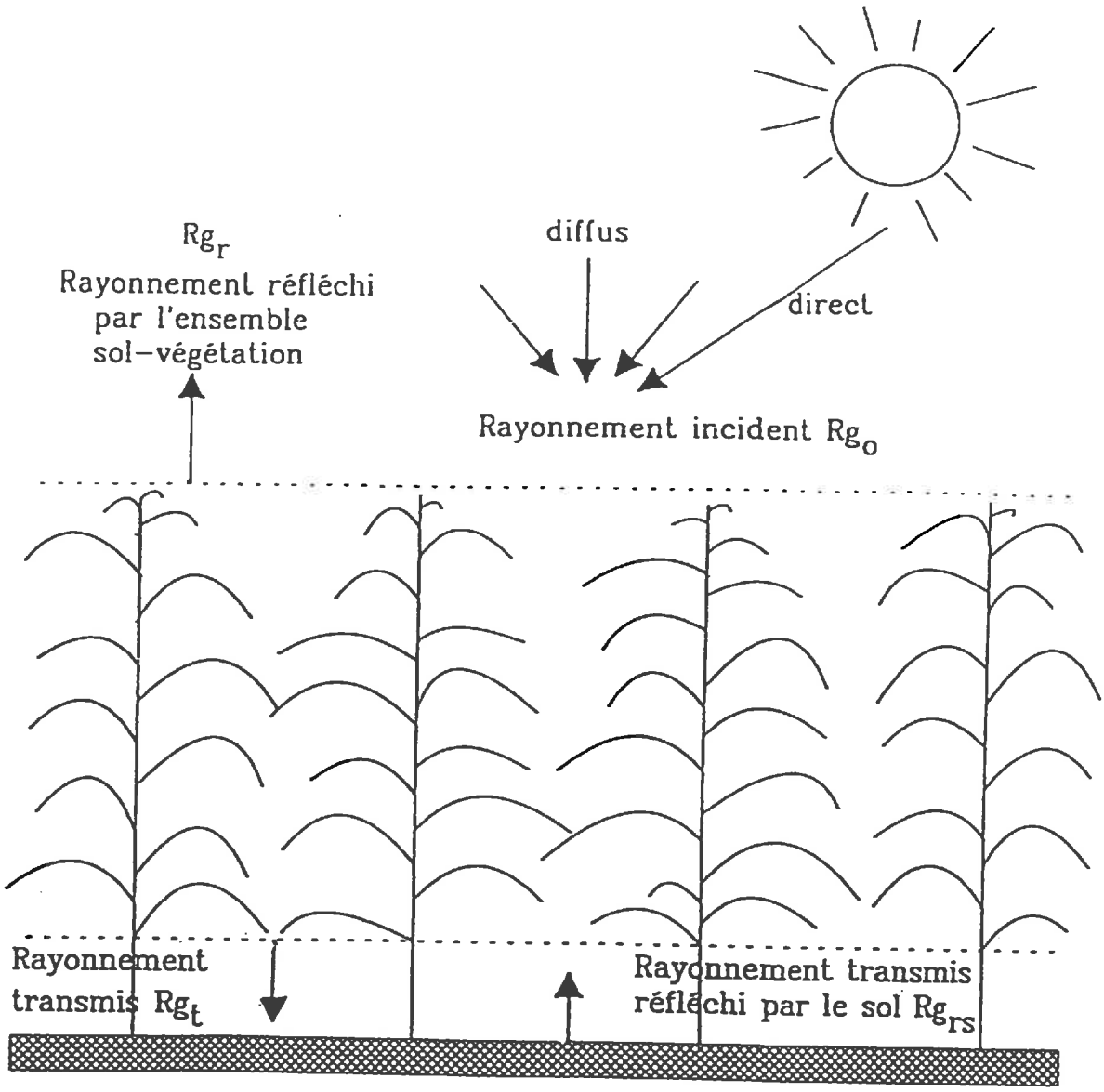


Figure 2.5 : Bilan radiatif d'un couvert végétal.

ε_c peut être approximée avec une précision de l'ordre de 10 % en valeur relative soit 0.03 en valeur absolue.

2.33) L'efficience d'interception (ε_i)

Des précisions doivent être apportées quant à la définition de ce facteur. En effet, dans la littérature, le terme de rayonnement intercepté est couramment utilisé indistinctement du terme de rayonnement absorbé. Pourtant une distinction doit être faite entre ces deux termes. Le rayonnement intercepté ne représente que la différence entre les photons incidents et ceux transmis à travers les feuilles ($Rg_i = Rg_o - Rg_t$) (fig. 2.5). Cependant, sur la quantité interceptée, seule une partie est absorbée (Rg_a) par le végétal. En effet, une certaine quantité est réfléchie à la surface du couvert (Rg_r), une autre est transmise au sol (Rg_t) qui en renvoie également une partie vers la végétation et l'atmosphère (Rg_{rs}). L'estimation du rayonnement absorbé par un couvert végétal consiste donc en l'établissement d'un bilan entre l'énergie reçue (Rg_o, Rg_{rs}) et l'énergie perdue (Rg_r, Rg_t).

$$Rg_a = Rg_o - Rg_r - Rg_t + Rg_{rs}$$

La différence entre la quantité absorbée et la quantité interceptée est surtout importante dans la partie proche infrarouge du spectre où les phénomènes de réflexions sont élevés. Dans la région rouge du spectre, ε_i et ε_a peuvent être utilisées indifféremment du fait de la très forte absorption par les pigments chlorophylliens (Asrar *et al.*, 1989). Il est également important de faire la distinction entre ε_i et ε_a lorsque la végétation devient sénescente. En effet, durant cette période bien que l'interception par les parties sèches reste élevée, les phénomènes d'absorption disparaissent par dégradation de l'appareil photosynthétique.

2.33a) Mesure de ε_i et ε_a

* Méthodes indirectes

Ces méthodes reposent sur la détermination de fréquences de "trouées" dans le couvert. Citons par exemple :

- les photographies hémisphériques (Bonhomme et Chartier, 1972),
- la méthode des "points quadrats", qui consiste à enfoncer une aiguille dans le couvert et à compter le nombre de contacts avec les feuilles (Warren Wilson, 1960),
- Formulations indice foliaire (IF) \ efficience d'interception de la forme :

ε_i(journalière) = ε_{imax} . (1 - exp (-k . IF)) (Gallo *et al.*, 1985).

avec l'efficience maximale (ε_{imax}) considérée comme constante et égale à 0.95 et le coefficient d'absorption journalière du couvert végétal (k) qui dépend des propriétés optiques et géométriques du couvert (Varlet-Grancher et Bonhomme, 1979).

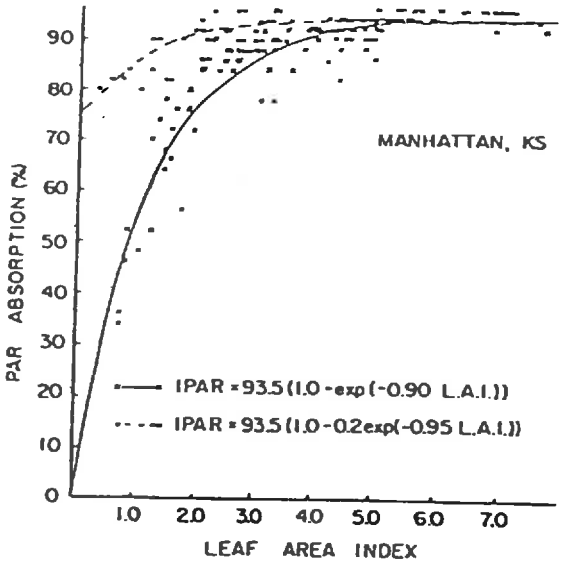


Figure 2.6 : Interception du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) en fonction du Leaf Area Index (LAI) pendant la phase de croissance (——) et la phase de sénescence (- - -) d'un couvert de blé d'hiver.

d'après Hipps *et al.*, (1983).

Toutes les méthodes présentées ci-dessus ne permettent que l'évaluation de ε_i. Il existe cependant des moyens d'approximation de ε_i et ε_a par modélisation du couvert végétal (Bégué, 1991).

* Méthodes directes

Elles consistent en des mesures radiatives (capteurs ponctuels disposés en réseau ou déplacement du capteur dans le couvert). Pour estimer correctement le bilan radiatif, il faut, quelle que soit la gamme spectrale considérée (RPA ou rayonnement global), disposer (fig. 2.5) :

- un capteur horizontal au dessus de la végétation pour évaluer le rayonnement incident (Rg_o),
- un capteur horizontal en position inverse au dessus de la végétation pour évaluer le rayonnement réfléchi par l'ensemble sol-culture (Rg_r),
- un capteur au niveau du sol pour estimer le rayonnement transmis (Rg_t),
- un capteur horizontal en position inverse sous le couvert pour mesurer le rayonnement réfléchi par le sol (Rg_{rs}).

Cette technique est très lourde à mettre en oeuvre car les mesures doivent englober une large surface de façon à tenir compte de l'hétérogénéité du milieu. De plus, pour les capteurs disposés en position inverse, il faut éviter les parasitages de mesures induites par un rayonnement rasant. Pour ces raisons, généralement seule la mesure du rayonnement intercepté (Rg_o - Rg_t) est effectuée.

2.33b) Facteurs de variation, valeurs de ε_i et ε_a

L'évolution de ε_i ou ε_a est très liée à l'implantation du couvert végétal et le facteur principal de variation est l'indice foliaire (IF exprimé en m^2 de feuilles / m^2 de sol et plus communément appelé LAI pour Leaf Area Index) (fig. 2.6). Dans des conditions de milieu non limitantes, et quel que soit le couvert végétal, l'interception maximale du rayonnement est atteinte lorsque l'IF du couvert est supérieur à 3-4, dans le cas d'un couvert planophylle, et supérieur à 6, dans le cas d'un couvert érectophylle (Varlet-Grancher *et al.*, 1982). Pour ce qui concerne l'efficience d'interception, la valeur décroît ensuite peu alors que la végétation devient sénescente. Par contre, il y a décroissance de l'efficience d'absorption suite à la dégradation de l'appareil photosynthétique.

La valeur maximale de ε_i ou ε_a est généralement fixée à 0.90-0.95 car il existe toujours une perte de 5 à 10 % par la non prise en compte du rayonnement réfléchi dans le cas de ε_i et par des phénomènes d'absorption inactive dans le cas de ε_a (Loomis et Williams, 1963).

Tant que la végétation n'est pas couvrante, l'efficacité d'interception va dépendre des propriétés optiques des feuilles, de la géométrie du feuillage, des propriétés optiques du sol. En rayonnement direct vertical, un couvert à port foliaire dressé possède une efficience d'interception journalière supérieure à un couvert à port horizontal et à même indice foliaire. Lorsque la part de rayonnement diffus augmente, l'influence de la structure de la végétation est

fortement atténuée et l'efficience d'interception moyenne est augmentée (Hipps *et al.*, 1983). Ceci est dû au caractère multidirectionnel du rayonnement diffus.

Lorsque les plantes sont situées en conditions de croissance non limitantes, les mesures de RPA absorbé et de RPA intercepté effectuées pendant la période de croissance ne montrent pas de différence significative entre ces deux valeurs (Bégué, 1991). Ceci résulte comme nous l'avons vu précédemment, d'une très forte absorption du rayonnement, dans cette zone du spectre solaire, par les pigments assimilateurs.

2.33c) Précision de la mesure de ε_i et ε_a

La précision des mesures faites sur ε_i et ε_a va dépendre de plusieurs facteurs. Tout d'abord, elle dépend de la précision de mesure des instruments utilisés qui, comme nous l'avons vu pour ε_c, est évaluée entre 10 et 20 W m^{-2}. Ensuite, durant les premiers stades de développement du couvert, les surfaces foliaires sont si faibles que les termes du bilan radiatif sont difficilement mesurables. Plus un couvert aura une croissance rapide, moins l'erreur finale faite sur l'ensemble du cycle de végétation sera élevée. Il est important de bien connaître la méthode qui a été utilisée pour calculer le bilan radiatif afin d'être conscient de la validité des valeurs estimées. Ainsi, Gallagher et Biscoe (1978) considèrent la partie absorbée par le végétal comme étant égale à la différence entre le rayonnement intercepté (Rg_o - Rg_t) et le rayonnement réfléchi par le système plante-sol (Rg_r). La partie réfléchie par le sol vers la végétation (Rg_{rs}) est négligée (fig. 2.5). Enfin, la précision de la valeur estimée dépend également du nombre de répétitions effectuées, du nombre de radiomètres utilisés et de la plus ou moins grande hétérogénéité du couvert observé.

En tenant compte des erreurs faites sur les mesures et des facteurs qui agissent sur les valeurs respectives d'interception et d'absorption, il est possible d'**assimiler RPA_i et RPA_a pendant toute la phase de croissance** d'un couvert. Ceci n'est réalisable qu'en **conditions** d'environnement **non limitantes**, c'est à dire lorsque le système d'absorption chlorophyllien n'est pas altéré. Pendant les phases de maturation et de sénescence, ces deux facteurs doivent être considérés distinctement.

2.34) L'efficience de conversion (ε_b)

Comme nous l'avons déjà mentionné, ε_b correspond idéalement au rapport entre la quantité de matières hydrocarbonées produites pendant un temps donné et la quantité de rayonnement absorbée durant ce même laps de temps. L'utilisation du modèle de Monteith suppose la conservation de l'hypothèse de linéarité qui, rappelons le, n'est envisageable qu'en conditions d'environnement non limitantes. Cela implique que les valeurs de ε_b utilisées devront être dérivées de travaux effectués sur des plantes n'ayant subi aucun stress.

2.34a) Méthodes de mesure

A l'heure actuelle, il n'existe pas de modèle destiné à estimer le facteur ε_b. Des modèles ont été développés permettant, pour les uns d'estimer le rayonnement intercepté ou absorbé par un type de couvert (Bégué, 1991), pour les autres de modéliser la production de matière sèche (Goudriaan, 1977). Cependant, aucun modèle n'intègre l'estimation simultanée de ces deux paramètres permettant ainsi d'aboutir à des valeurs d'εb.

Le seul accès aux valeurs de ε_b se fait donc par l'établissement de rapports entre des valeurs de RPA_i (ou RPA_a) mesurées ou modélisées sur un pas de temps donné et des valeurs de production de matière sèche mesurées pendant le même pas de temps.

Les méthodes de mesure des quantités de rayonnement interceptées ou absorbées sont les mêmes que celles décrites précédemment pour l'estimation de ε_i ou ε_a.

Quant aux méthodes de mesure des quantités de matière sèche produites, elles utilisent les procédés décrits dans le chapitre I à propos de l'estimation de la production primaire. Il faut cependant rappeler que, du fait des difficultés rencontrées pour effectuer des mesures de terrains, les valeurs généralement disponibles sont des valeurs de biomasse épigée. En conséquence, les valeurs estimées à l'aide du modèle, seront généralement des valeurs de production épigée. Les mesures étant effectuées sur des plantes se développant en milieu non limitant et protégé, les pertes dues à des consommations ou à des chutes d'organes peuvent être négligées. Ainsi, les valeurs de biomasse épigée sont assimilables à des valeurs de production primaire nette.

L'estimation de la production primaire brute nécessite, quant à elle, de prendre en compte les pertes dues aux respirations (maintenance, croissance, photorespiration). La mise en évidence des parties croissance et entretien a fait l'objets de nombreuses techniques (cf. chapitre I). Les nombreux travaux entrepris ont fourni des valeurs de respiration très variées et ne permettent pas de tirer de conclusion générale. De ce fait, l'estimation de la respiration est basée, actuellement, sur de nombreuses hypothèses.

- Thornley (1970) considère que la respiration obscure (R_t) peut être approximée en reliant linéairement la respiration d'entretien (R_m) à la masse du végétal (M) et la respiration de croissance (R_c) au taux de croissance (ΔM).

Ainsi : $R_t = R_m + R_c = k \,.\, \Delta M + m \,.\, M$

Mc Cree (1972) donne des valeurs de k variant entre 0.25 et 0.5 et des valeurs de m variant entre 0.005 et 0.015 j^{-1}.

- La plupart des auteurs estiment que l'intensité de la respiration à la lumière est identique à la respiration obscure (Chapman et Graham, 1974 ; McCree et Silsbury, 1978).

- Enfin, la part due à la photorespiration (R_p) est considérée comme étant négligeable chez les plantes de type C4. Pour ce qui concerne les C3 des formulations, établies à l'échelle de la feuille, sont basées sur des différences de concentration en CO_2. Il en est ainsi pour la relation proposée par Laing *et al.* (1974) :

$$R_p = \frac{\Gamma^* A_g}{C_i}$$

Type de plante	Localité	PARa PARi	valeur d'εb g MS/MJ PAR	référence
Plantes en C4				
Maïs	France	i mesuré	2.49	Gosse *et al.* 1986
Canne à sucre	Guadeloupe	i mesuré	2.65	"
Panicum maximum	Côte d'Ivoire	i modélisé	2.39	"
Sorghum	France	a modélisé	3.4	Varlet-Grancher et al. 1991
moyenne			**2.73** **±0.46**	
Plantes en C3 non légumineuses				
Roseau	France	i mesuré	1.88	Gosse *et al.* 1986
Blé d'hiver	France	i modélisé	2.00	"
Colza d'hiver	France	i mesuré	1.83	"
Colza de printemps	France	i mesuré	1.95	"
Topinambour	France	i mesuré	1.94	"
Fétuque	France	i modélisé	1.89	"
Pomme de terre		i mesuré	2.95	"
Coton		i mesuré	2.55	"
Orge, Betterave, Pomme de terre	Angleterre	i mesurés	2.8	Monteith 1977
moyenne			**2.2** **±0.44**	
Plantes en C3 légumineuses				
Vigna sp.	Guadeloupe	i mesuré	1.66	Gosse *et al.* 1986
Luzerne	France	i mesuré	1.77	"
Féverole	France	i modélisé	1.54	"
moyenne			**1.66** **±0.11**	
moyenne totale			**2.23** **±0.53**	

Tableau 2.1 :

Pentes des ajustements linéaires matière sèche/rayonnement intercepté ou absorbé
Résultats bibliographiques

où :

R_p = taux de photorespiration,

Γ = point de compensation,

A_g = taux d'assimilation brut de CO_2,

C_i = concentration en CO_2 dans les cavités stomatiques.

Devant les difficultés à estimer correctement les pertes dues aux respirations, on peut se demander si l'inclusion dans le modèle d'une valeur constante pour tenir compte des pertes respiratoires n'est pas suffisante, les estimations n'étant pas plus précises qu'une valeur moyenne.

2.34b) Facteurs de variation, valeurs de ε_b

S'agissant de valeurs mesurées en conditions optimales, les facteurs du milieu n'ont aucune action sur la valeur de ε_b. Ce sont les caractéristiques intrinsèques des différentes espèces végétales qui sont le facteur principal de variation de ε_b. Ainsi, Gosse *et al.* (1986) ont montré, à partir de l'étude sur plusieurs espèces, que les cultures pouvaient être classées en trois grands groupes selon la valeur moyenne de ε_b. Ces subdivisions sont réparties, comme on pouvait le soupçonner, selon les différents types de cycles photosynthétiques. Les plantes en C4 présentent des valeurs plus élevées que les plantes en C3 (2.51 ± 0.13 g MS/MJ RPA_a contre 1.93 ± 0.08). Une distinction est visible à l'intérieur même des C3 où les légumineuses ont une valeur encore plus faible (1.72 ± 0.1). Cette perte d'efficience est généralement expliquée par le coût de l'assimilation azotée. Ces valeurs s'entendent en tant que valeurs moyennes pour les espèces étudiées par les auteurs. Ce sont des valeurs évaluées sur la durée du cycle végétatif et correspondent à de la biomasse épigée.

L'autre facteur principal de variation incombe surtout à la méthode de mesure utilisée. Selon les travaux, les valeurs de matière sèche sont rapportées au RPA_i ou au RPA_a. Pour ce qui concerne la matière sèche produite, tantôt les parties épigées et hypogées sont prises en compte, tantôt seules les parties épigées sont considérées, tantôt seules les parties vertes. Cela conduit à une très grande variabilité des valeurs de ε_b rencontrées dans la bibliographie et à une quasi impossibilité de comparaison de ces valeurs entre elles (tableau 2.1).

Le facteur temps d'intégration ne semble pas avoir d'effet sur la valeur ε_b. En effet, dans le cas de conditions optimales de culture, et à la suite des travaux de Monteith (1977), il est communément accepté que **la valeur de ε_b est constante** pour une plante donnée **durant toute la phase végétative**.

Enfin, il faut souligner que les valeurs se rapportant à la végétation naturelle sont quasi inexistantes, qu'il en est de même pour la végétation arborée et que les valeurs n'ont, en grande majorité, été estimées qu'en monoculture.

2.34c) Précision des mesures

La précision des valeurs de ε_b dépend entièrement de la précision de mesure des différents termes du bilan radiatif et de l'accumulation de la matière sèche. La précision des mesures d'efficience d'interception du rayonnement est, comme nous l'avons déjà vu, de l'ordre de 0.15 à 0.3. La précision des mesures de matière sèche est difficile à chiffrer car de nombreux paramètres interviennent (quantité de matériel prélevé, nombre de répétitions, date de prélèvement dans le cycle végétatif, opérateur, organes prélevés (la biomasse racinaire est très difficile à échantillonner,...). Cependant, certains auteurs (César, 1971) avancent des valeurs de précision, sur les quantités de biomasse mesurées, de l'ordre de 20 à 30 % en valeur relative.

2.4) Validité du modèle de Monteith

Quelques auteurs se sont attachés à vérifier la validité du modèle de Monteith, ceci généralement sous sa forme simplifiée (Monteith, 1972 ; Varlet-Grancher *et al.*, 1982 ; Gosse *et al.*, 1986). **Leurs études ont confirmé la possibilité d'ajuster à une droite l'accumulation de matière sèche par un couvert végétal en fonction du rayonnement intercepté ou absorbé. Ceci a été vérifié pour une large gamme d'espèces végétales, ce qui tend à prouver que ce modèle est applicable à l'ensemble des plantes vertes autotrophes. Cependant, l'utilisation de ce modèle ne peut se faire que sous certaines conditions inhérentes aux hypothèses de construction de celui-ci.**

* **Les conditions d'environnement doivent être non limitantes.** L'apparition d'un stress peut, soit induire une diminution de l'efficience de conversion, soit faire varier la répartition des assimilats entre les parties aériennes et les parties souterraines. L'application du modèle en conditions limitantes ne peut être envisagée que si l'intensité du stress induit par un ou des facteurs limitants demeure constante durant toute la durée de vie de la plante. Les valeurs estimées par ce modèle correspondent donc à des valeurs potentielles de production par rapport au milieu considéré. L'accès à des valeurs réelles ne peut être envisagé que par l'ajout d'un paramètre, indépendant de la valeur potentielle, visant à refléter le niveau de stress induit par le milieu. Ainsi, certains auteurs ont introduit un facteur supplémentaire à la formulation de Monteith destiné à prendre en compte le déficit hydrique comme, par exemple, le rapport ETR/ETP, appelé "indice de stress", utilisé par Asrar *et al.* (1985).

* **La linéarité de la relation n'est vérifiée que pendant la période de pleine croissance végétative des couverts.** Son application est difficile, d'une part pendant la phase d'implantation de la culture (forte intervention des parties souterraines, variation de l'efficience de conversion, mauvaise mesure du rayonnement intercepté) et d'autre part pendant les phases de maturation et de sénescence (remplissage des fruits, migration racinaires, destruction des pigments assimilateurs) (Gosse *et al.*, 1986). La phase d'implantation de la culture peut

cependant être négligée, du fait de la faible part qu'elle occupe dans le cycle. Les phases de maturation et surtout de sénescence peuvent quant à elles être ignorées lors de la modélisation car durant ces périodes l'activité photosynthétique décroît puis s'arrête très rapidement.

*** La linéarité des relations entre production de matière sèche aérienne et rayonnement absorbé, nécessite la présence d'une stabilité de répartition des assimilats entre parties aériennes et parties souterraines ainsi qu'une constance de la valeur de ε_b.** Pour de nombreuses espèces annuelles, le rapport parties aériennes/parties souterraines varie surtout durant la phase d'implantation du végétal (phase négligeable). Pour des espèces présentant de fortes accumulations dans le système racinaire, il est important de tenir compte des parties souterraines. Des études menées sur la pomme de terre, la betterave (Monteith, 1977) et le topinambour (Gosse *et al.*, 1986), ont montré que la relation matière sèche totale produite / énergie absorbée reste linéaire. Dans le cas de plantes pérennes, de forts échanges peuvent se produire entre les parties épigées et hypogées, surtout au moment de reprise de végétation. Durant cette période, la croissance aérienne résulte de la production photosynthétique et de l'utilisation des réserves racinaires. Dans ce cas, des relations linéaires ont également été observées chez le roseau, mais avec des droites présentant une ordonnée à l'origine positive (Gosse *et al.*, 1986).

CHAPITRE III

L'APPORT DES DONNEES SATELLITAIRES

CHAPITRE III

L'APPORT DES DONNEES SATELLITAIRES

Pouvoir disposer de données, sur l'ensemble de la planète, avec une répétitivité temporelle élevée requiert l'utilisation de nouvelles méthodes et de nouveaux types d'outils. Les satellites, par leurs caractéristiques, sont rapidement apparus comme des instruments pouvant répondre à ce type d'exigence.

Avant de proposer, dans les chapitres qui suivent, une possibilité d'utilisation des données satellitaires, il va être procédé au rappel de quelques notions concernant la télédétection et l'étude de la végétation. Pour ce qui concerne les bases physiques de la télédétection, un bref résumé accompagné de quelques généralités est fourni en annexe A de ce document.

3.1) Caractéristiques spectrales des sols et de la végétation

La réflectivité spectrale d'un corps est fonction de sa nature. Certains auteurs (Coulson et Reynolds, 1971) ont montré par des mesures en laboratoire que, dans les mêmes conditions géométriques d'incidence et d'observation un objet a une luminance ou une réflectance qui varie en fonction de la longueur d'onde. Cette variation est désignée par le terme de **courbe spectrale** de l'objet.

3.11) Cas de la végétation

Comme nous l'avons déjà vu dans le chapitre I (§1.12), les pigments contenus dans les feuilles présentent une forte absorption (faible réflectance) dans le bleu (0.45 et 0.48 à 0.5µm) et dans le rouge (0.68 µm). Par contre, le rayonnement est fortement réfléchi par les feuilles pour les longueurs d'onde allant du proche infrarouge (0.75 µm) jusqu'à l'infrarouge (1.3µm) (fig. 3.1).

Les modifications phénologiques des végétaux se manifestent par des changements dans la courbe de réponse spectrale. Lorsque la plante croît, la quantité de pigments chlorophylliens augmente. Cela se traduit par une absorption plus forte dans les longueurs d'onde à 450 et 680 nm. Au contraire, lors de la sénescence des plantes (arrêt de fonctionnement des pigments, diminution du contenu en eau), la réflectance augmente dans ces mêmes longueurs d'onde (fig. 3.2). Outre le rôle des pigments et du contenu en eau des plantes, la morphologie (épaisseur des feuilles, inclinaison, surface foliaire, épaisseur du couvert, ...) tient une part importante dans la variation des valeurs de réflectance.

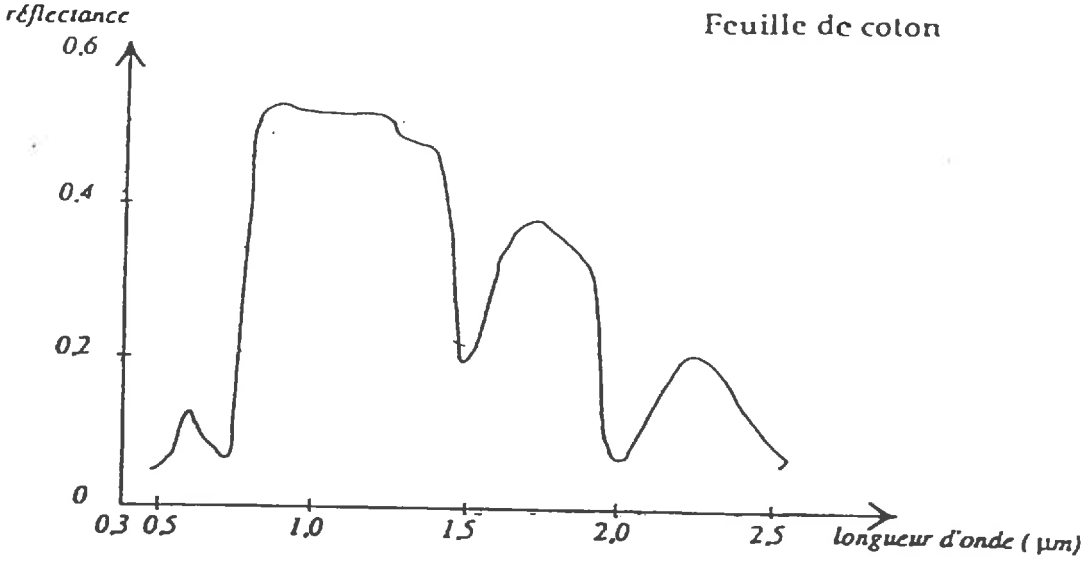


Figure 3.1 : Spectre de réflectance de feuilles de coton.

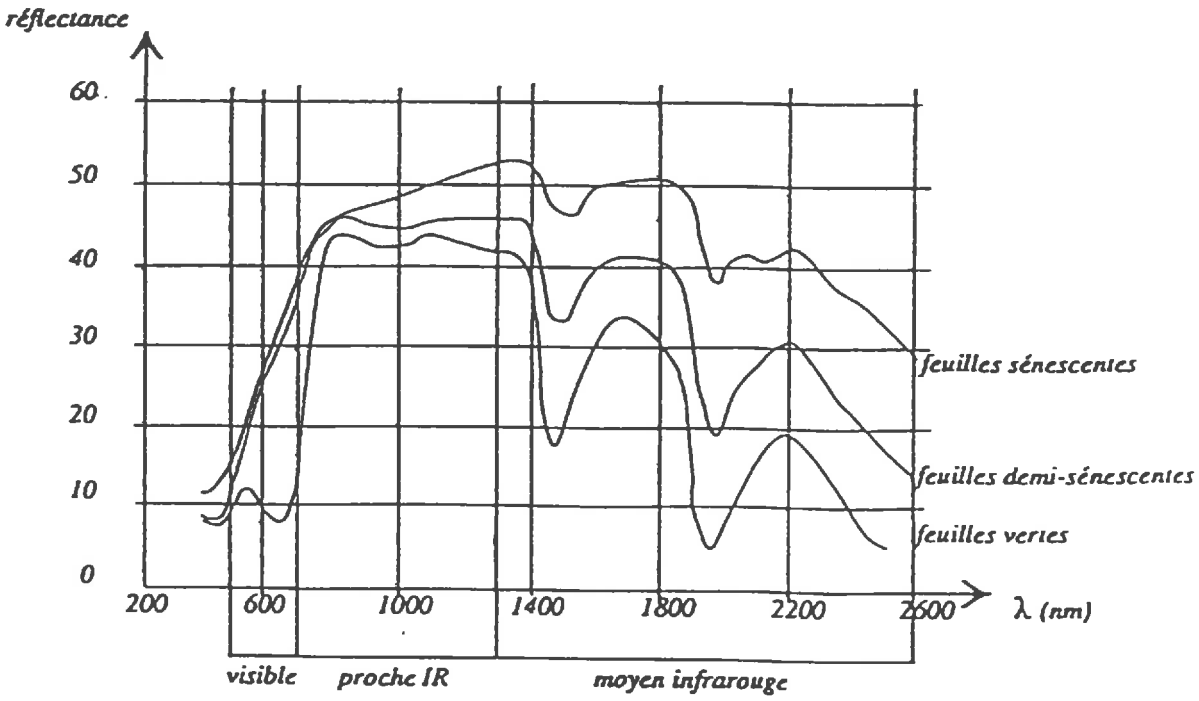


Figure 3.2 : Evolution des spectres de réflectance de feuilles de blé au cours de la sénescence.
d'après Guyot, (1984).

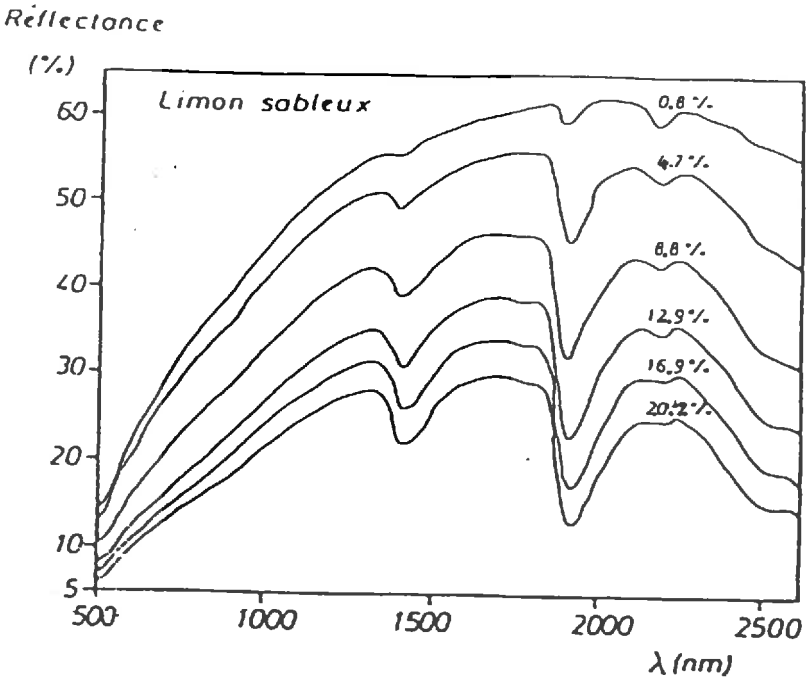


Figure 3.3 : Influence de la teneur en eau des sols sur leur réponse spectrale.
d'après Guyot, (1983).

3.12) Cas des sols

La réponse spectrale des sols est fonction de leur couleur, de leur degré d'humidité, de leur rugosité (fig. 3.3). Il est à noter que les amplitudes de variation des courbes spectrales sont beaucoup plus faibles que celles observées pour la végétation (principalement entre les longueurs d'onde rouge et proche infrarouge). La forte réflectance de la végétation par rapport au sol dans le proche infrarouge, est due au fait que le rayonnement est reflété par une surface pour le sol, alors qu'il s'agit d'une réflectance volumique pour la végétation. **Le choix des longueurs d'onde à utiliser pour tenter de discriminer la végétation des autres objets observés s'est donc porté vers le rouge et le proche infrarouge.** Cependant, la luminance enregistrée par un capteur va intégrer celle de la végétation mais aussi celle du sol sous-jacent ou voisin. L'état actuel des recherches ne permet pas de dissocier entièrement la part de luminance de la végétation de celle du sol ce qui occasionne une gêne constante lors de l'étude de la végétation.

Il faut souligner que les courbes de réponse spectrale présentées ci-dessus résultent d'études en laboratoire et sont établies pour une espèce végétale ou un type de sol donné avec une configuration de prise de vue donnée. Lors du passage en application tous ces signaux vont être fortement perturbés par la présence dans une même cible de structures hétérogènes, par la présence de l'atmosphère entre l'objet visé et le capteur, par les différentes configurations de prise de vue (angle zénithal solaire, angle de visée) qui vont se succéder au cours du temps et enfin par la taille du pixel. En conséquence, dans les données fournies par les satellites, la reconnaissance directe des objets visés par les capteurs est rarement possible.

Pour tenter d'améliorer la reconnaissance des objets visés par le satellite, des combinaisons de valeurs enregistrées dans plusieurs longueurs d'onde ont été testées. Dans l'étude de la végétation, les combinaisons les plus employées sont le rapport simple SR (SR = proche infrarouge/rouge) et l'**indice normalisé de végétation NDVI.**
NDVI = ((PIR - R) / (PIR + R)) (Rouse *et al.*, 1974).

3.2) L'indice normalisé de végétation (NDVI).

Des différents indices proposés, une attention particulière va être portée sur le NDVI qui a composé la base de données satellitaires disponibles pour ce travail.

L'utilisation du NDVI a été proposée la première fois par Rouse *et al.* (1974) en le composant à partir des canaux 5 (rouge-orangé) et 6 (rouge-proche infrarouge) des satellites Landsat. Cela a ensuite été également étendu à l'utilisation de photographies dans le visible et l'infrarouge (Tucker, 1979) puis à la combinaison des canaux 1 et 2 des satellites NOAA/AVHRR.

Le principe du traitement en rapport est destiné à améliorer le contraste d'un pixel à un autre. L'utilisation des bandes rouge et proche infrarouge dans le NDVI a pour but de mieux différencier les structures végétalisées des sols et à l'intérieur même des structures végétalisées de différencier le plus ou moins fort développement de la végétation ainsi que les différents

types de végétation. Malgré la validité de cette base théorique, les réelles significations biophysiques de la mesure spectrale ne sont pas encore entièrement maîtrisées. Cette interprétation est en grande partie occultée par la perturbation de la mesure par différents facteurs tels que : les perturbations atmosphériques, la variation des conditions angulaires des mesures, l'influence du sol, le vieillissement des capteurs.

3.21) Prétraitements des données radiométriques

Les données sont fournies, à l'utilisateur, sur support informatique sous forme de comptes numériques résultant de la numérisation du signal électrique en sortie du capteur. Ces valeurs doivent être transformées en valeurs physiques équivalentes, c'est à dire des luminances. Cette transformation est de type :

$$L = \alpha * (CN - CN_0)$$

où : L est la luminance dans la bande spectrale traitée, α est un coefficient d'étalonnage, CN le compte numérique enregistré et CN_0 un offset prédéfini en compte numérique correspondant à une luminance nulle.

Dans le domaine du spectre solaire, la valeur de la luminance dépend de la hauteur du soleil au moment de la mesure. Il est donc préférable de normaliser les données en les rapportant à des valeurs de réflectances.

$$\rho = \frac{\pi \,.\, \alpha \,.\, (CN - CN_o)}{Es \,.\, \cos(\theta s) \,.\, \left(\frac{d_o}{d}\right)^2}$$

où : Es est l'éclairement solaire équivalent dans la bande spectrale considérée, θs l'angle zénithal solaire et $(d_0/d)^2$ un coefficient prenant en compte la variation de la distance terre/soleil.

Un étalonnage des différents radiomètres est effectué avant la mise en orbite des satellites. Cependant, une fois placés en orbite, les instruments se dégradent au cours du temps. Cette dégradation entraîne une perte de précision des mesures qui peut conduire à des variations temporelles significatives des valeurs de NDVI alors que la structure observée au sol n'a pas évolué (Holben *et al.*, 1990 ; Goward *et al.*, 1991). Si cette dérive n'est pas prise en considération, les données deviennent difficilement comparables entre elles, surtout lorsque l'on utilise des données provenant de plusieurs satellites, ce qui est le cas dans ce travail (NOAA/AVHRR 9 et 11). Malheureusement, il n'existe pas de système d'étalonnage à bord des satellites NOAA/AVHRR. Pour pallier ce problème, plusieurs auteurs ont tenté de faire des estimations du niveau de dégradation des capteurs au cours du temps (Holben *et al.*, 1990 ; Kaufman et Holben, 1990 ; Teillet *et al.*, 1990). Leurs méthodes d'estimation de la perte de sensibilité des instruments reposent sur le suivi temporel d'une cible au sol dont les propriétés de réflectance sont très stables au cours du temps. C'est le cas du désert de Lybie qui est géologiquement stable, très peu modifié par l'action de l'homme, qui ne possède aucune trace de végétation et dont l'atmosphère est très peu perturbée par la présence de nuages. Holben *et al.* (1990) ont estimé, pour NOAA 9, que la dérive a été de 10 et 15 % pour les canaux 1 et 2 juste

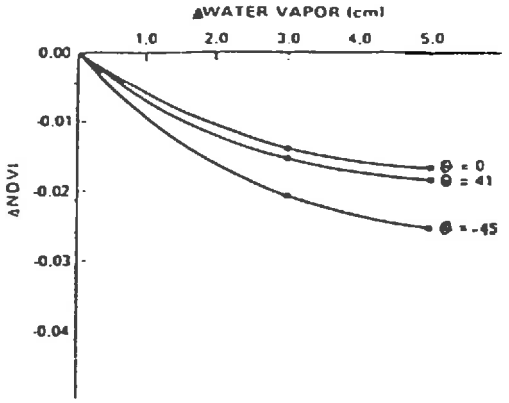


Figure 3.4 : Simulation de la variation du NDVI en fonction du contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère pour trois angles de visée et pour un couvert dense au solstice d'été.
réflectance canal rouge = 0.05.
réflectance canal proche infrarouge = 0.40.

d'après Holben, (1986).

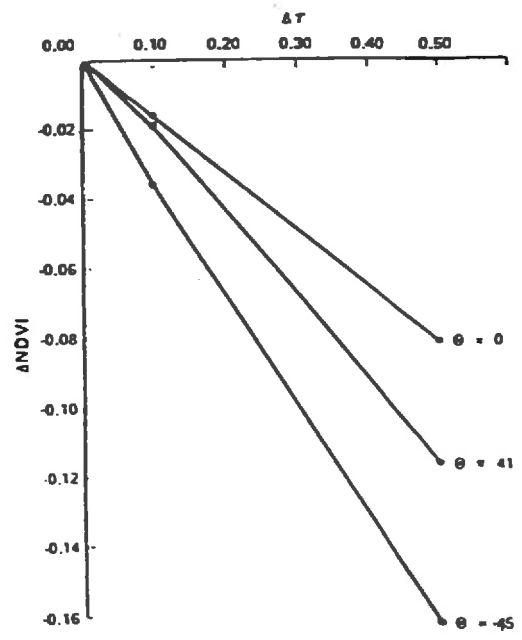


Figure 3.5 : Simulation de la variation du NDVI en fonction de l'épaisseur optique des aérosols pour trois angles de visée et pour un couvert dense au solstice d'été.
réflectance canal rouge = 0.05.
réflectance canal proche infrarouge = 0.40.

d'après Holben, (1986).

après le lancement. La détérioration de l'étalonnage s'est ensuite poursuivie à raison d'environ 3 % par an dans les deux canaux. Pour ce qui concerne NOAA 11, la dérive après lancement a été, respectivement, de 22 et 32 % pour les canaux 1 et 2 (Holben *et al.*, 1990).

3.22) Les perturbations d'origine atmosphérique

Si l'atmosphère ne perturbait pas le rayonnement électromagnétique, l'interprétation des données satellitaires serait beaucoup plus aisée. Les résultats des études effectuées à l'aide de radiomètres au sol le prouvent. Dans le rayonnement visible et proche infrarouge utilisé pour composer le NDVI, les différents constituants de l'atmosphère vont affecter le signal soit par des effets de diffusion, soit par des effets d'absorption. La diffusion peut soit diminuer, soit augmenter le signal. L'absorption n'entraîne, quant à elle, qu'une diminution du signal. La variation provoquée sur le NDVI dépendra du niveau de perturbation occasionné dans les canaux respectifs (Holben, 1986). D'après des simulations effectuées par Goward *et al.* (1991), la valeur de NDVI enregistrée au sommet de l'atmosphère peut être jusqu'à 30 % inférieure à la valeur équivalente à la surface du sol si aucune correction n'est apportée.

Plusieurs auteurs ont tenté de développer des modèles permettant de corriger les valeurs de réflectance enregistrées (Dedieu, 1990 ; Paltridge et Mitchell, 1990). Certaines corrections, comme celles concernant la diffusion de Rayleigh, peuvent être effectuées assez précisément. En effet, les teneurs atmosphériques en azote et en oxygène sont relativement constantes au cours du temps. Par contre, ce n'est pas le cas du contenu en vapeur d'eau et en aérosols. Holben (1986) a estimé, à l'aide de simulations, que des contenus moyens en eau de l'atmosphère (2 à 5 g cm^{-2}) entrainent une baisse de 0.02 unités du NDVI (fig. 3.4). Pour ce qui concerne les aérosols, il a obtenu des diminutions pouvant aller jusqu'à 0.16 unités en NDVI pour une variation d'épaisseur optique due aux aérosols de 0.5 et pour un angle de visé de 45° (fig. 3.5). Récemment, certains auteurs ont proposé des modèles de correction atmosphérique prenant en compte l'influence de la vapeur d'eau et des aérosols (Rahman et Dedieu, soumis). Les contenus en vapeur d'eau sont extraits de données climatologiques. Cependant, il faut souligner que les connaissances sur la variabilité spatio temporelle de ces constituants sont encore très faibles.

3.23) La géométrie de la mesure

Les satellites NOAA/AVHRR ont été créés pour pouvoir permettre une couverture globale quotidienne. Actuellement, ceci n'est techniquement possible que si le capteur possède un large angle d'ouverture. Ainsi, les instruments NOAA/AVHRR ont une ouverture de ±55° et la majorité des enregistrements effectués sur une zone seront faits en visée hors nadir. Avec ces caractéristiques d'ouverture, la résolution au sol (taille du pixel) varie de 1.1 km x 1.1 km au nadir à 2.4 km x 6.5 km à 55° ce qui pose, lors des passages successifs, des problèmes de redondance et de recouvrement de l'information. Eu égard aux caractéristiques orbitales des satellites NOAA/AVHRR, on assiste à une répétitivité des conditions d'angle de visée selon un

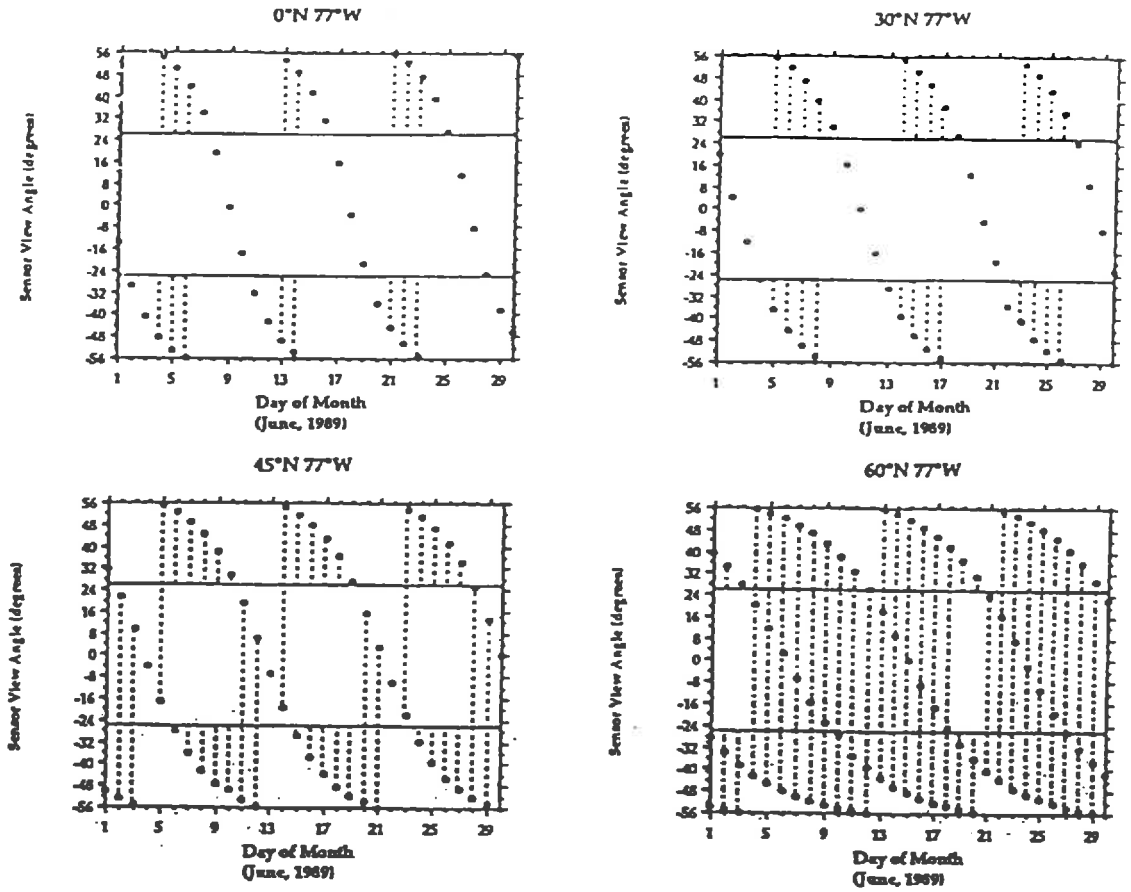


Figure 3.6 : Variation journalière de l'angle zénithal de visée pour le satellite NOAA-9 à 0°, 30°, 45° et 60° de latitude nord.
Les lignes pointillées verticales indiquent les jours où plus d'une prise de vue est effectuée par le satellite.

d'après Goward *et al.* , (1991).

cycle de 9 jours. Pour NOAA 9, lorsque l'on se situe à l'équateur, sur ces 9 jours, seuls 3 offriront un angle de visée inférieur à 30°. Plus on s'éloigne de l'équateur, plus cette proportion augmente (fig. 3.6).

Si la dépendance des valeurs enregistrées vis à vis de la condition de la mesure est indéniable, sa prise en compte pour la correction est très difficile. En effet, s'il est possible d'obtenir l'angle de visée du capteur ainsi que l'angle zénithal solaire au moment de l'enregistrement, il est impossible de connaître les caractéristiques géométriques des objets situés à la surface du sol tant leurs variations spatiales sont importantes.

Enfin, une autre conséquence inhérente aux distorsions complexes entraînées par la prise de vues à grand champ d'ouverture combinée à la rotation et la rotondité de la terre, est le problème de navigation. Ainsi, la taille variable des pixels selon l'angle de prise de vue limite les possibilités de prise de point de repères particuliers permettant de recaler les images les unes entres elles. Des décalages compris entre 5 et 10 km sont généralement avancés. Lorsque la prise de points d'amer est possible (généralement grâce aux traits de côtes) cette erreur peut être limitée à 1 à 1.5 km (Emery *et al.*, 1989).

3.24) La présence de nuages.

Chaque jour environ 50 % de la surface du globe est recouverte par des nuages. Dans certaines régions, ces nuages peuvent stagner pendant des périodes largement supérieures à une semaine (forêts denses, régions tempérées l'hiver,...). Goward *et al.* (1991), dans une étude menée au Kansas en 1987, ont observé en juin, une période de 26 jours sans que le recouvrement nuageux soit inférieur à 35 %. Dans une large gamme de longueurs d'ondes et en particulier dans le domaine du visible, la présence de nuages masque entièrement l'information en provenance du sol. Différentes techniques ont été développées pour éliminer les pixels contaminés. Elles reposent sur l'utilisation de l'information fournie par les enregistrements effectués dans les canaux infrarouge thermiques et l'établissement de synthèses hebdomadaires (Holben, 1986 ; Gutman *et al.*, 1987). Cependant, l'ombre portée des nuages, ainsi que certains types de nuages (cirrus), échappent à ces techniques de repérage (Goward *et al.*, 1991).

3.25) L'influence du sol.

Huete *et al.* (1985) dans une étude effectuée sur du coton à l'aide de radiomètres situés au sol, ont montré que le sol présent sous le couvert visé exerce une influence sur la valeur du NDVI pour des recouvrements allant jusqu'à 75 %. Lorsque la couleur du sol est sombre, on observe une baisse de réflectance dans le canal rouge, ce qui conduit à une augmentation de la valeur de NDVI. Pour une parcelle de coton, Huete (1989) a observé un NDVI identique entre une parcelle à sol sombre présentant une biomasse herbacée de 320 kg ha^{-1} et une parcelle à sol clair où la biomasse mesurée était de 1000 kg ha^{-1}. L'augmentation de l'humidité, de la rugosité et la quantité de matière organique entraîne un assombrissement du sol et, par voie de

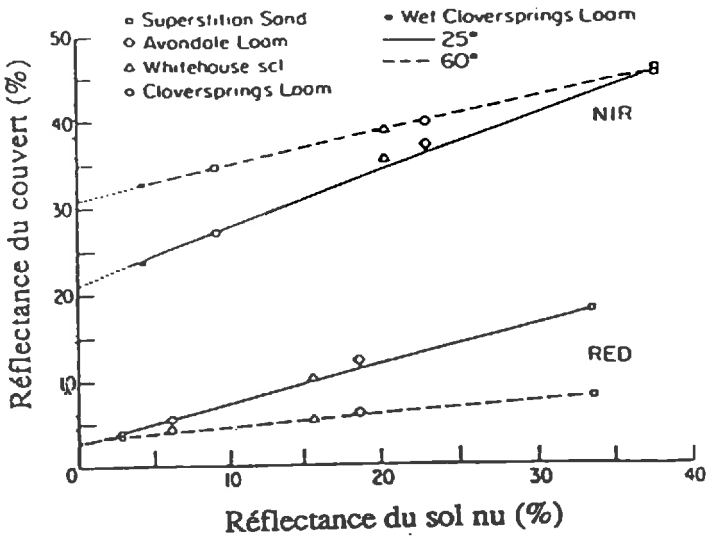


Figure 3.7 : Réflectances dans le rouge et le proche infrarouge d'un couvert de coton, dont le taux de recouvrement est de 40%, en fonction de la réflectance de différents sols nus pour deux angles de visée.

d'après Huete, (1987).

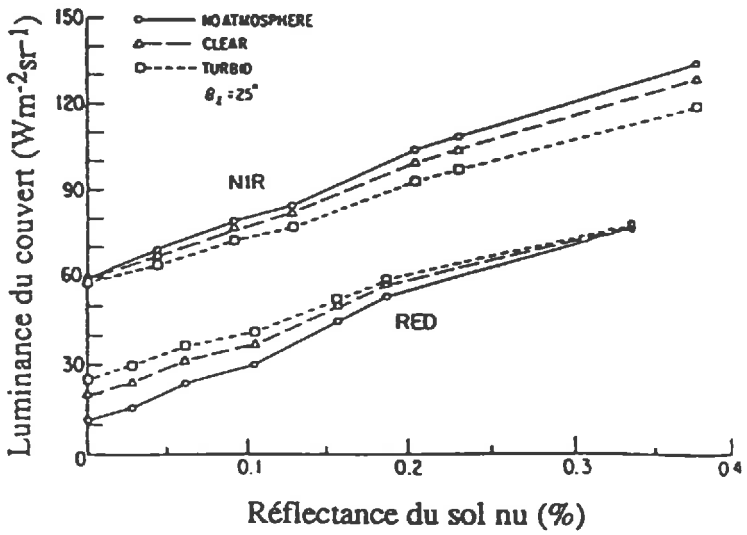


Figure 3.8 : Valeurs de luminance dans le rouge et le proche infrarouge d'un couvert de coton, dont le taux de recouvrement est de 40%, en fonction de la réflectance du sol nu pour différentes conditions atmosphériques.

d'après Huete, (1987).

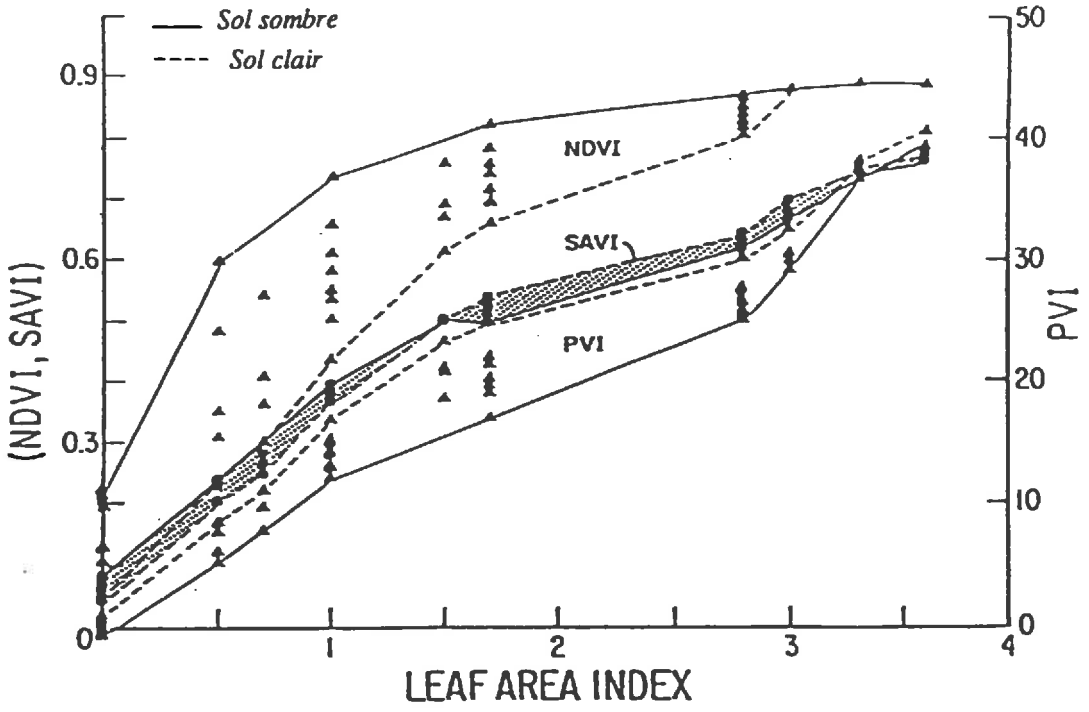


Figure 3.9 : Relation entre différents indices de végétation (SAVI, NDVI, PVI) et le Leaf Area Index d'une culture de coton.

d'après Huete, (1988).

conséquence, une baisse des valeurs de réflectance du sol. L'influence d'autres éléments perturbateurs va également dépendre du type de sol. Ainsi, la réflectance dans le canal rouge varie peu en fonction de l'angle solaire lorsque le sol est sombre. Il varie par contre fortement dans le canal proche infrarouge. Pour les sols clairs le phénomène inverse est observé (fig. 3.7). Lorsque l'on observe l'influence de la turbidité de l'atmosphère, on assiste à une réponse inverse à celle observée pour les effets d'angle solaire (fig. 3.8).

Plusieurs auteurs ont proposé de nouveaux indices destinés à réduire l'influence de la réflectance des sols sur la réponse de la végétation. Parmi ceux-ci, citons principalement, le Perpendicular Vegetation Index (PVI; Richardson et Wiegand, 1977), le Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI; Huete,1988). Ces différents indices apportent une amélioration sensible de la discrimination de la végétation et en particulier de paramètres tels que l'indice foliaire LAI (fig. 3.9). Cependant, ces différents indices font intervenir dans leur formulation un ou plusieurs paramètres nécessitant une **connaissance *a priori*** sur le type de sol présent sous la végétation observée. Ainsi dans le SAVI,

$$SAVI = \left(\frac{PIR - R}{PIR + R + 0.5} \right) * 1.5$$

les valeurs 0.5 et 1.5 ont été calibrées à partir d'expérimentations effectuées sur des cultures de cotons plantées sur des sols de couleur et d'humidité différentes (Huete, 1988). L'utilisation de tels indices pour cette étude n'a pas été possible, car il n'existe pas suffisamment de données ou de cartographies permettant d'avoir une connaissance *a priori* des sols sur l'ensemble de la zone d'étude.

3.26) Problèmes techniques, création d'Indices Globaux de Végétation (GVI).

Les satellites sont équipés d'un système de télécommunication qui leur permet d'acheminer les enregistrements au sol. L'émission est reçue par des stations de reception au sol. Cependant, pour certaines parties d'orbites, le satellite ne se trouve pas en vue d'une station de réception. Pendant ces périodes, les données sont enregistrées sur une mémoire embarquée à bord du satellite. Ces données seront ensuite émises lorsque le satellite entrera en vue d'une station. Pour des raisons de limitations de capacité de stockage des données par le satellite NOAA/AVHRR, les observations ne sont pas transmises avec la résolution nominale de 1.1 km encore appelée **Local Area Coverage (LAC)**. Un échantillonnage des données est effectué à bord du satellite afin de limiter le volume d'information à mémoriser. Il consiste en la sélection, toutes les trois lignes, des quatre premiers pixels sur cinq. La valeur moyenne de ces quatre pixels est ensuite étendue aux 5 x 3 pixels formant ainsi un unique pixel appelé **Global Area Coverage (GAC)** (fig. 3.10).

A la NOAA, un traitement des données est effectué, qui est destiné à éliminer sinon à réduire le nombre de pixels contaminés par la présence de nuages. Ainsi, sur une période de 7 jours seul le pixel GAC présentant la plus forte valeur de NDVI sera retenu. En considérant le fait que les valeurs de NDVI sont plus fortes lorsque l'atmosphère est claire, que la visée est

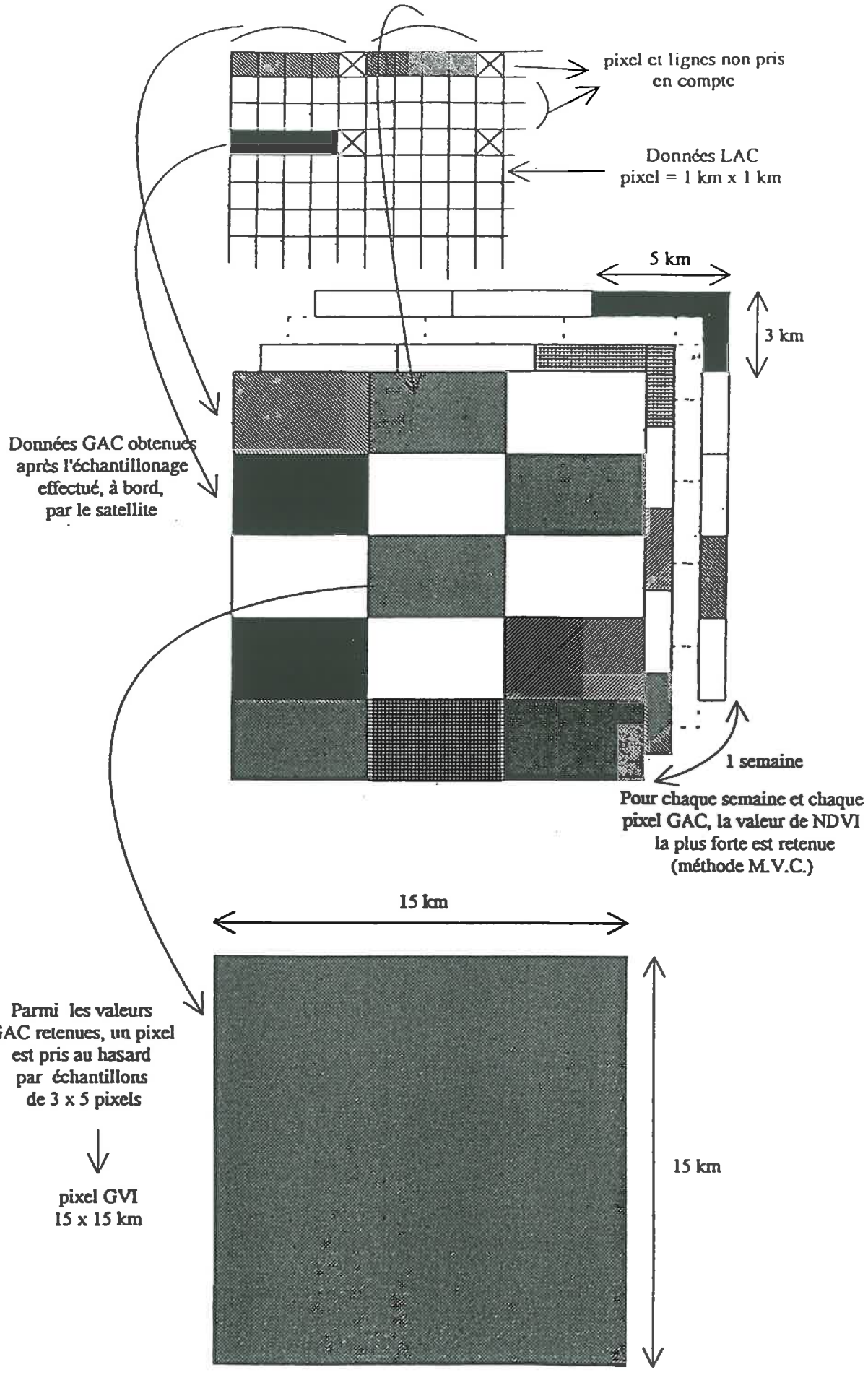


Figure 3.10 : Constitution des données Global Vegetation Index (GVI).

proche du nadir (la couche atmosphèrique traversée est minimale, l'influence de l'atmosphère est donc moindre), cette démarche, appelée **Maximum Value Composite** (MVC), conduit indirectement à une réduction du bruit entraîné par les différents effets perturbateurs énoncés jusqu'à présent (Holben, 1986).

Enfin, même sous la forme de données GAC, la quantité de données à archiver au sol constitue encore un volume trop considérable. La NOAA procède donc à un deuxième sous échantillonnage qui aboutit à la synthèse des données **Global Vegetation Index (GVI)**. Cet échantillonnage consiste, pour un jeu de 3 x 5 pixels GAC issus de la méthode MVC, de n'en retenir qu'un pris au hasard parmi ces 15 et à étendre sa valeur à tous les autres (fig. 3.10). Ainsi, 15 pixels sont réduits à un seul pixel GVI. En projection stéréopolaire, la taille des pixels varie de 13 x 13 Km à l'équateur à 26 x 26 Km aux pôles (Kidwell, 1990).

C'est à ce stade de traitement que les données satellitaires ont été fournies par la NOAA. Elles consistent en images globales hebdomadaires d'Indices Globaux de Végétation transformées en une projection "longitude-latitude plate carrée". Dans cette projection, la taille des pixels prend une valeur constante de 15 x 15 Km.

3.3) Données satellitaires utilisables dans le modèle de Monteith.

De nombreux travaux ont permis de montrer l'existence de corrélations plus ou moins fortes entre le NDVI et des paramètres d'état du couvert tels que le L.A.I. (Holben *et al.*, 1980 ; Asrar *et al.*, 1984) ou la biomasse aérienne (Tucker *et al.*, 1981 ; Tucker *et al.*, 1985 ; Diallo *et al.*, 1991 ; Prince, 1991 ; Wylie *et al.*, 1991). Pour tous ces travaux, il s'est agi d'établissement de relations statistiques entre le NDVI et l'indice foliaire (LAI) ou entre le cumul de NDVI et la biomasse. L'équation de la régression obtenue est généralement spécifique du site ou de l'espèce pour lequel elle a été établie et est très peu extrapolable. De plus, Sellers (1985) a montré à l'aide d'un modèle de transfert radiatif dans un couvert, que le NDVI devient insensible à l'estimation du LAI et/ou de la biomasse lorsque :

- le L.A.I. devient supérieur à 2 ou 3 ;
- lorsque le sol intervient fortement dans la réponse radiométrique de la surface observée (L.A.I. faible) ;
- lorsqu'une quantité importante de matière végétale morte existe dans le couvert ;
- et enfin, lorsque l'architecture foliaire n'est pas connue et que l'angle zénithal solaire est proche du nadir.

Quand on s'intéresse non plus à des paramètres d'état mais à des taux (RPAa) ou à des processus (transpiration, photosynthèse), les phénomènes de saturation interviennent moins rapidement, ce qui laisse envisager des possibilités d'utilisation beaucoup plus étendues (Sellers, 1987).

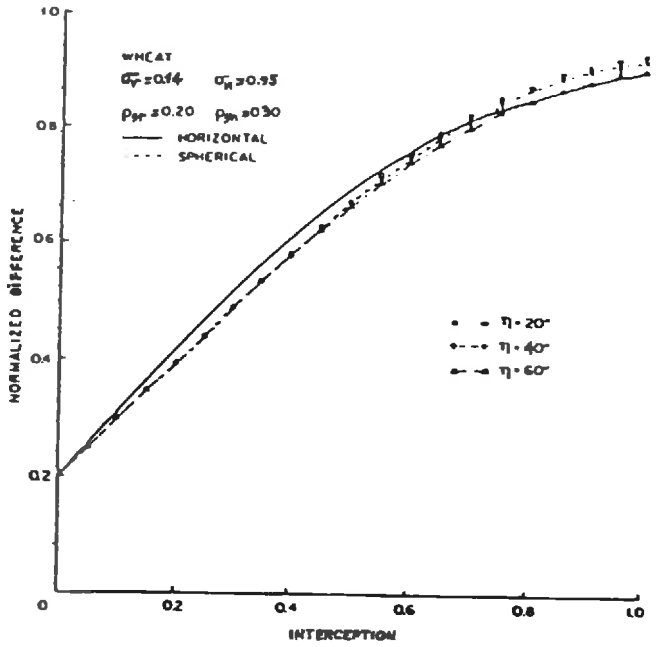


Figure 3.11 : Simulation de la relation entre le NDVI et le pourcentage d'interception du rayonnement photosynthétiquement actif (RPA) pour différentes distributions d'angles foliaires d'un couvert de blé.

d'après Asrar *et al.*, (1984).

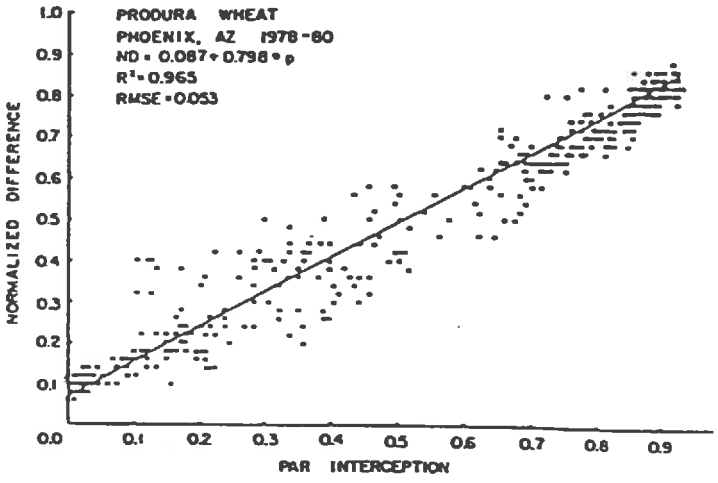


Figure 3.12 : Relation entre le NDVI et le pourcentage d'interception du rayonnement photosynthétiquement actif (RPA) : valeurs mesurées pour plusieurs types de couverts de blé.

d'après Asrar *et al.* , (1984).

3.31) Estimation du Rayonnement Photosynthétiquement Actif intercepté ou absorbé (RPAi ou RPAa).

Comme nous l'avons vu dans le chapitre II (§ 2.32), le RPAa résulte du bilan entre le rayonnement incident, réfléchi par la végétation, réfléchi par le sol, transmis par la végétation. Lors des mesures satellitaires, seule la partie réfléchie par l'ensemble couvert-sol est mesurée. Pour s'affranchir de cette limitation, l'utilisation de combinaisons d'informations enregistrées dans plusieurs régions du spectre électromagnétique a été testée. Ainsi, plus un couvert se développe, plus son absorption dans les longueurs d'onde rouge va augmenter et plus la quantité de rayonnement réfléchi dans le proche infrarouge va augmenter. C'est donc une fois de plus vers des indices tels que le NDVI que l'intérêt s'est porté.

Dans des études théoriques, Asrar *et al.* (1984), Sellers (1985) ont montré que les relations PIR/RPAa ou VIS/RPAa sont dépendantes des conditions d'angle de visée, d'angle zénithal solaire et de l'orientation moyenne des feuilles. Lorsque les canaux sont combinés sous forme de NDVI la relation obtenue est quasi linéaire et la dépendance vis à vis des paramètres cités ci-dessus est fortement atténuée (fig. 3.11).

Expérimentalement, cette linéarité a également été observée par différents auteurs (Asrar *et al.*, 1984 ; Hatfield *et al.*, 1984). On peut remarquer sur la figure (fig. 3.12) qu'il existe une certaine dispersion des points autour de la droite qui peut résulter de changements de conditions atmosphériques et d'angle zénithal solaire. L'influence de parties sèches dans le couvert joue également un rôle dans la dispersion des points. Si des feuilles se dessèchent, l'absorption du rayonnement va diminuer et, par conséquent, l'indice de végétation également. Cependant, pour une surface photosynthétiquement active identique, la valeur de NDVI observée sera différente selon la plus ou moins forte présence de parties mortes dans le couvert. Dans la mesure satellitaire, l'influence des parties mortes est mêlée à d'autres effets perturbateurs tels que celui du sol par exemple. La correction de l'influence des parties sèches n'est pas réalisée actuellement et ne semble pas envisageable sans la possession d'un certains nombre d'éléments tels que le type de végétation observé, le type de sol présent.

Dans les faibles valeurs de NDVI la dispersion s'accentue et est due à l'influence de la réflectance du sol déjà discutée par ailleurs. Malgré ces variations, Asrar *et al.* (1984) ont évalué que cette méthode permettait d'estimer le RPAa avec une précision de $\pm$ 10 %.
Il faut également noter que, bien que la linéarité soit le résultat le plus souvent obtenu, certains auteurs ont publié des résultats légèrement divergents. Par exemple, Gallo *et al.* (1985) ont obtenu, pour du maïs, une relation curvi-linéaire.

3.32) Détermination de la végétation.

Pour fixer de façon correcte les valeurs d'efficience de conversion ε_b dans le modèle de Monteith, il est nécessaire de connaître le type de végétation auquel on a affaire. Les nombreuses mesures radiométriques effectuées en laboratoire ou en champs ont montré que quasiment

chaque espèce végétale possédait une réponse radiométrique bien particulière dans différentes longueurs d'onde. Cette particularité a été définie sous le nom de signature spectrale. Malheureusement, en télédétection actuellement opérationnelle, cette possibilité théorique de reconnaissance des végétaux n'est pas effective. Pour chaque pixel, la valeur de luminance enregistrée est une valeur intégrative de tous les objets présents au sol, sol compris et, de plus, perturbée lors de son trajet au travers de l'atmosphère. Cependant, certains auteurs (Justice *et al.*, 1985 ; Justice *et al.*, 1986 ; Goward *et al.*, 1987b) ont tenté de relier l'évolution temporelle du NDVI à l'évolution saisonnière de la végétation. Pour de nombreuses grandes classes de végétation, de forte corrélations ont été observées. Toutefois, plusieurs problèmes sont apparus. D'une part, différents types de végétation ont présenté des évolutions temporelles de signaux difficilement discernables. D'autre part, dans certaines zones (forêts denses majoritairement), l'évolution du signal est fortement perturbée par la présence prolongée de nuages.

Différents auteurs ont proposé des classifications de la végétation à partir de données satellitaires. Deux démarches principales sont utilisées.

- La première consiste en une classification non supervisée de la végétation en effectuant une classification automatique des évolutions temporelles des indices de végétation (Viovy, 1990). Cette méthode, présente l'avantage de pouvoir générer des cartes quasiment en temps réel. Cependant, pour certaines classes d'évolution du signal générées, on se retrouve confronté aux problèmes décrits ci-dessus.

- La seconde procède par une classification supervisée du signal. Pour une zone géographique déterminée et un type de végétation connu, quelques caractéristiques du signal sont mesurées (NDVI moyen annuel, ecart-type, ...). Ensuite, une extension est faite à toute l'image satellitaire en attribuant à chaque pixel ayant les mêmes caractéristiques, le même type de végétation (Lavenu *et al.*, 1987). Cette démarche souffre d'un besoin de connaissances très précises sur la nature et la répartition géographique de la végétation dans une région donnée. De plus, après extension, un nombre plus ou moins élevé de pixels sont tout de même non classés ou mal classés.

3.33) Estimation du rayonnement global

Les mesures directes de rayonnement global sont effectuées à l'aide de pyranomètres. Cependant, les réseaux de mesure sont généralement peu denses. De plus, les appareils sont rarement intercalibrés entre eux, ce qui rend les mesures peu comparables entre elles. Pour pallier ces problèmes, Dedieu *et al.* (1987b) ont proposé une méthode d'estimation du rayonnement global incident à la surface du sol à l'aide de données enregistrées par le satellite géostationnaire Météosat.

La méthode peut être résumée par la démarche suivante. Dans un premier temps, le rayonnement global incident au sommet de l'atmosphère est calculé à l'aide d'une formule prenant en compte l'angle zénithal solaire et la distance terre-soleil. Ensuite, la quantité d'énergie, réfléchie au sommet de l'atmosphère et mesurée par le satellite, est soustraite. Enfin,

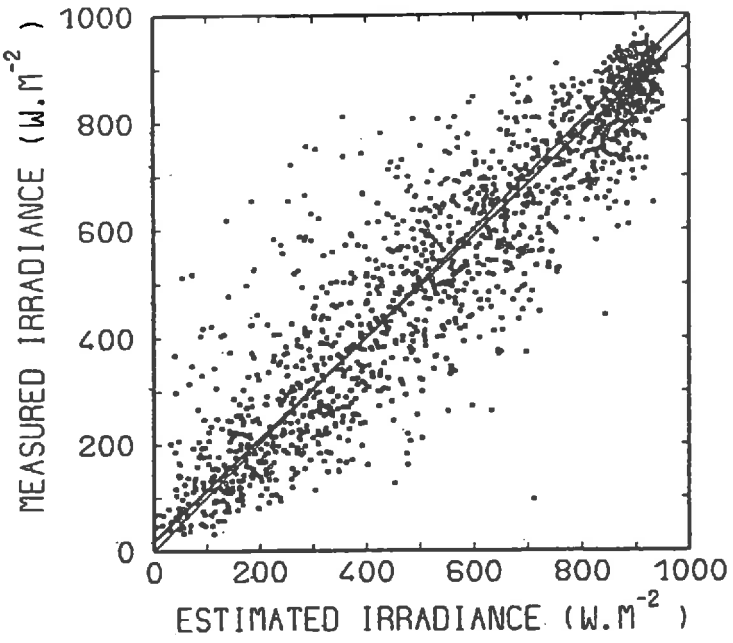


Figure 3.13 : Comparaison entre des mesures horaires (11:00 à 13:00 T.U.) estimées à l'aide d'un pyranomètre et les estimations du rayonnement solaire à l'aide de données satellitaires (n = 1685; r = 0.92; rms = 109 W.m^{-2}).

d'après Dedieu *et al.*, (1987).

les valeurs sont corrigées des effets de la transmission atmosphérique ainsi que de l'albédo de surface. L'albédo est déterminé à partir des données satellitaires. La diffusion de Rayleigh est un phénomène bien maîtrisé et son influence est maintenant calculable de façon relativement précise. La diffusion de Mie a, quant à elle, été estimée en considérant une valeur constante de contenu moyen en aérosols atmosphériques équivalent à une épaisseur optique à 550 nm de 0.23.

L'équation finale utilisée est de la forme :

$$Rg_O = I_O.d^{-2}.\cos(\theta s).T(\theta s).(1-A)/(1-As),$$

où: Rg_O = rayonnement global incident à la surface du sol,

I_O = constante solaire,

d = distance terre-soleil/distance terre-soleil moyenne,

θs = angle zénithal solaire,

$T(\theta s)$ = facteur de transmission en ciel clair prenant en compte l'absorption gazeuse, la diffusion de Mie et de Rayleigh,

A= albédo planétaire dérivé des mesures satellitaires,

As = albédo de surface, considéré comme étant égal à la valeur d'albédo la plus basse enregistrée par le satellite sur une période suffisamment longue pour que la probabilité d'avoir un jour sans nuage soit forte.

La figure 3.13 montre les erreurs rms (root means square) obtenues lors de comparaisons entre des valeurs horaires estimées par la méthode satellitaire et des mesures radiométriques. Les résultats sont donnés pour des mesures de rayonnement effectuées entre 11 heures et 13 heures. Pour toutes les données, une erreur rms de 109 Wm^{-2} a été observée, *i.e.* 19.5 % de la valeur moyenne de rayonnement global (560 Wm^{-2}). Plus la couverture nuageuse est forte, plus l'erreur rms obtenue est élevée. Lorsque les valeurs de rayonnement sont moyennées sur un mois, l'erreur rms n'est plus que de 36.7 Wm^{-2}, soit 6.4 % de la moyenne en valeur relative (Dedieu *et al.*, 1987b). Les valeurs de rayonnement obtenues dans ces travaux sont élevées ($\equiv$600 Wm^{-2}) car elles ne concernent que des mesures effectuées entre 11 et 13 heures T.U. pour les mois de mars, mai et juillet 1979. Lorsque les valeurs sont intégrées sur la journée entière, les moyennes estimées sont nettement inférieures. Ainsi, à l'aide de la même méthode, Dedieu *et al.* (1987a) ont obtenu, pour l'ensemble de l'Afrique, des valeurs moyennes mensuelles pour les mois de janvier 1985 et 1986 varaiant entre 150 et 300 Wm^{-2}. Il faut cependant noter que l'intégration des mesures sur un pas de temps journalier ne change rien quant au niveau d'erreur fourni précedemment sur l'estimation du rayonnement.

CHAPITRE IV

DESCRIPTION DU MILIEU D'ETUDE

CHAPITRE IV

DESCRIPTION DU MILIEU D'ETUDE

4.1) Choix du milieu d'étude

La principale motivation qui a conduit à retenir l'Afrique de l'ouest comme région d'étude est "l'apparente simplicité" dans la répartition des grandes formations végétales qui la recouvrent. En effet, la conjonction particulière de la géomorphologie et du climat général est à l'origine d'une distribution de la végétation en larges bandes orientées parallèlement au Golfe de Guinée. De plus, il s'agit d'une région où les connaissances sur la structure, la composition floristique et également quelques données de productions et de biomasses sont disponibles pour ce qui concerne la végétation naturelle. Les formations savanicoles qui recouvrent majoritairement l'Afrique de l'ouest constituent une zone de transition entre des régions tropicales humides et des régions désertiques. L'intérêt pour l'étude de zones de transition est de plus en plus marqué au niveau de la communauté scientifique internationale. En effet, elles représentent une base de réflexion importante pour l'étude des modifications de la végétation en réponse à des changements climatiques.

4.2) Déterminisme du climat

L'Afrique de l'ouest est soumise à l'influence de deux grandes masses d'air :

- L'alizé boréal, qui apporte par le nord-est un air chaud et sec, souvent chargé de poussières. Il est plus communément appelé vent d'**Harmattan.**

- L'**alizé austral**, qui amène par le sud-ouest un air chaud et humide (mousson).

La surface de contact entre ces deux masses d'air forme une discontinuité que l'on appelle "zone de convergence intertropicale" (ZCIT) ou "**front intertropical**" (**FIT**). Des variations de pression atmosphérique, dépendant plus ou moins directement du mouvement du soleil apparent, vont être responsables du déplacement des masses d'air et donc du FIT au cours de l'année. La trace au sol du FIT occupe sa position extrême sud (0°-5° lat. nord) en décembre-janvier et sa position extrême nord (20°-25° lat. nord) en juillet-août. Il faut environ six mois au FIT pour effectuer sa migration sud-nord et seulement quatre mois pour revenir à sa position initiale (Fig 4.1).

4.3) Les grands types de climats

Il ressort de ce qui précède que chaque région de l'Afrique de l'ouest connaît selon sa position géographique une succession particulière de différents types de temps. Ainsi, Aubréville (cité par Schnell, 1976) a défini différents bioclimats en tenant compte principalement de la

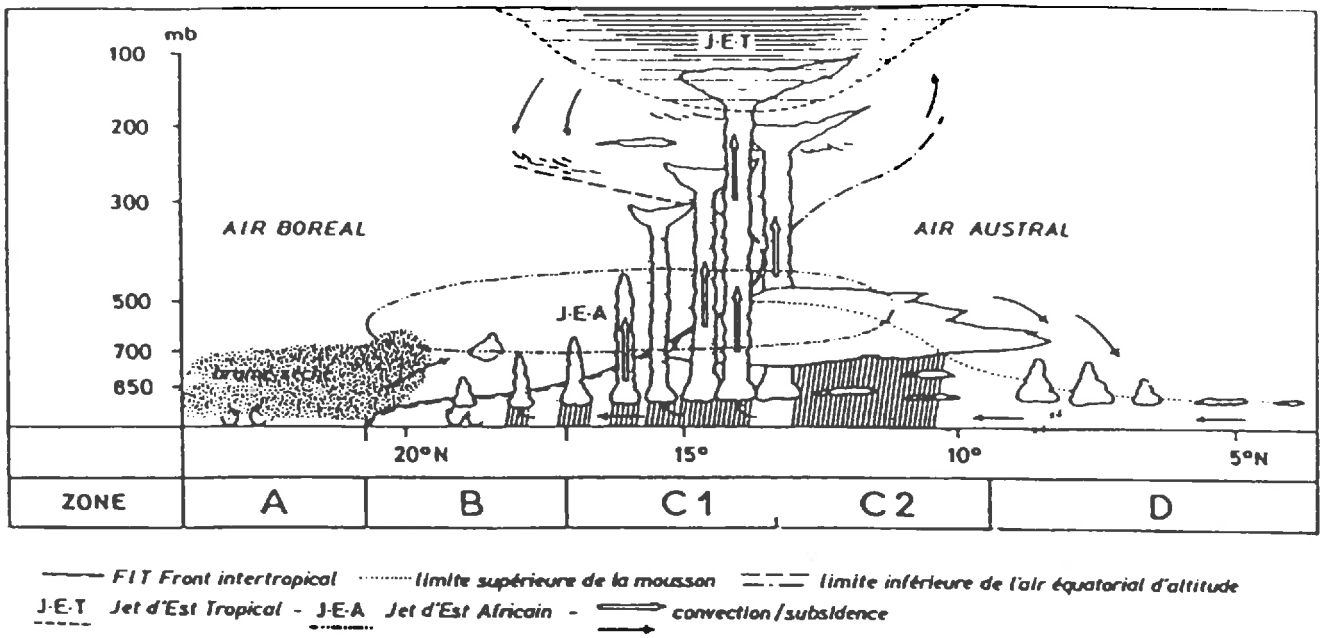


Figure 4.1a :

Coupe schématique de la troposphère ouest africaine en Août le long du méridien O°

D'après Dhonneur (1974); Leroux (1972), Burpée (1972)

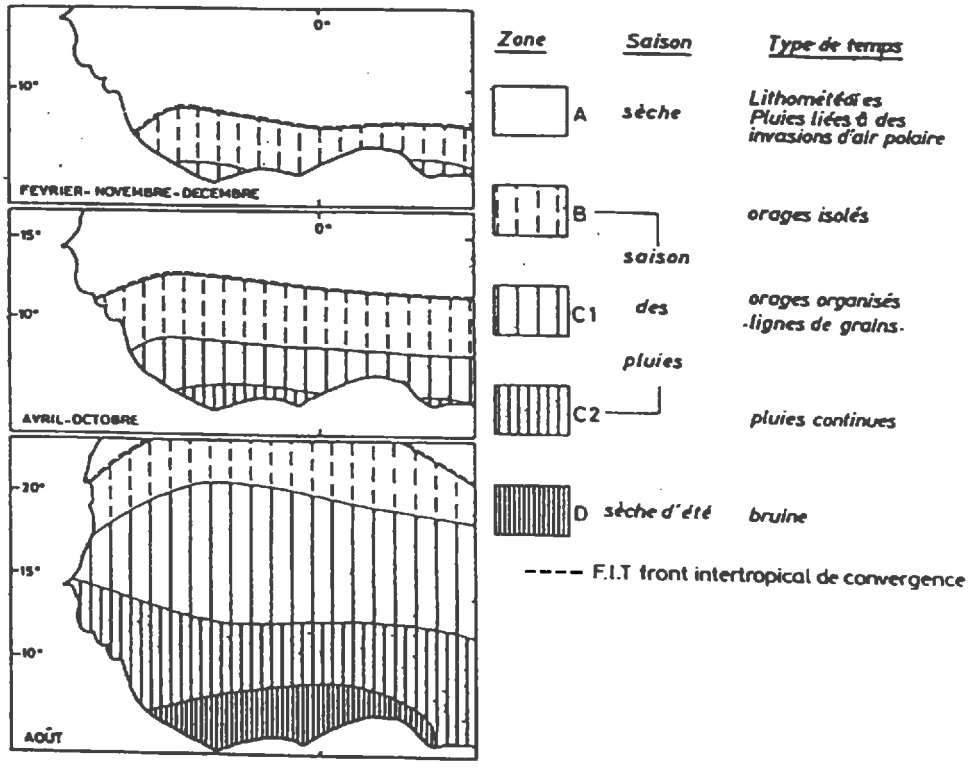


Figure 4.1b :

Positions moyennes mensuelles des zones climatiques et succession moyenne des types de temps associes

D'après Leroux (1972)

pluviosité annuelle et du nombre de mois secs dans l'année. Pour l'Afrique de l'ouest, cinq types ont été identifiés.

- Le climat guinéen (tropical humide) caractérisé par quatre saisons : une longue saison des pluies (avril à mi-juillet), une courte saison sèche (mi-juillet à mi-septembre), une courte saison des pluies (mi-septembre à mi-novembre) et enfin une grande saison sèche (décembre à mars).

- Le climat soudano-guinéen (tropical semi-humide) qui ne présente plus que deux saisons : une longue saison sèche (novembre à mai) et une longue saison humide (juin à octobre). En réalité, on observe un gradient en fonction de la latitude. Plus on se déplace vers le nord, plus la durée de la saison sèche augmente.

- Le climat sahélo-soudanais (tropical sec). La durée de la saison sèche y varie entre 6 à 7 mois au sud jusqu'à 9 mois au nord.

- Le climat sahélo-saharien (climat subdésertique). La pluviométrie est comprise entre 200 et 400 mm et la saison des pluies est inférieure à 3 mois.

- Le climat saharien (climat désertique). Les chutes de pluies sont occasionnelles (pluviométrie annuelle < 200 mm).

4.4) Les sols

La plupart des sols d'Afrique de l'ouest sont formés sur de larges surfaces sub-horizontales résultant de la pénéplanation depuis des millions d'années des roches cristallines primaires. La plupart des sols d'Afrique de l'ouest ont atteint le stade ultime de leur pédogenèse. L'eau, dont le pouvoir dissolvant est accru par les températures élevées, appauvrit par lessivage les sols de la plupart de leurs sels. Ceux-ci sont déposés en profondeur ou ramenés à la surface par la remontée capillaire pendant les périodes sèches. Au lessivage, s'ajoute l'effet des fortes évaporations. La déshydratation est ainsi responsable de la coloration rouge de beaucoup de sols par dépôts d'oxydes ferriques. Elle est également à l'origine de la destruction rapide de l'humus et des complexes colloïdaux rendant les sols très peu fertiles (Isnard, 1974). Du point de vue physico-chimique, les sols ont tendance à s'acidifier avec l'augmentation de la pluviométrie. Le taux de matière organique décroît avec l'aridité croissante (Charreau, 1974). Le long d'un transect sud-nord passant par la Côte d'Ivoire et le Burkina Faso, on assiste tout d'abord à une couverture quasi totale de la Côte d'Ivoire par des sols ferralitiques. Certains auteurs (Perraud, 1971 ; Vennetier *et al.*, 1978) y distinguent trois groupes selon le degré de lessivage. En passant au Burkina Faso, les sols présentent une distribution en mosaïque dans laquelle deux types prédominent :

- des sols ferrugineux lessivés et peu lessivés sur matériaux sableux et sablo-argileux,
- des sols peu évolués sur matériaux gravillonnaires (Peron *et al.*, 1975).

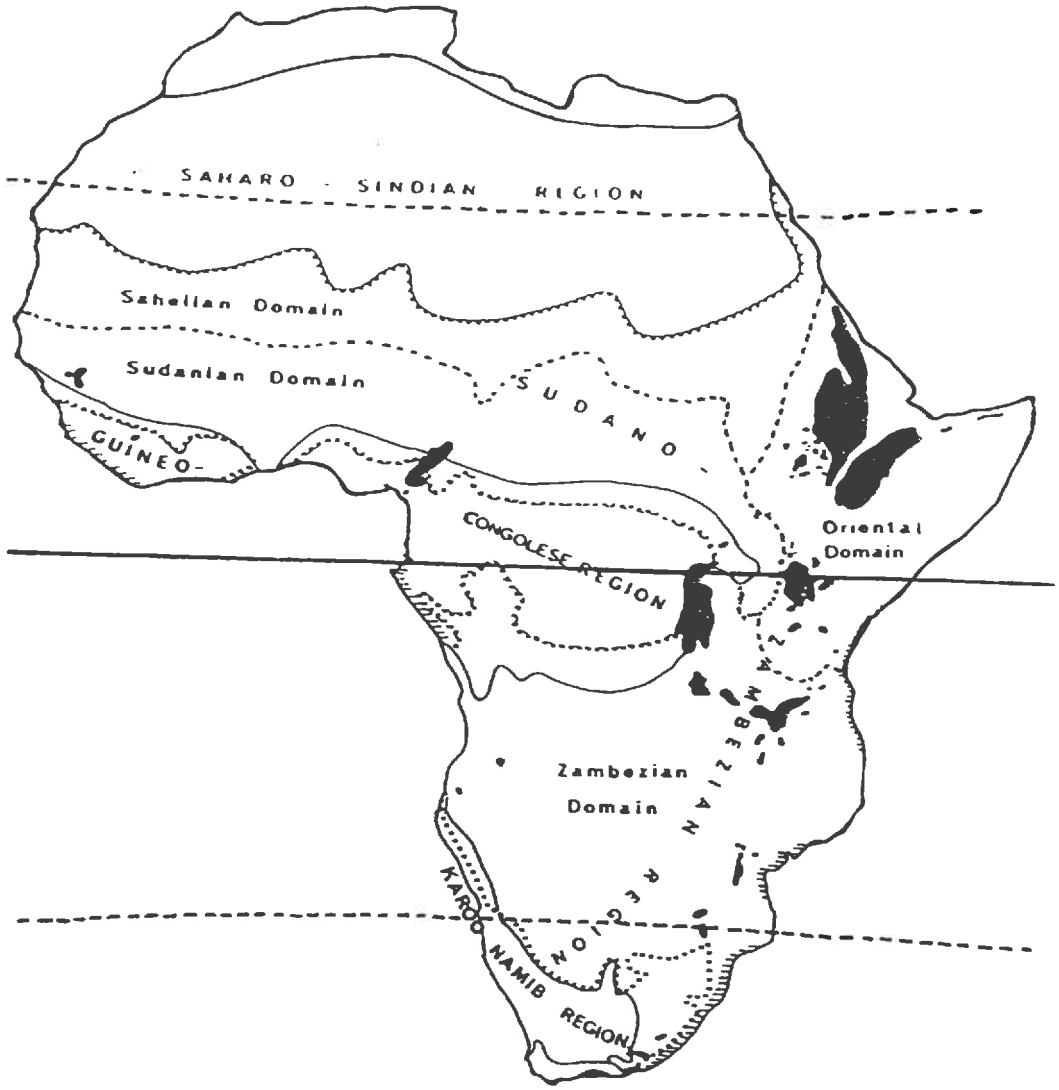


Figure 4.2 : Les unités phytochorologiques de l'Afrique. Les communautés de montagne et afro-alpines sont figurées en noir. Les limites des biomes savanicoles sont figurées en lignes épaisses et pointillées.

D'après Monod (1957), Troupin (1966), White (1971), Wickens (1976).

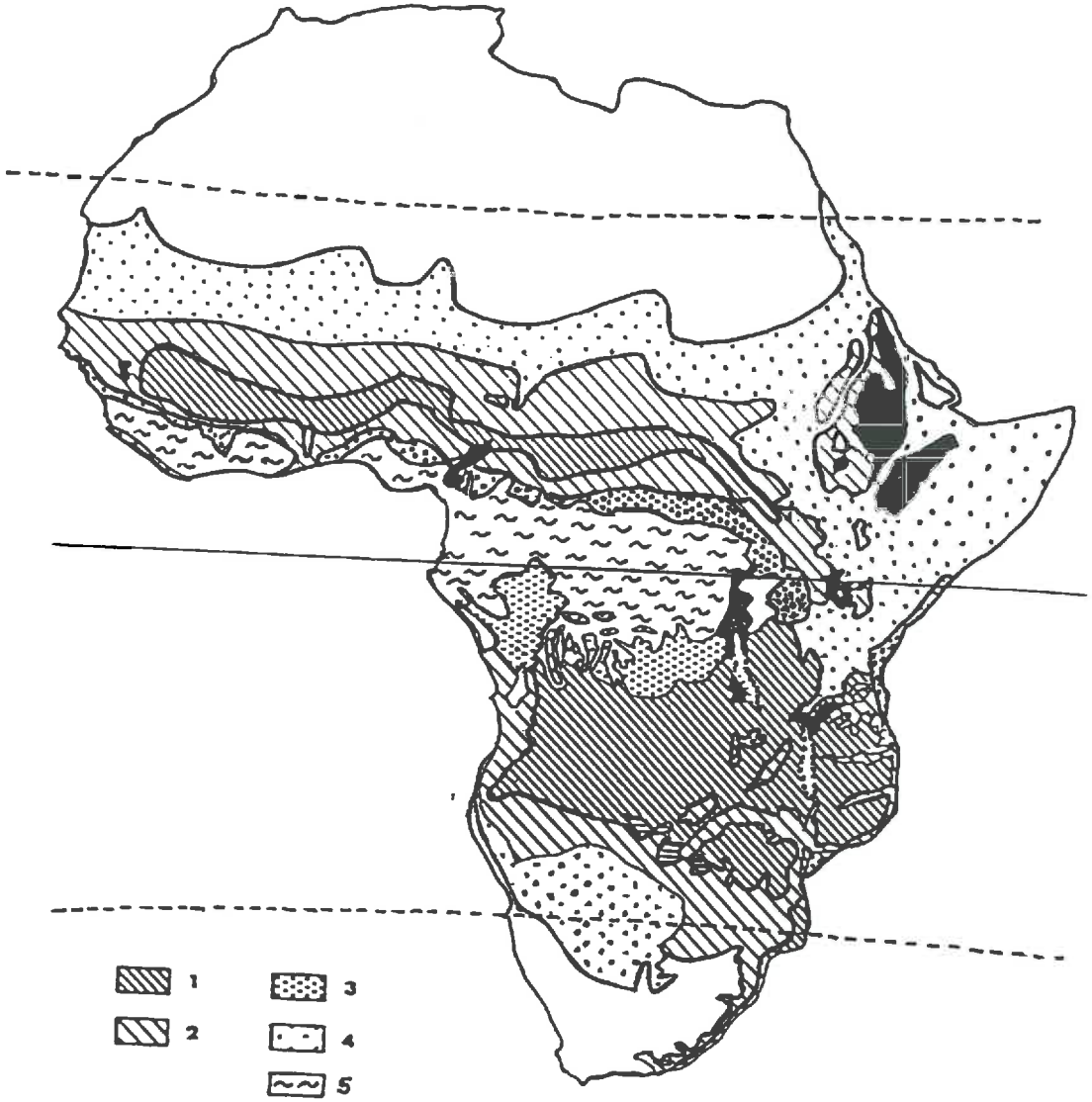


Figure 4.3 : Les principaux types de végétation de l'Afrique tropicale :
1 = forêts claires, 2 = savanes arborées et arbustives, 3 = mosaïques de forêts et de savanes, 4 = steppes arborées et arbustives, 5 = forêts denses. Les formations de montagne sont figurées en noir.

D'après Keay (1959).

4.5) Les grands types de formations végétales

De la combinaison des caractéristiques des sols et du climat résultent les conditions dans lesquelles se constituent les paysages botaniques. Il n'est donc pas surprenant d'observer une distribution zonale de la végétation en Afrique de l'ouest. Sur cette base climatique, accompagnée de critères floristiques, certains auteurs ont divisé la végétation de l'Afrique de l'ouest en différents domaines (Monod, 1957; Guillaumet et Adjanohoun, 1971). Pour l'Afrique, la nomenclature généralement admise par la communauté scientifique a été définie par de nombreux biogéographes au colloque de Yangambi (Anonymous, 1956). La base de classification des formations végétales est principalement physionomique. La description qui va être faite des principaux types de végétation de l'Afrique de l'ouest utilisera les deux classifications citées ci-dessus car elles permettront à la fois de définir la physionomie de ces formations ainsi que leur domaine d'extension climatique (fig. 4.2 et 4.3).

4.51) Le domaine guinéen

4.51a) Secteur ombrophile

La pluviométrie annuelle est supérieure à 1500 mm. La forêt dense humide constitue le stade climacique de la végétation. Elle est constituée d'arbres dont certains peuvent dépasser 40 mètres de haut. La canopée est entièrement fermée et empêche tout développement d'un tapis herbacé. Pour ce type de formation, des valeurs de PPN aériennes variant de 10 à 35 t MS/ha/an sont fournies par Lieth et Wittaker (1975). Bernhard-Reversat *et al.* (1978) ont mesuré une valeur de 17 t MS aérienne/ha/an dans une forêt dense située près de Banco en Côte d'Ivoire.

4.51b) Secteur mésophile

Les isohyètes sont grossièrement comprises entre 1600 et 1200 mm. La formation végétale caractéristique est la forêt dense humide semi-décidue. De nombreux arbres qui la composent perdent la majeure partie de leurs feuilles durant la saison sèche. La production primaire nette aérienne est estimée entre 10 et 25 t MS/ha/an (Lieth et Wittaker, 1975). Il est à noter que de nombreuses enclaves savanicoles occupent également ce secteur. Elles constituent des clairières couvertes par de hautes herbes.

4.51c) District préforestier

Il est caractérisé par de grandes étendues de savanes avec, ça et là, des bribes de forêts mésophiles et de forêts galeries (systèmes forestiers denses situés le long de cours d'eau ou autour de points d'eau). Bien que la définition exacte du terme savane soit très controversée, nous choisirons la définition retenue lors du colloque de Yangambi.

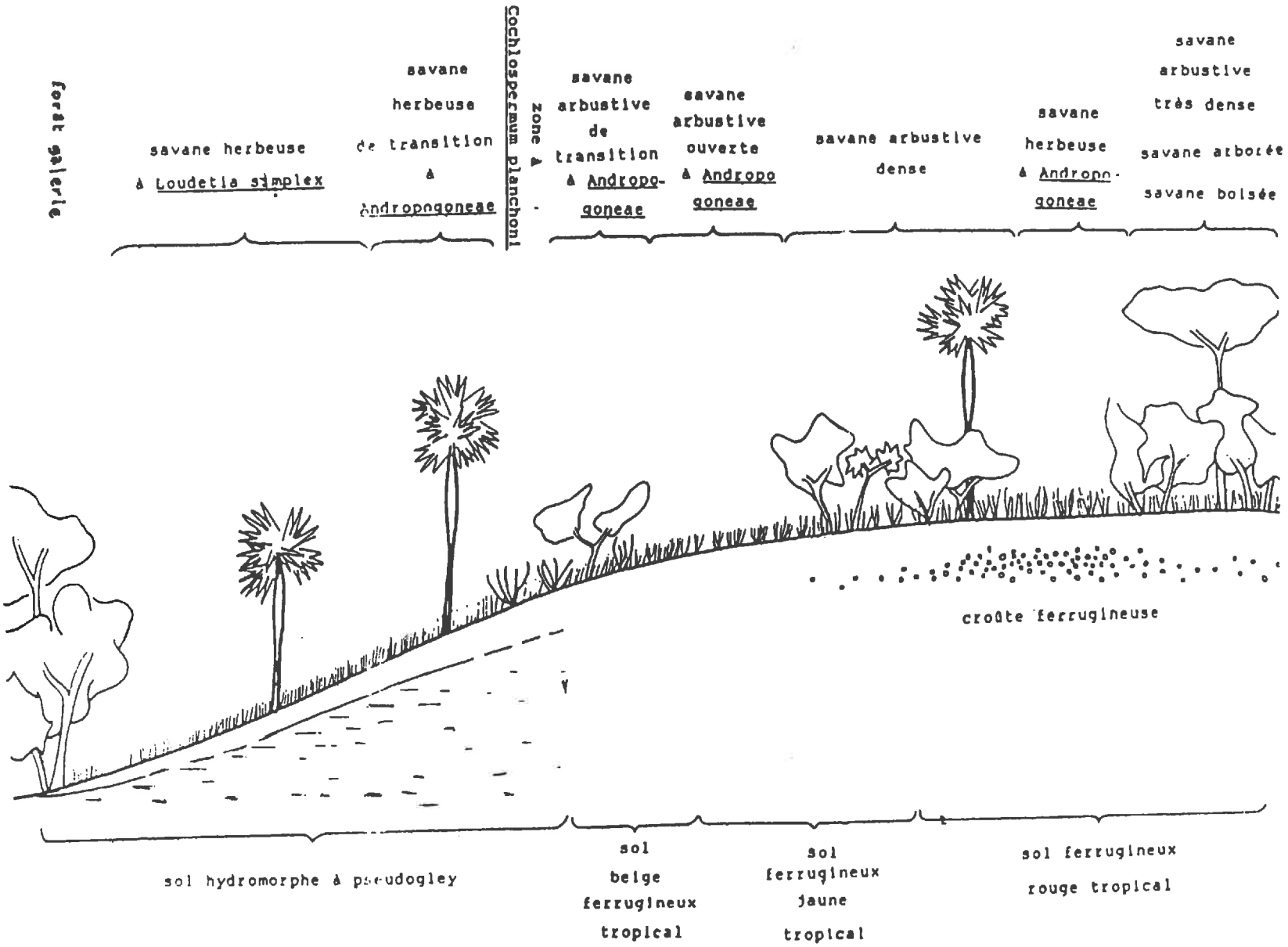


Figure 4.4 :
Distribution des principaux types de savanes le long d'une catena schématique en zone guinéenne.

Ainsi, **la savane est définie comme une formation d'herbacées formant un tapis continu. Les herbes les plus hautes mesurent au moins 80 cm. Elles sont principalement constituées de graminées à feuilles planes, basilaires ou caulinaires. Elles sont souvent brûlées annuellement durant la saison sèche. Des ligneux y sont ordinairement présents en plus ou moins forte densité.**

Dans le district préforestier, il est possible de distinguer trois types de savane en fonction de la position topographique qu'elles occupent (Fig 4.4).

- Sur les plateaux et versants drainés, on observe fréquemment des savanes à Rôniers (*Borassus aethiopum*) et des savanes arbustives (arbres absents, arbustes < 5 m de haut et disséminés).

- Dans les bas-fonds humides se développent des savanes herbeuses (arbres et arbustes ordinairement absents).

- Sur les cuirasses dénudées se trouvent des pelouses rases.

Les espèces herbacées rencontrées dans le domaine guinéen sont presque exclusivement des plantes pérennes hémicryptophytes dont le métabolisme de fixation du CO_2 est de type C4. **Il faut d'ailleurs souligner que, indépendamment du type biologique, les herbacées C4 sont dominantes dans toutes les savanes et les steppes d'Afrique de l'ouest. Les ligneux sont quant à eux de type C3.**

Menaut (1979) a recensé, dans une revue bibliographique, les résultats de quelques travaux concernant la phénologie et la production primaire des savanes. Au Nigeria, sous une pluviométrie annuelle de 1200 mm, des valeurs de phytomasse maximale herbacée aérienne (assimilées à la PPN aérienne) de 19.5 t MS/ha ont été mesurées. Plus au sud, sous 1600 mm pluie/an, des valeurs de 14.8 et 20.8 t MS/ha ont été obtenues. En Côte d'Ivoire, des valeurs de phytomasse totale herbacée (aérienne + souterraine) de 19 t MS/ha sont fournies pour une savane herbeuse et 11 t MS/ha pour une savane arbustive.

L'estimation de la production des ligneux est une opération très difficile à réaliser. Il existe cependant quelques estimations concernant la production de feuilles et parfois de volume de bois. Ainsi, au Nigeria une valeur de 1.2 t MS/ha a été estimée à la chute des feuilles.

4.52) Le domaine soudanais

Du point de vue climatique, ce secteur est défini comme compris entre les isohyètes 1200 et 600 mm. Les formations dominantes sont les forêts claires et les savanes. **La forêt claire est décrite comme étant une forêt ouverte avec une strate arborescente décidue de petite ou moyenne taille (<25m) dont les cimes sont plus ou moins jointives. L'ensemble du couvert reste toujours claire et une strate herbacée y est présente de façon plus ou moins dense.**

Dans ce domaine on y distingue le secteur sub-soudanais au sud, comportant encore des forêts galeries, du secteur soudanais où elles ne se développent plus. Les savanes, quant à elles, sont qualifiées d'herbeuses, arbustives, arborées et boisées en fonction de la densité et de la

hauteur des ligneux existant. Plus on se dirige vers le nord, plus le tapis graminéen s'éclaircit. Les herbacées sont toujours majoritairement constituées de pérennes hémicryptophytes.

Au Nigeria, une valeur de phytomasse aérienne 3.8 t MS/ha a été mesurée. La pluviométrie annuelle était de 1000 mm. Cependant, dans le Serengeti (Kenya) de fortes différences de phytomasse ont été observées en fonction des formations et des années. Dans ce domaine, l'effet de la pluviométrie sur la production devient très dominant. Ainsi, des valeurs dev phytomasse variant entre 0.5 et 11.5 t MS aérienne/ha ont été recensées.

4.53) Le domaine sahélien

La pluviométrie annuelle est comprise entre 600 et 200 mm et la durée de la saison sèche dure entre 8 et 10 mois. Le domaine est divisé en deux secteurs.

4.53a) Secteur sub-sahélien

La végétation et les espèces caractéristiques sont semblables au domaine soudanais. Cependant, l'aridité du climat rend la végétation rabougrie.

4.53b) Secteur sahélien

La végétation typique est la **steppe** arborée ou arbustive essentiellement constituée d'épineux se rabougrissant avec l'aridité croissante. **Les herbacées forment un tapis qui, sauf exception, est discontinu et inférieur à 80 cm de haut. Les feuilles sont généralement étroites, enroulées ou pliées et basilaires. Les feux y sont très rares. Lorsque l'on passe dans le domaine sahélien les thérophytes (annuelles) deviennent assez brusquement le type dominant avec disparition presque totale des hémicryptophytes.** Cette zone de transition se situe aux environs de 10 à 12° de latitude nord. Dans le nord du secteur, apparaissent des formations particulières appelées, de par leur physionomie, brousses tigrées. Il s'agit de fourrés d'arbustes formant des bandes allongées plus ou moins parallèles et alternant avec des plages de sols nus.

Suite à l'implantation de sites d'observation pour le Programme Biologique International (PBI) dans la partie ouest de la zone sahélienne (Sénégal), les données concernant cette région sont relativement importantes. Des valeurs de phytomasse aérienne de 0.5 à 1.5 t MS/ha sont fournies pour des pluviométries annuelles de 300 à 400 mm. Le prélèvement de parties souterraines a conduit à des biomasses souvent deux fois plus fortes que la biomasse aérienne. Les racines sont fortement développées dans les cinq premiers centimètres du sol avec des points additionnels de concentration de biomasse vers 75 cm et parfois même jusqu'à 2 m de profondeur (Menaut, 1979). Au Mali, des valeurs de biomasse aérienne de 1 t MS/ha ont été recensées vers Gao (250 mm pluie/an), 1.5 t MS\ha à Mopti (450 mm/an) and 2 t MS/ha à Niono (500 mm/an).

4.6) Facteurs de variation de la production en Afrique de l'ouest.

Comme tout système végétal naturel, le niveau de productivité des formations savanicoles est difficile à appréhender car il résulte de l'interaction complexe des facteurs climatiques, édaphiques, biotiques (consommations animales) et anthropiques (feux, jachères, élevage). Il est cependant possible de déterminer certaines tendances d'actions induites par quelques facteurs considérés isolément.

4.61) L'énergie incidente

Le tapis herbacé est principalement constitué de plantes pourvues d'un mécanisme photosynthétique de type C4. Ces plantes possèdent un point de saturation en énergie lumineuse élevé, une capacité photosynthétique accrue lorsque la température est élevée et n'ont pas de pertes par photorespiration. Ces plantes sont donc très bien adaptées aux conditions très ensoleillées des régions tropicales. De plus, ces plantes ont développé des structures, des répartitions, des orientations, des surfaces foliaires permettant une interception très efficace du rayonnement solaire incident. Ainsi, la quantité d'énergie incidente ne constitue pas un facteur limitant de la production dans ce type de formation. Par contre, la transformation de l'énergie interceptée en matière organique dépend fortement des caractéristiques propres de chaque espèce et de l'action des facteurs environnementaux.

4.62) La température

La température ne constitue pas un facteur direct de limitation de la production. Par contre, il intervient indirectement en ayant un rôle majeur dans le contrôle du bilan hydrique du sol ainsi que dans la pédogenèse.

4.63) La pluviométrie

Ainsi que nous l'avons vu, la répartition générale de la végétation est principalement guidée par l'action combinée de la pluviométrie et la longueur de la saison sèche. Le niveau de productivité ne peut être directement lié à la pluviométrie que dans les régions arides ou semi-arides. Selon différents auteurs (Talineau, Walter cités par Menaut, 1979), la mise en relation de la productivité avec la pluviométrie devient largement spéculative dès que cette dernière dépasse 400 à 600 mm/an. Il faut rappeler ici, que la formulation de Lieth (1975) est basée sur une relation statistique "PPN/pluviométrie annuelle". On peut entrevoir dès à présent les problèmes d'imprécision que comporte cette démarche dans l'estimation de la PPN pour ces régions.

4.64) L'évapotranspiration

Il est admis que l'utilisation d'un seul facteur climatique ne permet pas de représenter toute la variation de la production primaire. De nombreux auteurs pensent que pour y parvenir, il faut prendre en compte à la fois la température, la pluviométrie et l'ensoleillement. L'évapotranspiration est en processus qui résulte de l'action de ces différents facteurs. Il semble donc représenter le facteur idéal de mise en relation directe avec le niveau de production. Ce fait à d'ailleurs été largement démontré au niveau de systèmes végétaux entièrement contrôlés. En réalité, ce sont plus particulièrement l'évapotranspiration réelle ou le rapport "évapotranspiration réelle/évapotranspiration potentielle" qui sont déterminants. Cependant, en milieu naturel, l'appréhension de tous les éléments nécessaires à l'élaboration de ce rapport est très difficile à réaliser. De plus, même lorsqu'une mesure peut être obtenue au niveau d'une parcelle, sa représentativité spatiale est très faible. Depuis quelques années, l'estimation de l'ETP et de l'ETR est tentée par le biais d'informations satellitaires. Cependant, les résultats actuels sont encore emprunts d'une forte imprécision (Seguin et Itier, 1983).

4.65) Facteurs édaphiques

La bibliographie concernant l'action de facteurs édaphiques sur la productivité de la végétation naturelle est relativement faible. Le long d'une catena située à Lamto (Côte d'Ivoire), il a été observé une augmentation de la production aérienne des savanes en fonction de l'augmentation de la teneur en matière organique et du drainage du sol (César et Menaut, 1974). Ce gain de production était principalement du à une augmentation de la densité des ligneux.

4.66) L'action anthropique

En Afrique de l'ouest, toutes les zones de végétation ont subi d'une manière plus ou moins marquée l'influence de l'homme. De nombreuses surfaces savanicoles ont été défrichées pour y implanter du mil, du coton, du café, du sorgho...Certains arbres sont toutefois préservés pour leur intérêt économique (Karité, Néré). Le pâturage est également un élément marquant de la végétation surtout pour ce qui concerne le domaine sahélien. Lorsque l'élevage devient sédentaire on assiste souvent à des phénomènes de surpâturage qui ont pour conséquence de provoquer le développement de larges zones d'érosion.

Enfin et surtout il faut considérer le passage des feux qui est un phénomène intimement lié aux paysages savanicoles. Certains auteurs pensent que le passage répété et régulier des feux est un facteur de maintien des savanes et ont nommé cet équilibre entre le feu et la végétation "pyroclimax" (Gillon, 1983). Les feux peuvent être déclenchés naturellement par des orages durant la saison sèche. Cependant, ils sont majoritairement allumés par l'homme après le stade de fructification des herbes. Cette démarche à pour objectifs de : nettoyer les abords des villages, supprimer les herbes refusées par le bétail, favoriser le regain des espèces mangées par le bétail.

Elle est surtout pratiquée en zones de savanes. Dans les steppes, la végétation éparse limite énormément la propagation du feu. De plus, le tapis herbacé constitué d'annuelles est très sensible au feu car il détruit une grosse partie du stock de graines.

En zone guinéenne, on assiste à un démarrage de la végétation juste après le passage des feux. Une phytomasse de 1 t MS/ha peut être obtenue en un mois alors que les précipitations sont nulles ou très faibles. En zone soudanaise la situation est différente. Le passage des feux provoque souvent un retard dans le développement de la végétation par rapport aux zones non brûlées (Gillon, 1983).

L'action à long terme du feu sur la productivité des parties aériennes est très difficile à apprécier. Les résultats obtenus sont très contradictoires. En un endroit donné, l'impact du feu semble dépendre de la date à laquelle il a lieu dans la saison sèche ainsi que de la proportion de matière végétale brûlée. De ces mêmes éléments dépendent également la densité des arbres ainsi que la composition floristique des arbres et des herbes.

A l'échelle régionale, la végétation de l'Afrique de l'ouest présente donc une distribution zonale d'apparence simple et homogène. Schématiquement, on voit se succéder du sud au nord : la forêt sempervirente, la forêt semi-décidue, les savanes (arborées, arbustives, herbeuses), les forêts claires, à nouveau des savanes puis les steppes (arborées et arbustives) et enfin le désert. Cette "homogénéité" fait place, à l'échelle locale, à une relativement forte hétérogénéité que se soit pour la production, le type de formation végétale, la densité des arbres, etc. Une catena composée d'un plateau, d'un versant et d'un bas-fond constitue l'échelle typique représentative de toute cette variation (Fig 4.4).

Après ces quatre chapitres de rappels bibliographiques, nous allons maintenant passer à la partie étude *stricto sensu*. L'étape primordiale de traitements effectués sur les données satellitaires sera d'abord présentée. Ensuite, nous passerons à la mise en oeuvre du modèle en exposant la démarche suivie pour adapter le modèle de Monteith à notre cas d'étude. Seront également exposées quelques hypothèses testées pour extraire des données satellitaires des informations concernant des caractéristiques des couverts observés, particulièrement les durées de cycle de végétation et les recouvrements arborés/herbacés. Puis, nous passerons à la présentation des résultats des estimations de valeurs de PPN. Pour aider à commenter ces résultats, des comparaisons seront effectuées avec les données de PPN estimées à l'aide du modèle de Lieth et Whittaker. Enfin, nous conclurons.

CHAPITRE V

PRETRAITEMENT DES DONNEES NOAA/AVHRR

CHAPITRE V

PRÉTRAITEMENT DES DONNEES NOAA/AVHRR

Comme nous l'avons vu dans le chapitre III, de nombreuses études ont été menées à l'aide de données NDVI. Ces données ont majoritairement été utilisées sans corrections et les auteurs font souvent état, dans leur discussion, de limitations d'interprétation des résultats dues aux perturbations contenues dans les mesures. Pour ces raisons, il a été procédé à différents traitements des données satellitaires.

5.1) Type de données.

Les données utilisées sont des images en projection plate carrée (latitude-longitude régulière) "d'Indices Globaux de Végétation" (GVI) fournies par la N.O.A.A. pour la période allant de janvier 1983 à décembre 1991. Rappelons que ces données résultent de synthèses hebdomadaires destinées à limiter le nombre de données perturbées par la présence de nuages (méthode MVC). Elles résultent également d'une suite de sous-échantillonnages ayant pour objet de réduire le volume de données à gérer. Ces traitements conduisent à une taille de pixel d'environ 15 x 15 km. Les données fournies se décomposent en deux parties :

- De janvier 1983 à mars 1985, les données ont uniquement consisté en des valeurs brutes d'indices globaux de végétation ;
- D'avril 1985 à décembre 1991, les enregistrements des canaux "visibles" (R), "proche infrarouge" (PIR) et des deux canaux infrarouge thermiques ainsi que les valeurs d'angles zénithaux solaires et d'angles de visée du satellite ont été fournis. L'apport de ces données, a rendu possible l'étalonnage des canaux R et PIR de même que l'application de corrections atmosphériques ainsi que le seuillage des nuages.

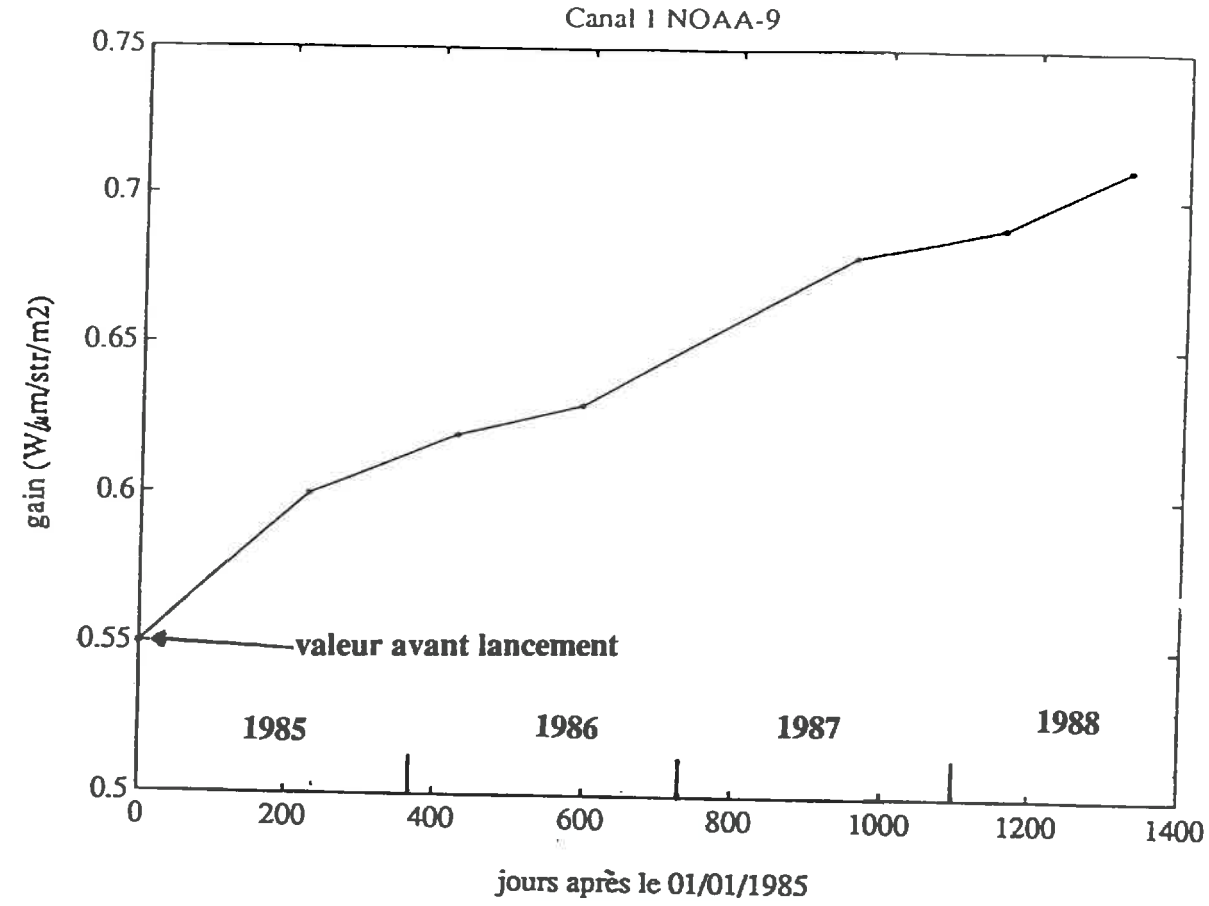
5.2) Etalonnage des données.

Nous avons vu dans le chapitre III qu'il n'existe pas de système d'étalonnage à bord des satellites NOAA/AVHRR pour permettre de corriger la perte de précision des mesures due au vieillissement des capteurs. Plusieurs auteurs ont proposé d'estimer la perte de sensibilité des instruments à l'aide d'un suivi temporel d'une cible naturelle au sol.

Les estimations de Holben *et al.* (1990), de Kaufman and Holben (1990) et de Teillet and Holben (1992) ont été utilisées afin d'étalonner les données. Les figures 5.1 et 5.2 montrent le gain apporté aux enregistrements de chacun des canaux 1 et 2 des satellites NOAA/AVHRR 9 et 11 en fonction du temps. Si les gains déterminés pour le satellite NOAA/AVHRR 9 augmentent bien au cours du temps, ce n'est pas le cas des valeurs estimées pour NOAA 11. Les valeurs ont tendance à présenter une légère décroissance pour ce qui concerne le canal 1. En fait, il est préférable de considérer des valeurs moyennes constantes de gains pour le satellite NOAA 11 car

Figure 5.1 : Gains utilisés pour étalonner les valeurs de réflectance des canaux 1 (visible) et 2 (proche infrarouge) du satellite NOAA-9 AVHRR

d'après les données de Holben *et al.*, (1990)



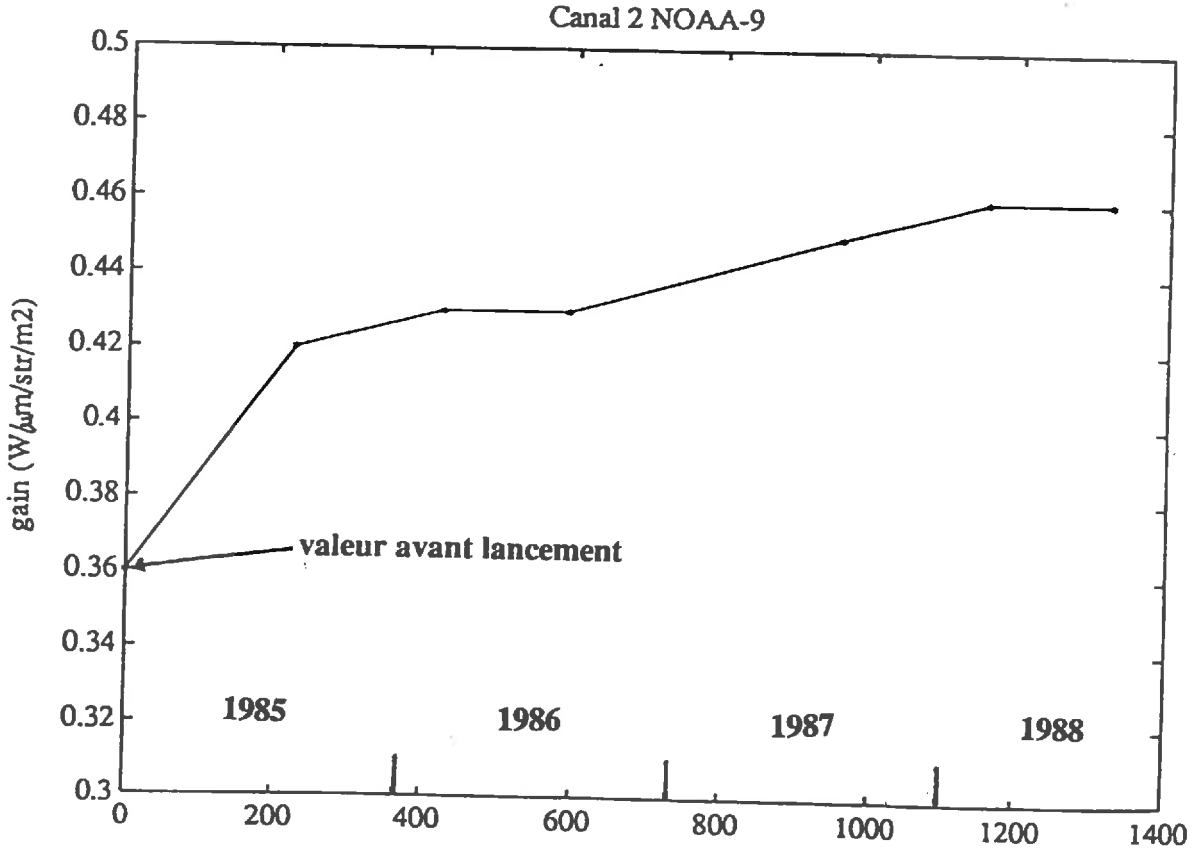
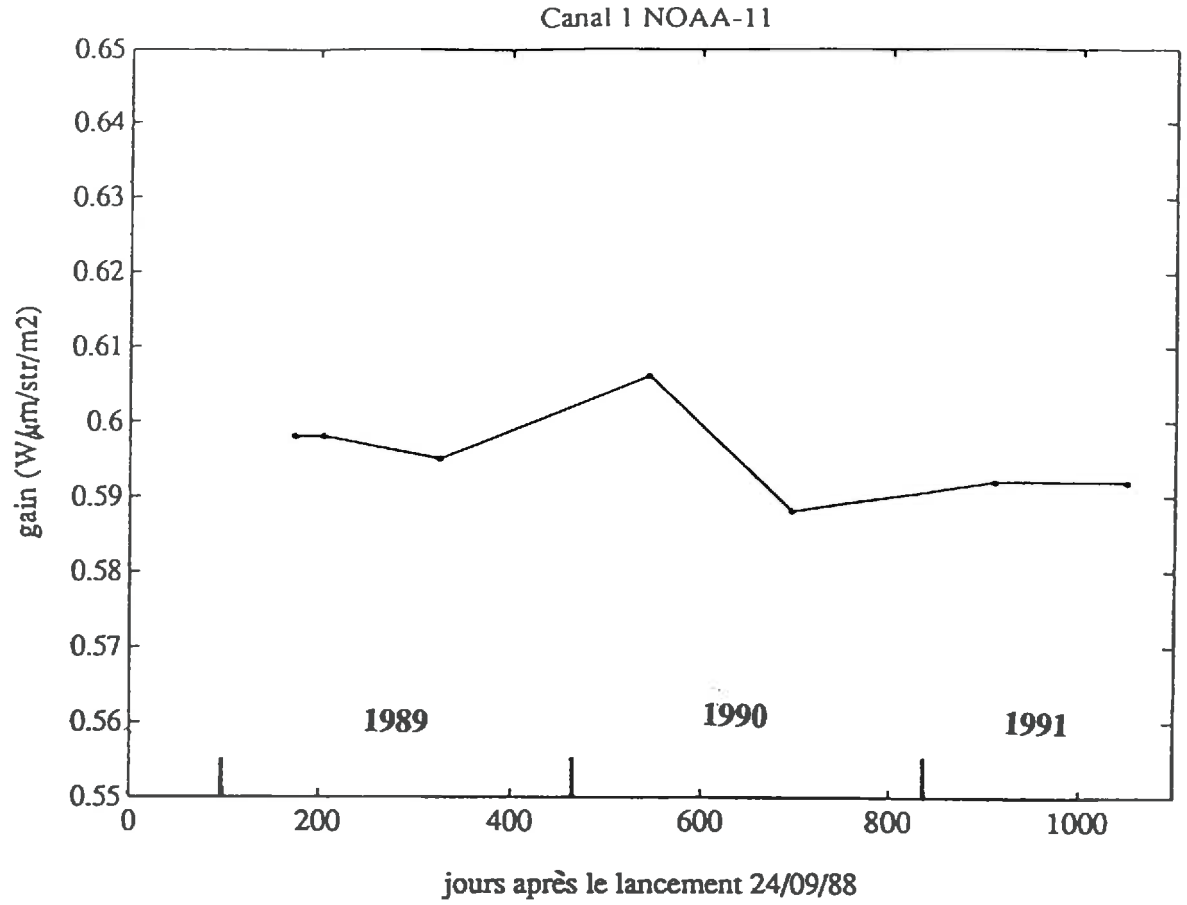
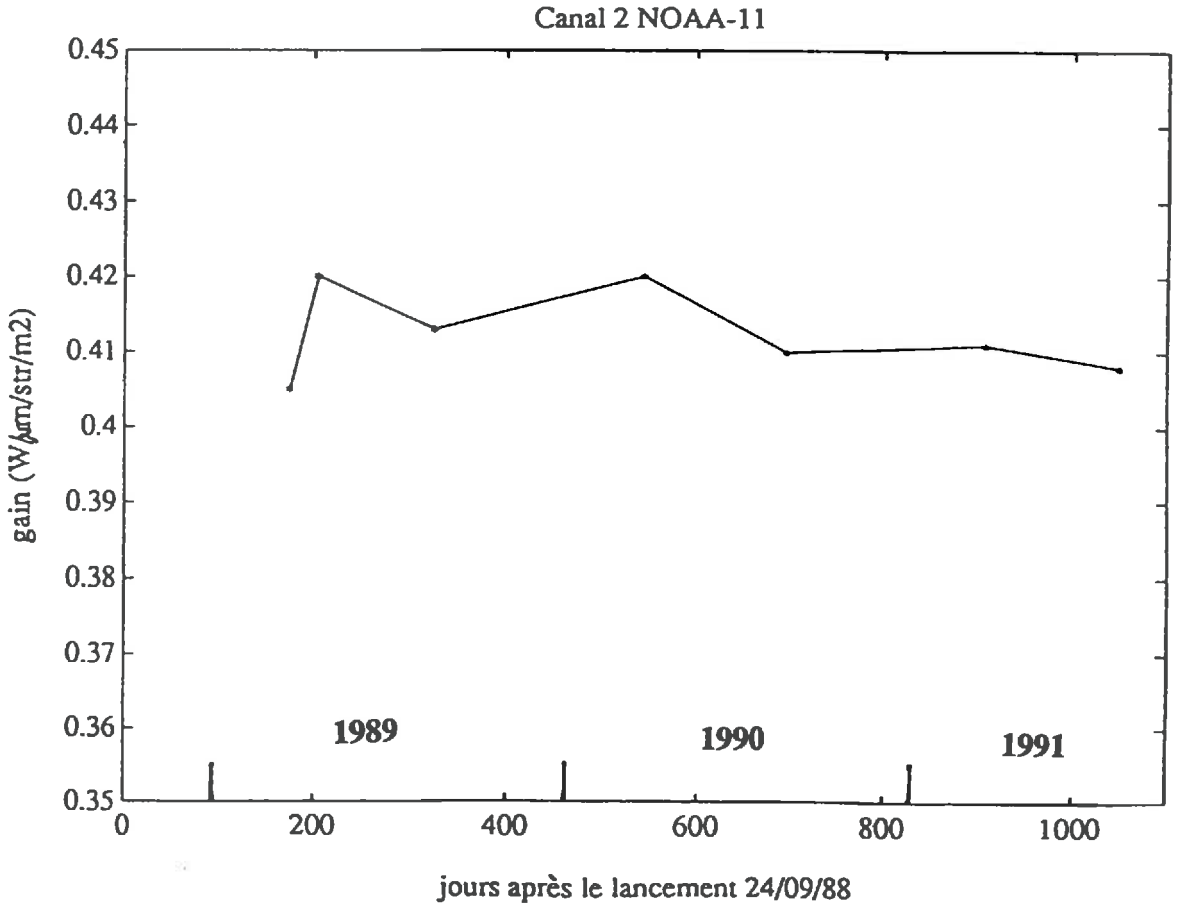


Figure 5.2 : Gains utilisés pour étalonner les valeurs de réflectance des canaux 1 (visible) et 2 (proche infrarouge) du satellite NOAA-11 AVHRR
d'après les données de Teillet and Holben, (1992)





les variations observées sont du même ordre de grandeur que la précision déterminée pour ces mesures soit 3 % en valeur relative.

5.3) Estimation des réflectances à la surface du sol.

Dans le rayonnement visible et proche infrarouge utilisé pour composer le NDVI, les différents constituants de l'atmosphère vont affecter le signal soit par des effets de diffusion, soit par des effets d'absorption. La diffusion peut soit diminuer, soit augmenter le signal. L'absorption entraîne, quant à elle, une diminution du signal. La variation provoquée sur le NDVI dépendra du niveau de perturbation occasionné dans chacun des deux canaux (Holben, 1986).

De ce fait, plusieurs auteurs ont tenté de développer des modèles permettant de corriger les valeurs de réflectance enregistrées (Dedieu, 1990; Paltridge and Mitchell, 1990). Le modèle développé récemment par Rahman et Dedieu (1993) a été choisi pour corriger les données. Ce modèle tient compte de la diffusion de Rayleigh mais également des perturbations dues au contenu de l'atmosphère en ozone, en vapeur d'eau et en aérosols. De plus, il présente l'avantage d'être établi avec des formulations analytiques simples permettant son utilisation sur de grandes quantités de données sans que le temps de calcul ordinateur ne soit trop important. Les entrées du modèle sont : le contenu en vapeur d'eau et en ozone de l'atmosphère, l'épaisseur optique des aérosols à 550 nm, les conditions géométriques au moment de la mesure et les valeurs de réflectance au sommet de l'atmosphère.

Les entrées du modèle qui ont été utilisées ont plusieurs origines :

- Pour ce qui concerne les valeurs de réflectance au sommet de l'atmosphère, ce sont les données de réflectance étalonnées des canaux "rouge" et "proche infrarouge" NOAA/AVHRR qui ont été utilisées ;

- Pour les conditions géométriques, elles sont déterminées à partir des conditions d'angle zénithal solaire et d'angle de visée correspondant aux mesures de réflectance et faisant partie des données fournies par la NOAA ;

- Les valeurs de contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère sont obtenues par intégration sur la verticale de données d'humidité relative dans 11 niveaux de l'atmosphère. Ces données ont été enregistrées sur la période 1958 à 1973 et compilées par Oort (1983). Le fichier résultant, est un fichier de valeurs moyennes mensuelles avec une maille de 5° en longitude et 2.5° en latitude ;

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

- Enfin, pour l'épaisseur optique des aérosols, une valeur constante a été utilisée pour toute la durée de traitement et pour toute l'Afrique. Cette valeur correspond à un niveau de visibilité de 23 Km à l'horizontale (conditions de relativement bonne visibilité). Cette valeur aura souvent tendance à sous-estimer la charge en aérosols de l'atmosphère. Cependant, de par la formulation de la correction des effets des aérosols, l'erreur entraînée sur la valeur de réflectance calculée est beaucoup moins forte dans le cas d'une sous-estimation que dans le cas d'une

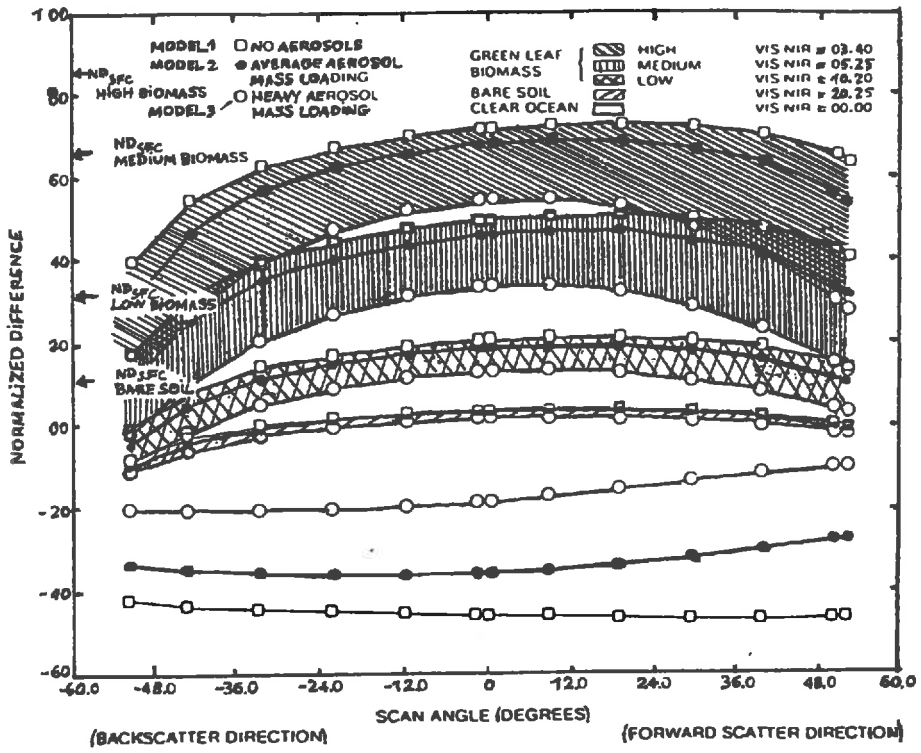


Figure 5.3 : Simulation du NDVI dans les conditions de visée et d'éclairement correspondant au capteur AVHRR des satellites NOAA 7 et 9 pour différents types de couverts au solstice d'hiver (heure locale de croisement de l'équateur 14h30, angle zénithal solaire 64°, latitude 30°) d'après Holben,(1986).

surestimation des aérosols. De plus, les valeurs faibles de NDVI pouvant provenir d'effets dus aux aérosols sont en partie éliminées lors de la phase de filtrage par Maximum Value Composite.

5.4) Filtrage des données.

Malgré la méthode de synthèse des données NOAA/AVHRR (M.V.C.) et malgré les efforts portés sur l'étalonnage et la correction atmosphérique des données, l'évolution temporelle du signal demeure encore fortement bruitée. En effet, chaque jour environ 50 % de la surface du globe est recouverte par des nuages. Dans certaines régions, ces nuages peuvent stagner pendant des périodes largement supérieures à une semaine (forêts denses, régions tempérées l'hiver,...). A ce bruit, vient s'ajouter celui des effets directionnels qui résultent de l'interaction entre les différentes conditions de visées opérées par le satellite et des propriétés optiques anisotropes des objets situés à la surface. Les propriétés de diffusion de l'atmosphère sont également fortement anisotropiques. De ce fait, l'angle de visée et l'angle zénithal solaire influeront beaucoup sur les valeurs de réflectances enregistrées (Holben, 1986) (Fig 5.3). Il faut également noter que plus l'angle de visée s'éloigne du nadir plus le trajet du rayonnement dans l'atmosphère augmente, ce qui accroît l'influence de ce dernier.

Les données fournies ont donc été filtrées afin de tenter de réduire les perturbations induites par ces différents facteurs.

- Elimination des nuages.

Pour ce qui concerne les nuages, une technique de filtrage par seuillage de température a été adoptée. En effet, dans les données fournies par la NOAA, figurent les données enregistrées dans les canaux "infrarouge thermique" (4 et 5). Ainsi, pour chaque pixel et chaque date, lorsque la valeur de température est inférieure à 15° C dans l'un de ces deux canaux, les valeurs de réflectances correspondant à ce pixel ont été éliminées. En effet, nous avons émis l'hypothèse que dans la région d'étude, une température de surface inférieure à 15° C ne peut être observée qu'au niveau de nuages.

En plus du seuillage thermique, un seuillage sur les valeurs de réflectances a été ajouté. La plupart des nuages sont caractérisés par de très fortes réflectances dans les longueurs d'onde rouge et proche infrarouge. Chaque pixel possédant, à la fois, une valeur de réflectance dans le rouge supérieure à 0.3 et une valeur dans le proche infrarouge supérieure à 0.5 a également été éliminé. Chaque donnée éliminée a été remplacée par la valeur résultant de l'interpolation linéaire des points retenus l'entourant. Pour le cas particulier des déserts, les valeurs de réflectance dans le rouge et le proche infrarouge sont constamment très fortes. Pour ces pixels, les données n'ont évidemment pas été éliminées. Ce seuillage a été appliqué uniquement sur les valeurs de réflectance corrigées de l'influence de l'atmosphère.

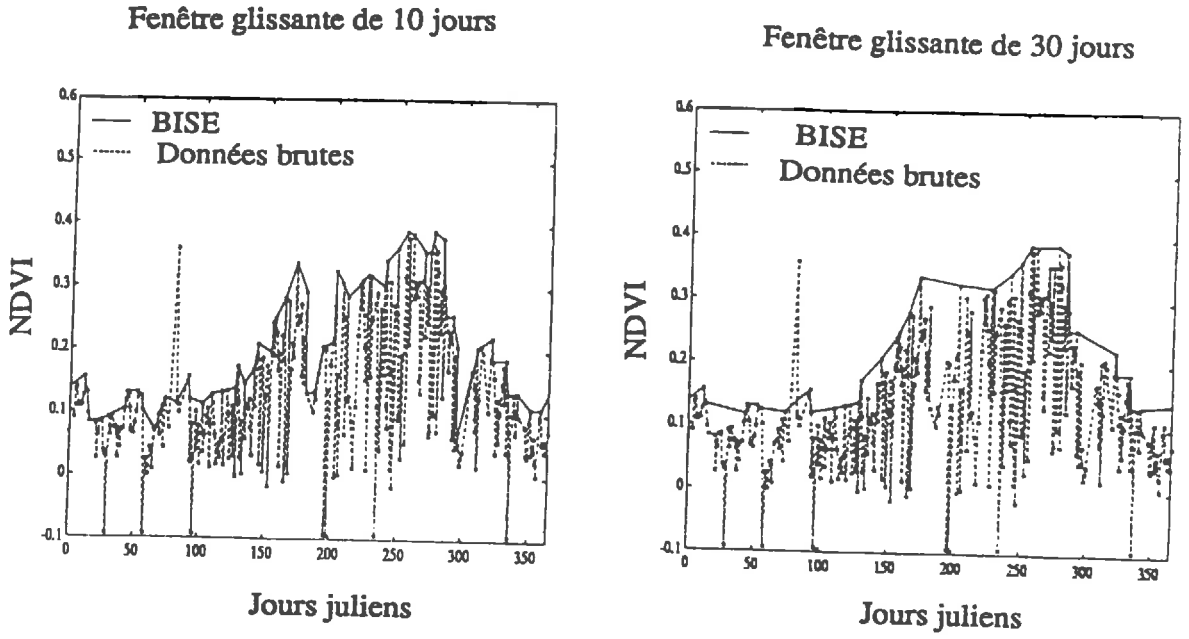


Figure 5.4 : Exemples de profils de NDVI obtenus à l'aide de la méthode BISE en utilisant deux longueurs de fenêtre glissante différentes (10 jours et 30 jours). Les données d'origines sont des données brutes NOAA/AVHRR de format GAC. Les valeurs correspondent à un pixel extrait d'une zone savanicole ouest africaine.

D'après Viovy *et al.*, 1991.

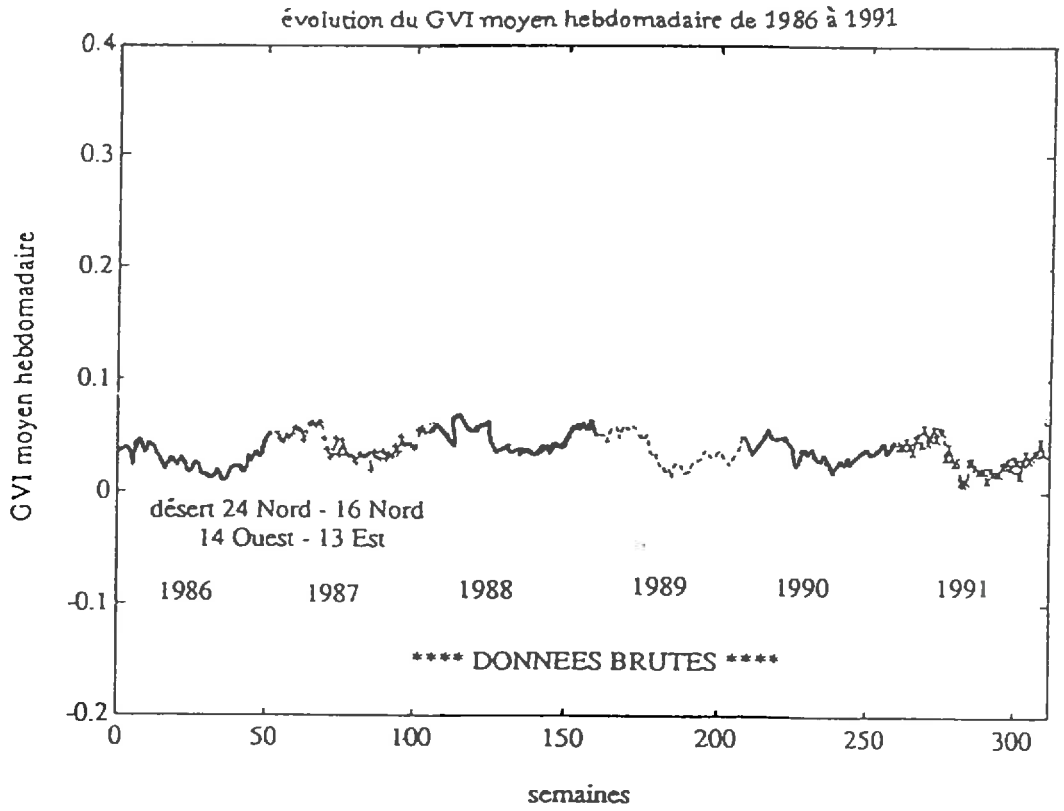


Figure 5.5 : Variation du GVI moyen hebdomadaire observée sur une zone de désert (24° N-16°N;14° O-13°E) au cours des années 1986 à 1991 (Données non corrigées)

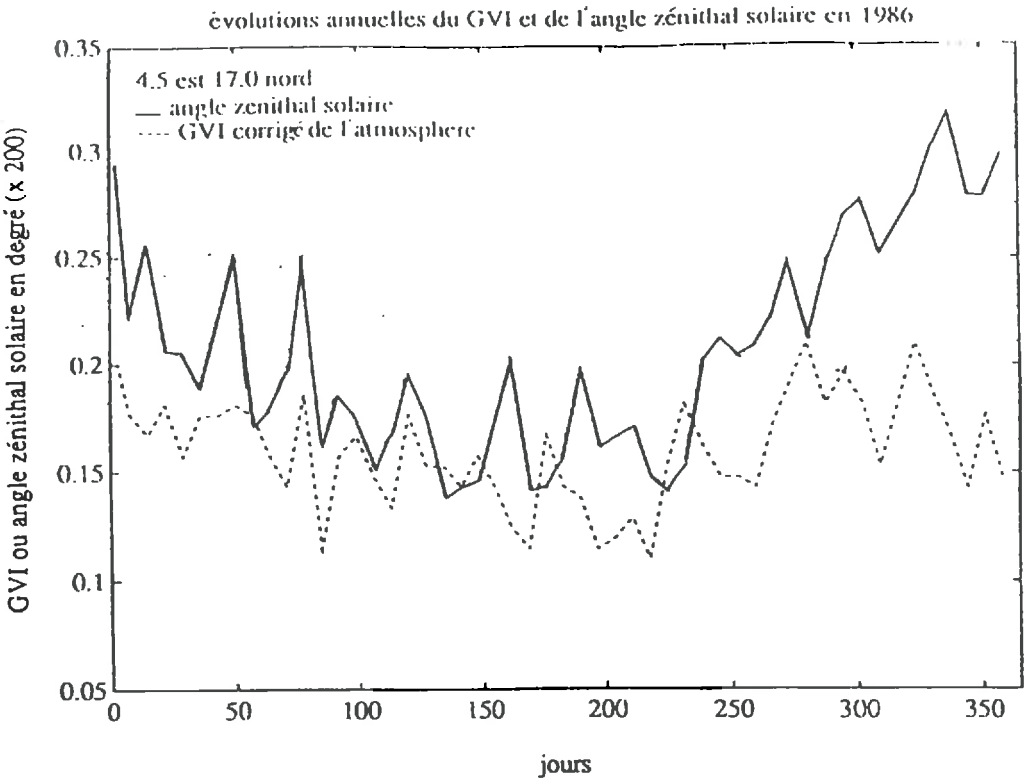


Figure 5.6 : Evolutions annuelles de l'Indice Global de Végétation et de l'angle zénithal solaire pour un pixel situé à 4.5° longitude est et 17° latitude nord. Les données de réflectances utilisées pour calculer l'indice ont été étalonnées et corrigées des effets de l'atmosphère.

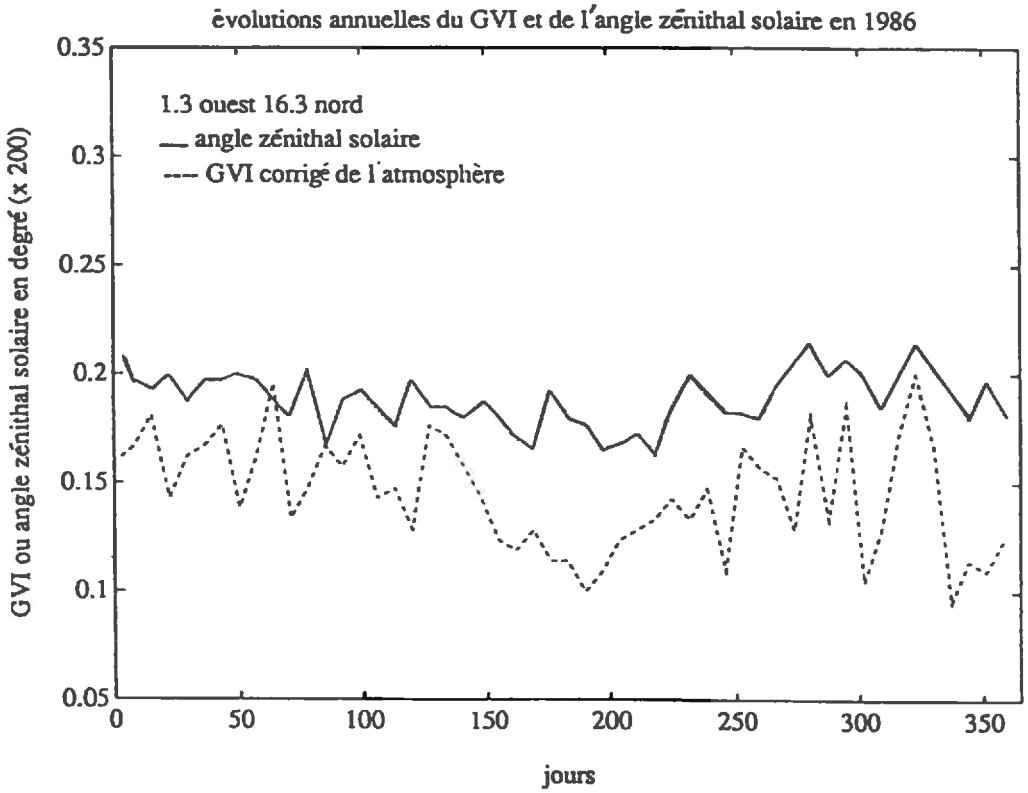


Figure 5.7: Evolutions annuelles de l'Indice Global de Végétation et de l'angle zénithal solaire pour un pixel situé à 1.3° longitude ouest et 16.3° latitude nord. Les données de réflectances utilisées pour calculer l'indice ont été étalonnées et corrigées des effets de l'atmosphère.

- Autres effets.

Les effets occasionnés par les problèmes d'effets directionnels sont extrêmement complexes et, actuellement, il n'existe aucun modèle permettant de s'en affranchir. Certains auteurs (Dijk and Decker, 1987; Viovy, 1990) ont proposé des méthodes de filtrage des données satellitaires sans connaissance *a priori* sur les causes de perturbation. Les procédures employées consistent en un lissage des courbes de NDVI par élimination des fortes fluctuations à l'aide de techniques mathématiques telles que les transformées de Fourier, la moyenne sur plusieurs points, etc. Dans notre étude, j'ai utilisé la méthode développée par Viovy *et al.* (1992). Cette technique de filtrage repose sur plusieurs hypothèses : (1) la présence de nuages ou une atmosphère turbide, entraînent une baisse de la valeur de NDVI; (2) des erreurs de transmission de données par le satellite ou des conditions de visées particulières peuvent causer une augmentation ou une diminution marquée du signal. Cependant, cette variation sera ponctuelle; (3) les variations de NDVI liées aux modifications de la végétation correspondent à des augmentations ou des diminutions régulières du signal et non à des événements brusques.

Ainsi, le long d'une courbe d'évolution temporelle de NDVI une fenêtre dite "glissante" est déterminée, un mois par exemple. Depuis la première date de la fenêtre et pendant la durée de la fenêtre, la valeur la plus forte de NDVI est retenue, sauf s'il s'agit d'une valeur ponctuellement élevée. La fenêtre est déplacée vers ce nouveau point sélectionné et ainsi de suite jusqu'à la fin de la série temporelle. Une décroissance dans le signal ne sera retenue que si la décroissance s'observe sur toute la fenêtre glissante et qu'elle est inférieure d'au moins 20 % par rapport au dernier point élevé retenu. Dans cette méthode également, les points rejetés sont remplacés par une valeur interpolée entre les deux valeurs retenues l'encadrant (fig. 5.4).

Dans ce travail, la taille de la fenêtre adoptée a été de 15 semaines. Le choix d'une fenêtre large a été fait de façon à lisser au maximum les signaux enregistrés dans le sud du transect où la fréquence d'occurrence des nuages est très élevée.

5.5) Résultats des prétraitements des données NOAA/AVHRR

Pour la série temporelle de données brutes allant de l'année 1986 à l'année 1991, j'ai étudié l'évolution du GVI hebdomadaire moyen observé sur une zone de désert (20° à 26° nord, 8° ouest à 12° est). Les zones de désert sont supposées posséder des réponses en réflectance relativement stables dans le temps et ne pas présenter de variations inter annuelles. Or, sur la figure 5.5, on peut voir que deux types de variations apparaissent sur l'évolution des données brutes.

La première est intra annuelle et résulte certainement d'effets de type directionnel occasionnés par le cycle solaire annuel. En effet, on peut noter une forte similitude avec l'évolution annuelle de l'angle zénithal solaire observée pour le satellite NOAA-9 en 1986 (fig. 5.6 et 5.7). Les deux pixels correspondant à ces figures ont été choisis au hasard dans la zone de désert mentionnée ci-dessus. A cette oscillation basse fréquence s'ajoute également une oscillation

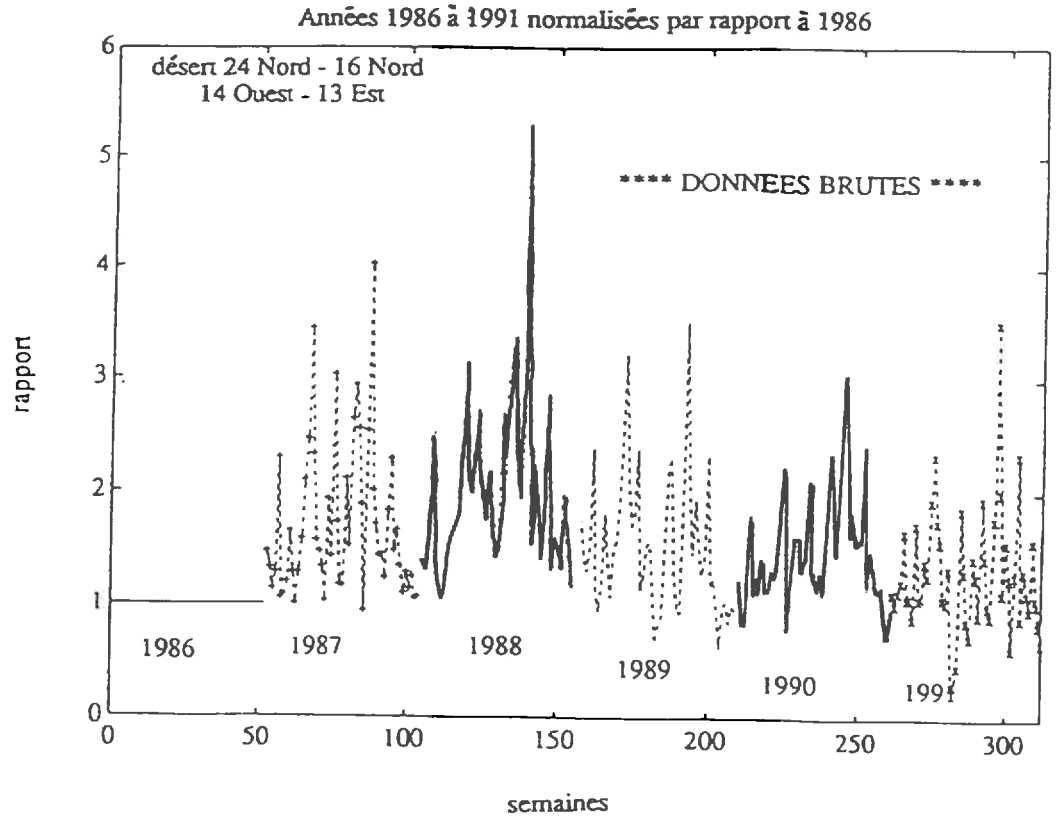


Figure 5.8 : Variation du rapport entre le GVI moyen hebdomadaire observé entre 1986 et 1991 et le GVI moyen hebdomadaire observé à la même date en 1986. Observation sur une zone de désert (24° N-16°N;14° O-13°E) (Données non corrigées).

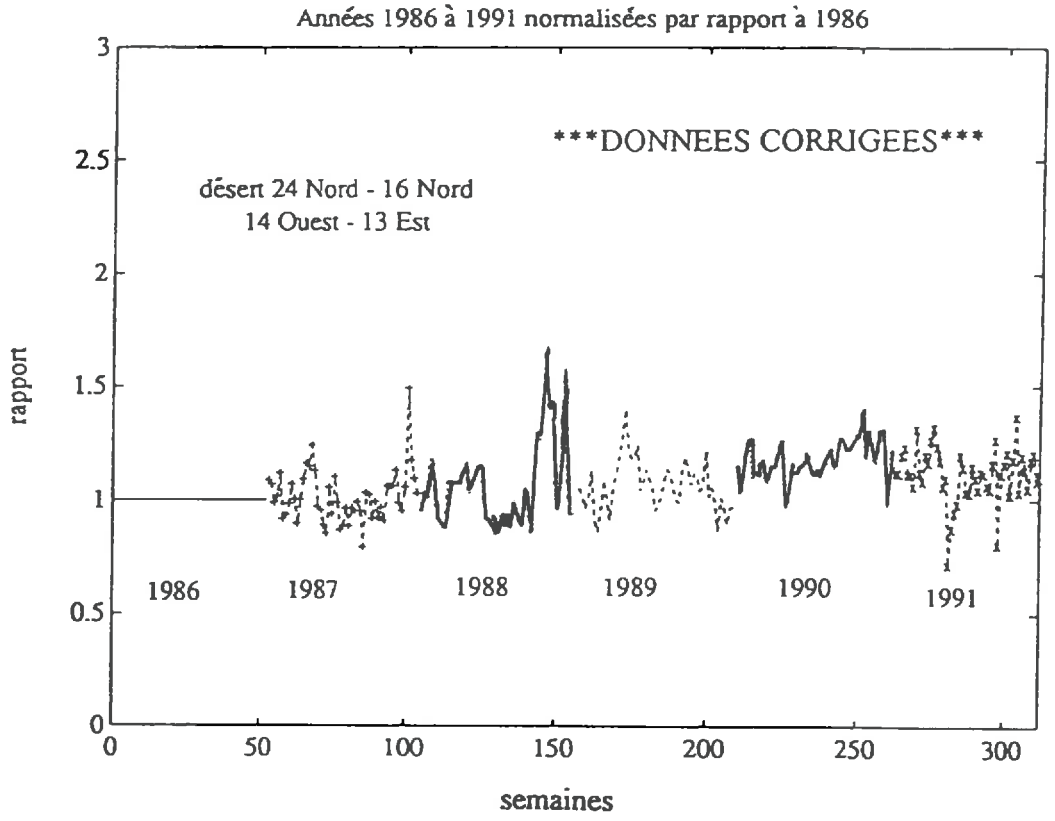


Figure 5.9 : Variation du rapport entre le GVI moyen hebdomadaire observé entre 1986 et 1991 et le GVI moyen hebdomadaire observé à la même date en 1986 (Données corrigées). observation sur une zone de désert (24° N-16°N;14° O-13°E)

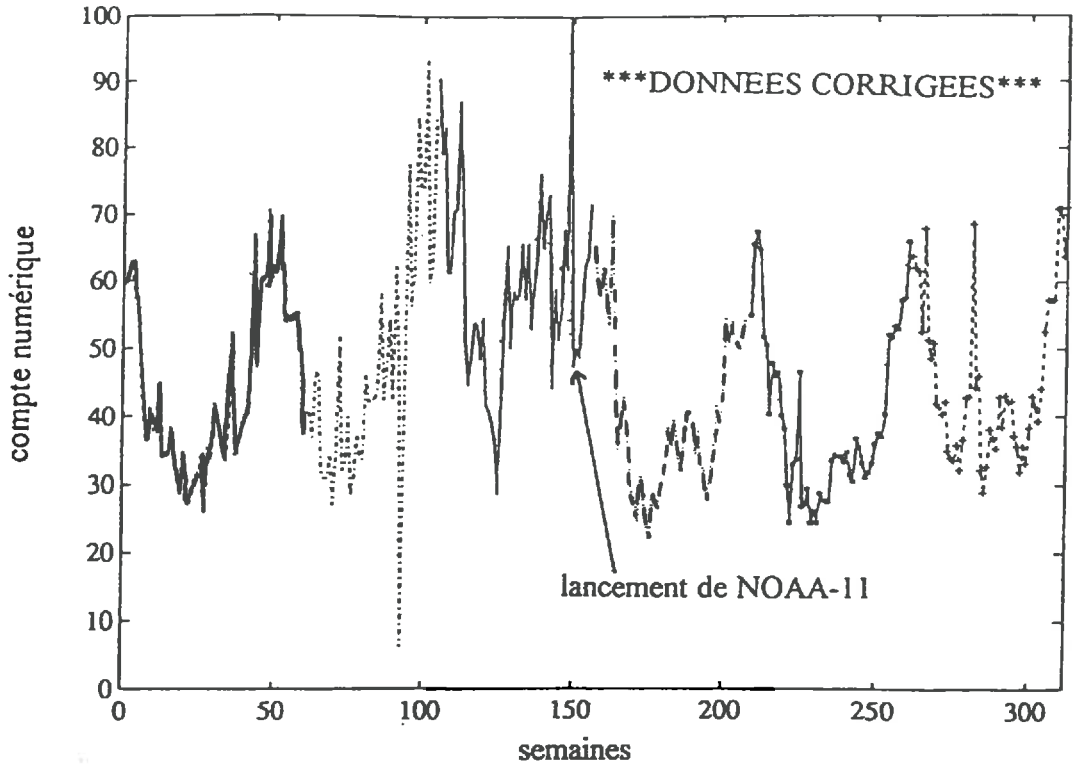


Figure 5.10: Variation de la reflectance moyenne hebdomadaire observée sur une zone de désert (24° N-16°N;14° O-13°E) au cours des années 1986 à 1991 mettant en évidence une anomalie dans les données satellitaires en 1988. (canal visible) (données corrigées).

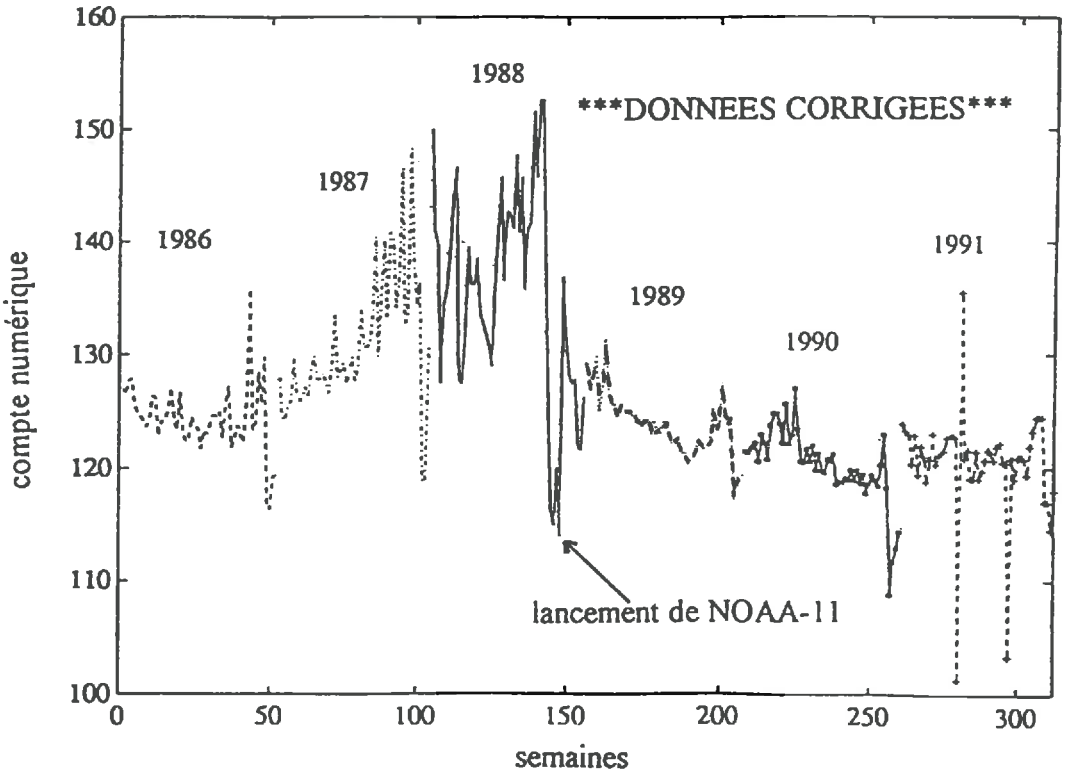


Figure 5.11 : Variation de la température moyenne hebdomadaire observée sur une zone de désert (24° N-16°N;14° O-13°E) au cours des années 1986 à 1991 mettant en évidence une anomalie dans les données satellitaires en 1988. (canal infrarouge thermique n°4) (données corrigées).

haute fréquence de 9 jours qui correspond à la période nécessaire pour que le satellite soit placé en conditions identiques de visée d'un point.

La seconde est, quant à elle, imputable à une dérive satellitaire. Chaque valeur hebdomadaire moyenne de GVI a été normalisée par rapport aux valeurs enregistrées à la même date en 1986 de façon à mieux mettre en évidence cette dérive (fig 5.8). Comme nous l'avons vu dans le chapitre III, plusieurs auteurs ont mis en cause la possibilité d'utilisation de données satellitaires sans prétraitements de type étalonnage (Goward *et al.*, 1991; Price, 1987). Ainsi, des problèmes d'interprétation sont à craindre si l'on effectue un suivi interannuel de la production primaire à l'aide de ces données non corrigées. La variation observée résulterait en grande partie, sinon entièrement, de la variation due à la dérive et non de celle due à des changements effectivement intervenus dans la végétation. De plus, dans le jeu de données disponible les variations sont d'autant plus fortes que les enregistrements sont issus de deux satellites différents. Le satellite NOAA-9 a été placé en orbite en décembre 1984 et a été remplacé par le satellite NOAA-11 en septembre 1988. NOAA-11 est encore en service.

5.51) Etalonnage des données - Corrections atmosphériques

Les valeurs de réflectance ont donc été étalonnées à l'aide des coefficients de calibration fournis par Holben (1991) et Teillet et Holben (1992). Ensuite, ces valeurs ont été corrigées de l'influence de l'atmosphère. Le suivi identique à celui effectué pour les données brutes a été reproduit pour ces nouvelles valeurs. On peut noter sur la figure 5.9 que des améliorations sensibles ont été apportées. Si le bruit haute fréquence n'est pas entièrement éliminé, on assiste à une suppression quasiment complète de la dérive entre les années 1986 à 1989. Par contre, pour les années 1990 et 1991 les valeurs demeurent légèrement plus fortes. Ceci, semble s'expliquer par le fait que peu de valeurs de calibration ont pu être estimées pour NOAA-11. L'estimation d'une valeur sur les cibles de calibration nécessite environ six mois d'observations.

Si l'on considère l'année 1988, on observe que la courbe (Fig. 5.9) présente une évolution dissemblable des autres années, surtout pour ce qui concerne le milieu de l'année. De plus, après correction, de nombreuses valeurs de NDVI se sont avérées saturantes, c'est à dire égales à 1. Or, Verhoef (1984) a estimé, à l'aide d'un modèle de réflectance de couvert (SAIL), que les valeurs maximales de NDVI qui peuvent réellement être observées se situent aux environs de 0.9. Il a donc été procédé à une vérification de la validité de ces données. Pour cela, l'évolution interannuelle des valeurs dans les canaux rouge, proche infrarouge et thermique, a été analysée selon le même procédé que pour les valeurs de NDVI. On s'aperçoit sur les figures 5.10 et 5.11 que, quel que soit le canal considéré, une forte dérive des valeurs est apparue à partir de la fin octobre 1987. Cette dérive s'observe jusqu'en octobre 1988, date qui correspond à la mise en service de NOAA-11. Une explication peut être fournie par les problèmes de dérive orbitale mentionnés par Goward *et al.* (1991). En effet, en fin de vie, NOAA-9 passait à 17h30 au niveau de l'équateur alors qu'il avait initialement été placé sur une orbite le faisant croiser l'équateur à 14h30. L'influence des modifications de la géométrie de la visée entraînées a certainement été

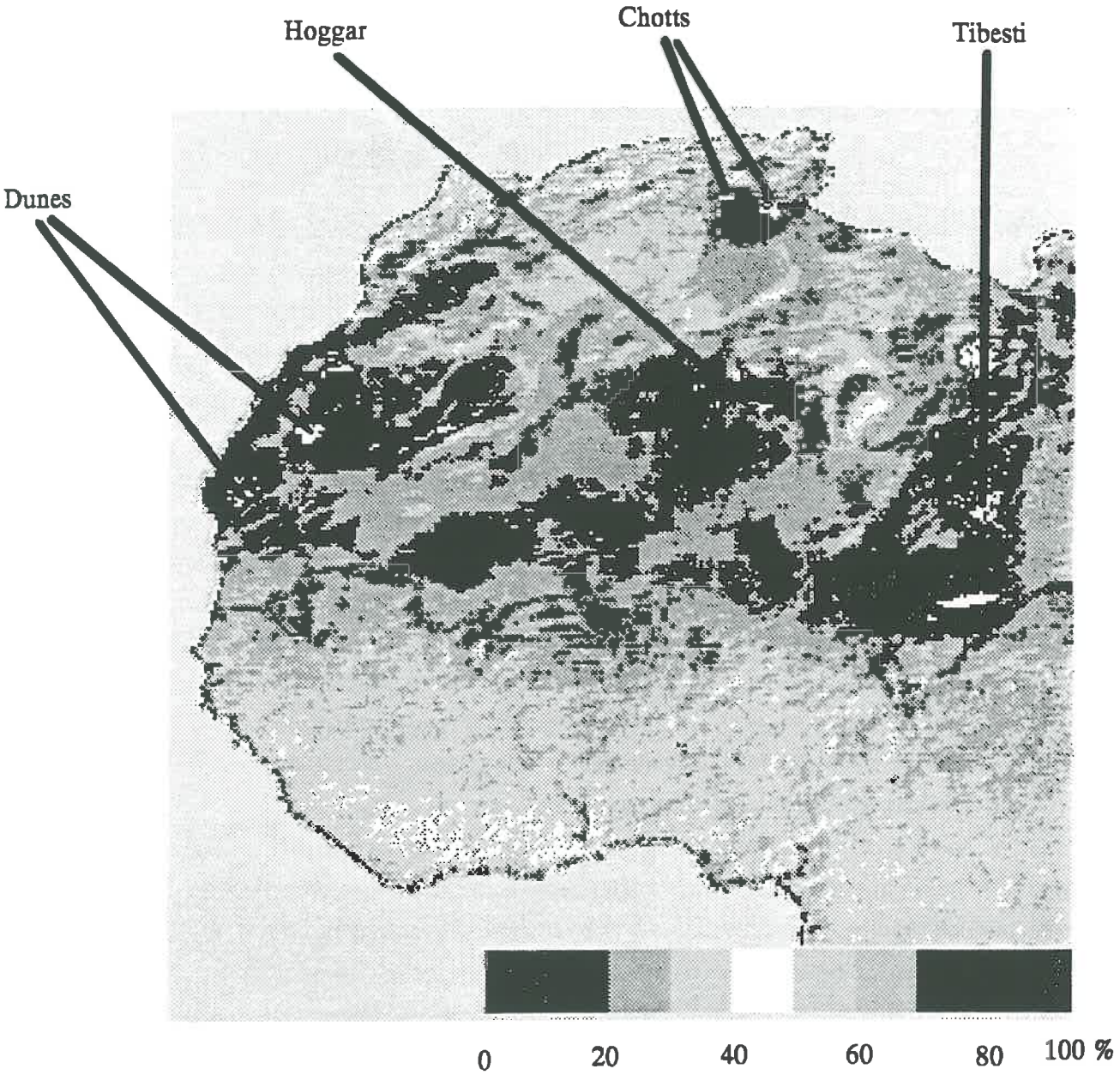


Figure 5.12 : Différences, en pourcentage, entre les valeurs moyennes de NDVI non corrigées et les valeurs moyennes de NDVI obtenues après correction.

importante. Un dérèglage du système de stockage des données à bord du satellite et/ou du système de transmission des données au sol peut également être envisagé. L'existence ou l'importance de ces perturbations ne sont cependant pas relatées clairement dans la bibliographie. Seul, Prince (1991) dans une étude concernant le Sénégal, fait référence à des données "douteuses" en 1988 et a préféré ne pas utiliser ces valeurs. Il faut noter également que Diallo *et al.* (1991), lors de l'établissement de relations entre le NDVI intégré annuellement et des valeurs de production mesurées au sol, ont observé une dispersion très forte des points en 1988 par rapport aux autres années considérées.

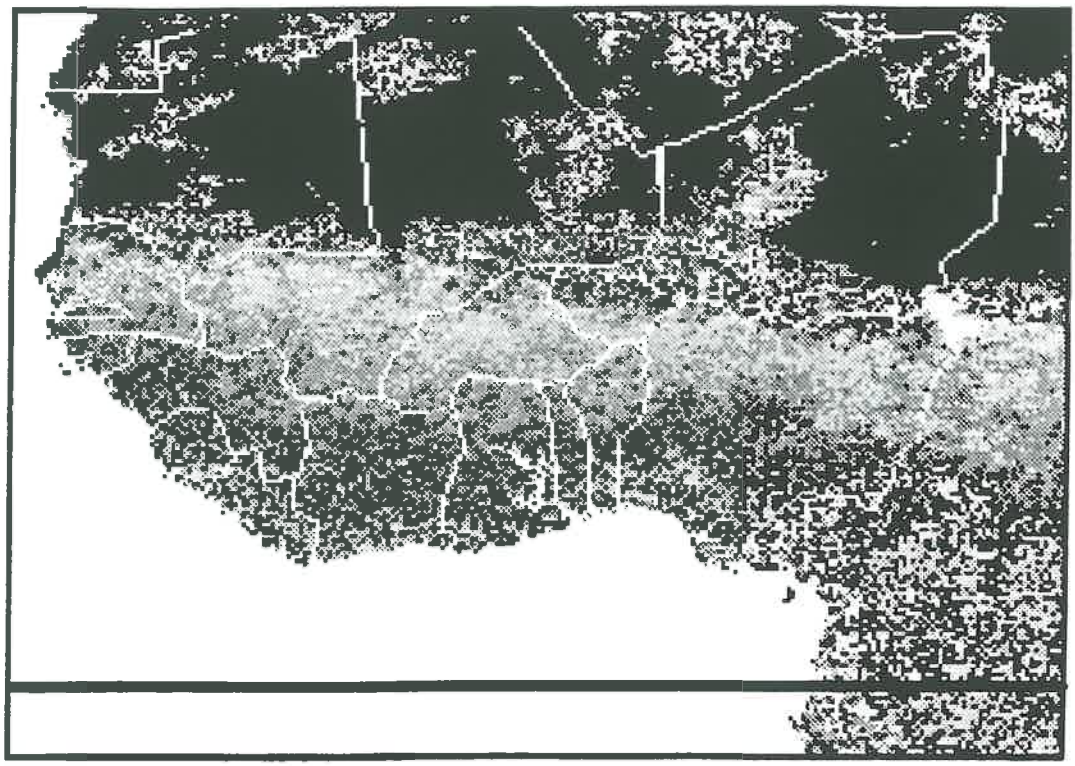
Au regard de ces résultats, plusieurs constatations peuvent être faite quant à l'utilisation et l'interprétation des données dans ce travail.

- Il semble indéniable que les données concernant l'année 1988 sont fortement faussées et que cette année ne doit pas être prise en compte dans les traitements ultérieurs.
- Pour la période allant de janvier 1983 à avril 1985, les données fournies par la NOAA ne sont constituées que par des données NDVI brutes. De ce fait, aucune correction n'a été possible et ces données n'ont donc également pas été utilisées.
- Lors des comparaisons interannuelles qui vont être faites, seules les années 1986, 1987 et 1989 d'une part et les années 1990 et 1991 d'autre part, seront réellement comparables entre elles. Comme nous l'avons vu, pour ces deux dernières années il subsiste une dérive qui oblige à les distinguer.
- Le bruit apparaissant à la fin de l'année 1987 a été négligé car il intervient dans une période où la végétation n'est plus active en Afrique de l'ouest, exception faite de la forêt dense. Ces valeurs ont été supposées sans influence sur les estimations de production effectuées.

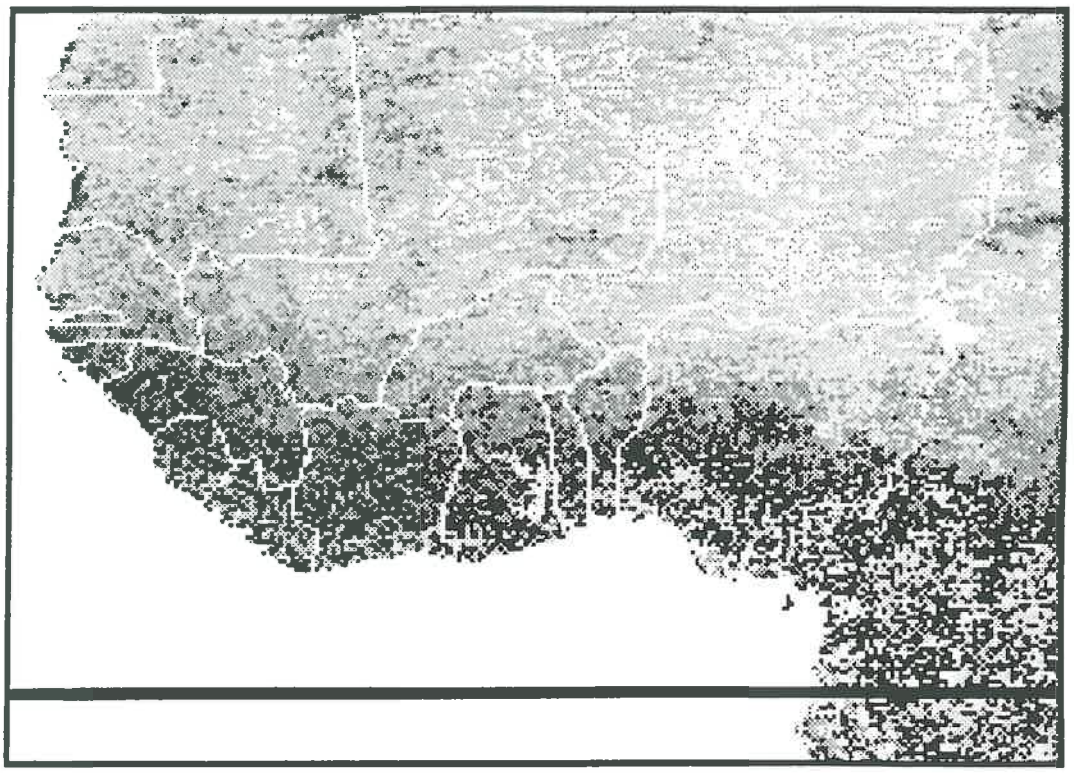
J'ai également cherché à estimer l'importance des corrections apportées aux données. Sur la figure 5.12 sont représentées, en pourcentage, les différences obtenues entre les données brutes de NDVI moyen annuel et les données équivalentes corrigées. Sur les zones désertiques les valeurs ont été rehaussées d'un facteur allant de 1 à 30 %. Sur les zones végétalisées, les valeurs sont comprises entre 30 et 40 %. Cela atteint 50 % sur le domaine des forêts denses. Comparativement à ces résultats, rappelons la valeur de 30 % estimée par Goward *et al.* (1991) à l'aide de simulations comprenant à la fois des zones nues et des zones végétalisées.

Les zones de déserts présentent, en certains emplacements, des valeurs corrigées plus faibles que les données brutes. Le repérage géographique de ces points montre qu'ils sont localisés soit sur les côtes, soit sur des zones de hauts reliefs (Hoggar, Tibesti), soit sur des zones de grandes dunes (Mauritanie) ou enfin sur des régions très humides et/ou salées (chotts en Tunisie et Algérie). Dans ces régions de reliefs, les effets directionnels modifient très fortement les conditions de mesure et conduisent à des fluctuations très aléatoires du signal enregistré par le satellite. Si ces situations sont extrêmes, cela signifie néanmoins qu'il existe dans les autres zones une part plus ou moins élevée de bruit du aux effets directionnels. Cette erreur est, en l'état actuel

Figure 5.13 : Pourcentage de semaines éliminées par le filtrage à l'aide des canaux visible, proche infrarouge et thermiques NOAA/AVHRR



canaux visible, proche infrarouge et thermiques



canaux thermiques uniquement

ANNEE 1986

des recherches, difficilement quantifiable. Dans les zones de chott, le signal est modifié par la présence de surfaces plus ou moins inondées. Pour ce qui concerne les côtes, les erreurs observées proviennent de problèmes de superposition entre les différents enregistrements.

5.52) Résultats du filtrage des données

Malgré les corrections apportées par l'étalonnage et les corrections atmosphériques il subsiste encore un fort bruit haute fréquence sur les valeurs de NDVI. Ce bruit résulte de l'interaction complexe de plusieurs éléments perturbateurs. En plus des effets directionnels qui viennent d'être mentionnés, s'ajoutent les effets dus à une couverture partielle des images par des nuages. De plus, il faut souligner que, lors de la correction des effets atmosphériques, il est possible que l'on ait généré une certaine quantité de bruit. Les perturbations dues à la vapeur d'eau sont estimées à partir de données climatologiques (moyennes sur 15 ans : 1958-1973). Durant les années 1986 à 1991, il est vraisemblable que certaines périodes ont présenté des valeurs très différentes des valeurs moyennes. Dans ces conditions, les corrections apportées seront parfois faussées.

5.52a) Résultats du seuillage des nuages

La figure 5.13 représente le pourcentage de valeurs éliminées pour chaque pixel à l'aide du seuillage utilisant les données des canaux rouge, proche infrarouge et infrarouge thermique durant l'année 1986. Dans la moitié nord du transect étudié, entre 1 et 20 % des valeurs ont, en moyenne, été éliminées. Pour la moitié sud, cette proportion passe de 20 à 40 %. Pour certaines zones telles que les côtes du Liberia, de la Sierra Leone et du Cameroun le pourcentage est supérieur à 50 % atteignant même les 80 % dans la régions du Mont Cameroun. Ces zones sont en effet caractérisées par une entrée permanente de masses nuageuses quelle que soit la période de l'année.

Ces résultats montrent que les synthèses hebdomadaires (M.V.C.) effectuées par la NOAA laissent encore apparaître une quantité non négligeable de données bruitées par les nuages et que le seuillage effectué dans ce travail trouve tout à fait son fondement.

5.52b) Filtrage des autres effets perturbateurs.

Pour ce qui concerne les autres effets perturbateurs, la complexité de leur influence conjointe ne permet pas, avec les connaissances actuelles, de faire un tri raisonné des valeurs erronées. Les méthodes de filtrage employées sont donc beaucoup plus subjectives que celle utilisée pour le seuillage des nuages. Ainsi, le filtrage employé dans ce travail (méthode B.I.S.E., Viovy *et al.*, 1992) procède uniquement par la suppression, sur un profil temporel de NDVI, des valeurs faibles ou fortes apparaissant de façon ponctuelle. Il conduit également à la rétention de l'enveloppe des valeurs de NDVI les plus fortes. Malgré cela, les résultats obtenus après l'utilisation de ces deux filtres et la réinterpolation des valeurs retenues sont très satisfaisants. En

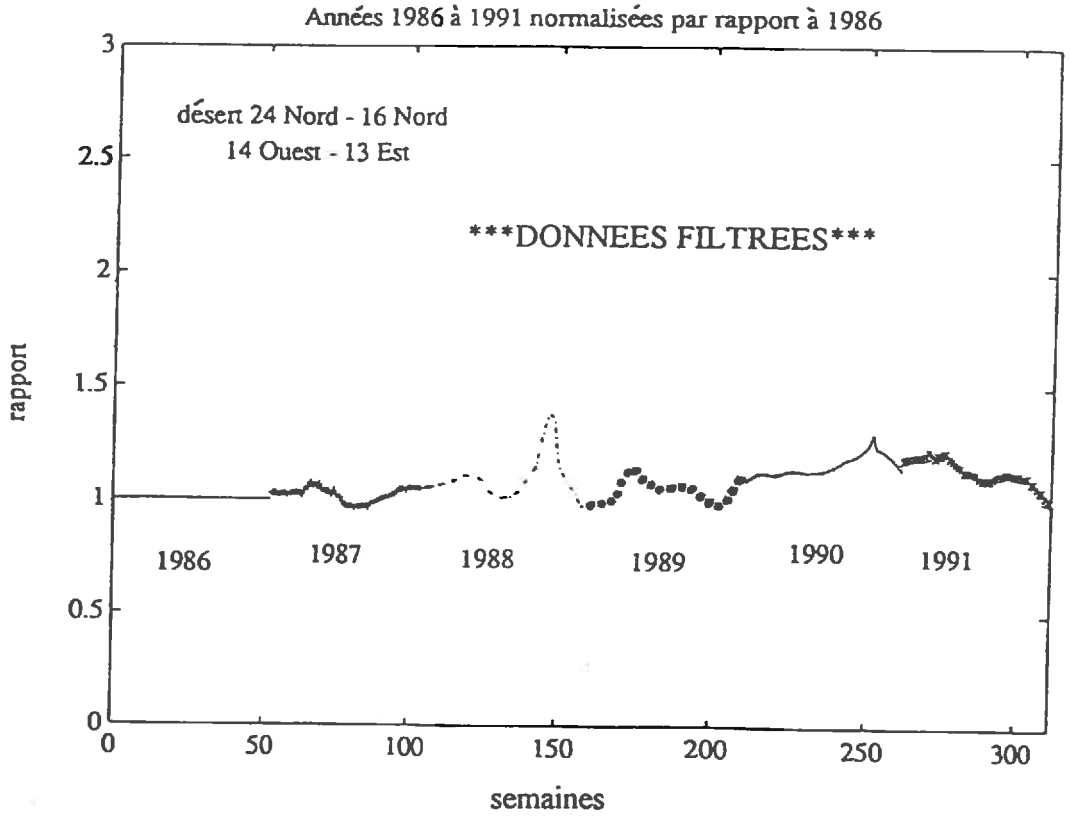


Figure 5.14 : Variation du rapport entre le GVI moyen hebdomadaire observé entre 1986 et 1991 et le GVI moyen hebdomadaire observé à la même date en 1986 (Données filtrées). observation sur une zone de désert (24° N-16°N;14° O-13°E)

effet, on peut voir, sur la figure 5.14, que la majeure partie du bruit haute fréquence observé jusqu'à présent n'apparaît plus sur les courbes d'évolution du GVI moyen hebdomadaire sur la zone "désert". Le bruit basse fréquence du au cycle solaire annuel n'est pas du tout éliminé. Ce constat est cependant normal car inhérent au caractère ponctuel de traitement de l'information par les filtres utilisés.

Dans la démarche de correction des données satellitaires, j'ai essayé de tenir compte le mieux possible des connaissances actuelles sur les différents effets perturbateurs intervenant sur les mesures. Il est possible au vu des résultats d'affirmer que la qualité des données a fortement été améliorée. Il semble que cette correction est suffisante pour permettre la réalisation de comparaisons interannuelles significatives. Comme nous l'avons vu, l'utilisation des données brutes peut conduire à l'observation de variations dont le rattachement à des phénomènes biologiques est plus que douteux.

Malgré ces améliorations sensibles, certains phénomènes tels que les effets directionnels demeurent largement non maîtrisés. De plus, on a, une fois de plus, affaire à des problèmes de manques de données "terrain". Ainsi, il ne semble pas exister de mesures radiométriques au sol permettant de donner une signification quantitative aux corrections effectuées. Pour les données climatiques, il est difficile de disposer de valeurs "en temps réel" pour de larges surfaces. Ces valeurs seraient utiles pour apporter une correction correspondant réellement aux conditions climatiques existant lors de la mesure. Enfin; la méthode actuelle d'obtention de coefficients de calibration, mise au point pour compenser le manque de système de calibration à bord des satellites NOAA/AVHRR, limite fortement les possibilités d'utilisation en temps réel des enregistrements satellitaires.

N.B. : Il faut souligner, pour les personnes non coutumières de l'utilisation de l'imagerie satellitaire, que le traitement informatique des données satellitaires est très couteuse en temps de travail. La correction des données ne constituait pas le sujet de ce travail. Cependant, nous avons pu voir qu'elle s'avére être une condition *sine qua non* à la mise en oeuvre d'études portant sur plusieurs années. Ainsi donc, ces différents traitements ont représenté plus de la moitié de la durée de la thèse et n'ont pu être réalisés que grâce à l'aide généreuse de collègues de travail ainsi que grâce à l'utilisation de micro et mini-ordinateurs relativement puissants et ayant des capacités mémoires très élevées.

CHAPITRE VI

MISE EN OEUVRE DU MODELE

CHAPITRE VI

MISE EN OEUVRE DU MODELE

Le but fixé pour notre travail, est d'obtenir des estimations de valeurs de production primaire à l'échelle régionale. Pour ce faire, et pour des raisons déjà présentées au chapitre IV, nous avons limité la zone d'étude à l'Afrique de l'ouest.

Les modèles globaux utilisés classiquement procèdent par la mise en relation de données de production et de données de climatologie (modèles de Lieth et Whittaker, 1975). Nous nous proposons d'étudier une approche utilisant des données fournies par des satellites. En effet, il nous a paru intéressant de tester l'apport de ces données car certains de ces instruments présentent l'avantage d'être le seul type d'outil permettant, à l'heure actuelle, d'effectuer des mesures à l'échelle globale et avec une bonne répétitivité temporelle.

6.1) Adaptation des différents paramètres à notre cas d'étude

Comme nous l'avons vu au chapitre II, l'équation proposée initialement par Monteith fournit une estimation de la productivité instantanée d'un couvert et se décompose en un produit de sept efficiences distinctes. Tout en tenant compte des conditions d'applications de ce modèle, nous l'avons modifiée de façon à produire une formulation utilisant des informations satellitaires et conduisant à des estimations annuelles de PPN à l'échelle régionale.

Une des composantes du modèle de Monteith consiste à estimer l'énergie solaire incidente à la surface du sol (ou rayonnement global) à partir de la constante solaire. Cette donnée peut être mesurée directement et est régulièrement enregistrée par certaines stations météorologiques. Cependant, comme peu de stations sont équipées de pyranomètres, les valeurs de Rg ne sont pas disponibles à l'échelle régionale. **Dans ce travail**, nous ne nous sommes donc pas basé sur ces données classiques et **nous avons utilisé des valeurs de rayonnement global estimées à partir de données satellitaires.**

Les résultats de campagnes de mesures des différents processus conduisant à l'estimation de la production primaire brute (intensité photosynthétique, intensité respiratoire, intensité photorespiratoire) à une échelle supérieure à celle de la plante sont encore peu répandus. **Les données les plus fréquentes sont des valeurs de photosynthèse nette aérienne qui font état de la transformation du CO_2 absorbé en tenant compte des pertes respiratoires.** L'utilisation de ce type de donnée permet de regrouper sous une seule valeur d'efficience l'efficience photochimique (ε_q), l'efficience de diffusion (ε_d) et le facteur de respiration (ε_r) dont est composé le modèle initial de Monteith.

A l'aide de ces simplifications, on aboutit à une formulation du modèle de type :

$$\frac{dPPN}{dt} = Rg \cdot \varepsilon_c \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_b \qquad \text{où :}$$

dPPN = différentielle de la **production primaire nette aérienne,**
dt = différentielle du temps,
Rg = **rayonnement solaire global** incident à la surface de la terre
($Rg = \varepsilon_g \cdot \varepsilon_a \cdot I_o$),
ε_c = **efficience climatique** (RPA/Rg),
ε_i = **efficience d'interception,** qui est égale au rapport entre RPA intercepté par le végétal et le RPA incident total,
ε_b = **efficience de conversion du rayonnement,** qui correspond au rapport entre la quantité de matière sèche produite et stockée dans les plantes et la quantité de RPA intercepté ($\varepsilon_b = \varepsilon_q \cdot \varepsilon_d \cdot \varepsilon_r$).

La formulation simplifiée obtenue est très semblable à celle définie par Varlet-Grancher *et al.* (1982) bien que les données utilisées en entrées ainsi que la façon d'approximer les différentes efficiences soient souvent très différentes de leur démarche.

Pour obtenir une estimation sur une période de temps donnée, typiquement une saison de végétation, il est nécessaire d'intégrer cette équation. On obtient alors :

$$PPN = \int_{t_i}^{t_f} \varepsilon_c \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_b \cdot R_g \cdot dt$$

où t_i = début de la phase active de la végétation
t_f = dessèchement des organes aériens (pluriannuelles) ou mort de la plante (annuelles).

Les valeurs satellitaires fournies sont des synthèses hebdomadaires, le pas de temps d'intégration du modèle est donc fixé à une semaine. L'utilisation d'un pas de temps déterminé entraîne une discrétisation de l'équation de la forme :

$$PPN = \sum_{x=1}^{x=n} \varepsilon_c \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_b \cdot Rg \cdot \Delta t$$

avec $\Delta t = 7$ jours,
n = durée en semaines du cycle végétatif.

Il convient donc maintenant, pour chaque paramètre d'utiliser des valeurs moyennes hebdomadaires et d'en évaluer leur signification.

6.11) Adaptation des valeurs de rayonnement global (Rg).

6.11a) Type de données.

Les valeurs de rayonnement utilisées sont des valeurs décadaires dérivées de données Météosat à l'aide de la méthode développée par Dedieu *et al.* (1987b). Dans cette méthode, les données sont corrigées de l'influence de la diffusion de Rayleigh (N_2, O_2). L'absorption du rayonnement par les molécules d'ozone et de vapeur d'eau est prise en compte en utilisant des données climatologiques. Enfin, la diffusion de Mie est estimée à partir d'une valeur moyenne de contenu de l'atmosphère en aérosols. Les valeurs sont donc fournies en tant que valeurs de "rayonnement global incident à la surface du sol".

mois	Abidjan		Bouaké		Korhogo		Man	
	moy. mensuelle	écart type	moy. mensuelle	écart type	moy. mensuelle	écart type	moy. mensuelle	écart type
Janvier	189.16	17.15	202.10	**21.11**	228.14	9.92	217.22	7.88
Février	209.77	*7.82*	213.84	13.64	234.00	8.73	224.42	5.70
Mars	204.50	15.04	211.47	17.35	230.00	10.93	221.82	5.44
Avril	213.90	12.95	215.5	14.25	237.11	9.34	222.90	8.40
Mai	187.40	10.29	211.34	15.38	233.40	6.03	214.80	11.25
Juin	156.70	18.92	177.55	15.82	220.75	6.26	191.70	7.32
Juillet	154.50	13.60	164.34	15.61	204.64	10.44	174.37	15.34
Août	152.70	**20.71**	167.27	15.43	199.87	**15.79**	182.11	15.86
Septembre	168.90	11.70	186.14	15.05	214.00	*3.91*	191.22	**17.51**
Octobre	196.00	13.39	199.95	*12.26*	233.73	8.29	211.96	5.91
Novembre	202.40	7.85	187.7	17.02	255.21	7.37	208.15	9.93
Décembre	176.40	8.57	181.62	15.98	207.47	11.59	198.41	*3.18*
moyenne	184.4 ± 21.17	13.16	193.23 ± 17.5	15.74	224.86 ± 15.31	9.05	204.92 ± 16.21	*9.48*
total annuel(MJm^{-2})	5815.23		6093.7		7091.18		6462.35	

Tableau 6.1 : Valeurs de rayonnement global mensuel moyen (Wm^{-2}) pour quatre stations de Côte d'Ivoire (années 1980 à 1987) (données A.S.E.C.N.A.).

Les données de rayonnement ne sont disponibles sur une année entière que pour l'année 1983. Nous avons effectué une étude de la variabilité inter annuelle (1980 à 1987) du rayonnement moyen mensuel pour quatre stations climatologiques de Côte d'ivoire. Les données utilisées sont des valeurs de rayonnement global estimées à partir des mesures de durées d'ensoleillement issues de relevés climatologiques de l'A.S.E.C.N.A.

On peut voir sur le tableau 6.1 que les variations mensuelles interannuelles moyennes observées sont d'environ 13 et 16 Wm^{-2} pour les stations d'Abidjan et de Bouaké et de 10 Wm^{-2} pour les stations de Man et Korhogo. Ces valeurs ne différent pas significativement de l'erreur de mesure communément fournie pour les valeurs de rayonnement, soit 10 à 20 Wm^{-2}.

Pour ce qui concerne les variations intermensuelles moyennes, la variabilité observée n'est également pas significative puisqu'elles vont de 15.31 à 21.17 Wm^{-2}.

Stephens *et al.* (1992) ont étudié la variabilité interannuelle du rayonnement global enregistré à la fondation de recherche sur le Thé au Kenya à l'aide de mesures couvrant la période 1966 à 1986. Ils ont obtenu une valeur annuelle moyenne de 6700 MJm^{-2} avec des valeurs variant entre 6500 et 7000 MJm^{-2}, soit une variation inférieure à ±5%.

Nous avons donc émis l'hypothèse d'une faible variabilité inter annuelle des valeurs de rayonnement global et nous avons considéré le fichier de rayonnement 1983 comme valide pour les autres années de traitement.

6.11b) Obtention de valeurs hebdomadaires.

Les différences enregistrées entre des valeurs moyennes décadaires et des valeurs moyennes hebdomadaires sont inférieures à l'erreur de précision des valeurs de rayonnement global (Dedieu, communication personnelle). Les valeurs décadaires peuvent donc être considérées comme valides en tant que valeurs hebdomadaires. Ainsi, la valeur de rayonnement de la décade la plus proche de chaque date d'enregistrement des données NOAA/AVHRR a été assimilée à une valeur de rayonnement moyen hebdomadaire.

6.11c) Adaptation spatiale.

La résolution des données d'origine étant de 1/4 de degré, les valeurs ont été rééchantillonnées par la méthode "du plus proche voisin" afin d'obtenir des images superposables aux données NOAA/AVHRR, soit une résolution de $1/7^{éme}$ de degré.

6.11d) Précision des valeurs de rayonnement.

Comme nous l'avons déjà vu, l'erreur sur les données décadaires est estimée à 10 % par rapport à la moyenne.

6.12) Adaptation de la valeur d'efficience climatique ε_c.

La valeur de ce paramètre a été fixée à partir de données relevées dans la bibliographie. En fait, comme cela a déjà été mentionné au chapitre II, les valeurs enregistrées varient peu quels que soient : le lieu considéré, les conditions climatiques et le temps d'intégration (Sciecz, 1974 ; Stigter et Musabilha, 1982 ; Meek *et al.*, 1984). Stanhill et Fuchs (1977) ont obtenu des

valeurs journalières de 0.47 ± 0.07 et des valeurs mensuelles de 0.49 ± 0.02. Pour notre travail, nous avons utilisé de façon constante la valeur moyenne de 0.48 fournie par Stigter et Musabilha (1982). Cette donnée est issue de mesures effectuées en régions tropicales. L'erreur de précision absolue estimée pour cette mesure est de ± 0.03.

6.13) Adaptation des valeurs d'efficience de conversion (ε_b).

Ce paramètre nous est apparu comme le paramètre le plus difficile à déterminer. Cette difficulté réside surtout dans le fait, souligné à maintes reprises dans ce document, d'une très faible disponibilité de valeurs d'ε_b dans la bibliographie.

Les valeurs qui seront retenues doivent avoir une validité à l'échelle hebdomadaire et doivent se rapporter aux principaux types de végétation rencontrés dans la zone d'étude. Cette dernière remarque suppose d'avoir au préalable identifié ces différents groupes.

6.13a) Intégration temporelle

Plusieurs auteurs ont observé une relation linéaire entre la matière sèche aérienne accumulée par le couvert végétal et la quantité d'énergie interceptée ou absorbée par ce même couvert (Monteith, 1977 ; Gallagher et Biscoe, 1978; Gosse *et al.*, 1986 ; Siddique *et al.*, 1989). Cependant, lorsque cette linéarité existe, elle n'est observée que durant la phase de croissance végétative et uniquement en conditions d'alimentation hydrique et minérale non limitantes. Dans ces conditions, selon ces auteurs, la valeur d'efficience de conversion peut être considérée comme constante pendant toute la phase de croissance végétative.

Nous avons donc considéré que les valeurs d'ε_b déterminées pendant cette période seront valides pour toute la durée de la phase de croissance quel que soit le pas de temps d'intégration utilisé dans les mesures.

Les limites d'application et de disponibilité de ces valeurs d'ε_b nous ont conduit à formuler de nombreuses hypothèses quant aux caractéristiques de la végétation étudiée. De plus, ces données vont jouer un rôle primordial sur la nature des estimations de production qui seront effectuées dans ce travail.

L'application de ces valeurs sera difficile pendant les premiers stades de croissance du couvert végétal (implication des parties souterraines, problèmes de mesure du rayonnement intercepté, ...). Cependant, cette période est généralement très courte et nous l'avons donc négligée. Par contre, à partir de la phase de maturation l'emploi de ces valeurs d'ε_b est également impossible (sénescence des organes, réorientation des métabolites dans la plante, problèmes d'estimation du rayonnement absorbé, ...). Il faudra donc, dans la suite des travaux, réussir à différencier la phase de croissance de la phase de maturation-sénescence.

6.13b) Disponibilité de valeurs d'efficience de conversion.

Idéalement, les valeurs recherchées pour notre étude devraient correspondre à des travaux concernant des formations savanicoles. Gosse *et al.* (1986), Ruimy (1991) ont procédé à une revue bibliographique sur ce sujet. Seuls trois types de végétation sont représentés par suffisamment de valeurs pour avoir une signification statistique, ce sont : les forêts ombrophiles tropicales, les forêts décidues froides et surtout les mono cultures. Il n'existe malheureusement pas de valeurs se rapportant aux zones savanicoles.

Pour pouvoir déterminer des valeurs d'ε_b utilisables dans ce travail, les valeurs ont été forcées de plusieurs façons.

- Du fait de la faible disponibilité de valeurs d'ε_b ainsi que de la difficulté, à l'heure actuelle, de différencier de façon précise la nature de la végétation comprise dans chaque pixel observé, nous avons décidé de nous limiter uniquement à une distinction entre la végétation herbacée et la végétation arborée.
- La végétation herbacée des zones savanicoles est représentée, en recouvrement, à plus de 80 % par des espèces de type C4 (Schnell, 1976 ; Menaut, 1983). Toute la végétation herbacée a donc été considérée comme étant de type C4. La végétation arborée est, quant à elle, de type C3.
- Pour la **végétation arborée** de type tropical, seules sont disponibles des valeurs d'ε_b concernant les forêts ombrophiles. Deux valeurs se rapportent à des mesures faites en Côte d'Ivoire et conduisent à une moyenne de **0.52 g MS aérienne/MJ RPA intercepté** (Müller et Nielson, 1965 ; Bernhart-Reversat *et al.*, 1978).
- Les données concernant la strate arborée des savanes boisées, arborées et arbustives étant inexistantes, une valeur de ε_b identique à celle observée en forêt dense a été utilisée.
- Enfin, pour ce qui concerne la **végétation herbacée** savanicole, les données faisant également défaut, nous avons été obligés de choisir une valeur de ε_b parmi les données concernant les cultures de type C4. La valeur de ε_b retenue a été celle obtenue pour une **culture** de *Panicum maximum* **(plante perenne)** effectuée en Côte d'Ivoire, soit **2.39 g MS aérienne/MJ RPA intercepté** (Gosse *et al.*, 1986). Dans les formations savanicoles, plusieurs espèces de *Panicum* sont présentes telles que : *P. maximum*, *P. phragmitoides*, *P. turgidum*, cette dernière est d'ailleurs l'une des espèces les plus recensées dans les formations herbacées sahéliennes (Schnell, 1976).

La faible disponibilité de valeurs de ε_b empêchant l'utilisation de valeurs appropriées va avoir des conséquences directes sur les résultats obtenus dans ce travail.

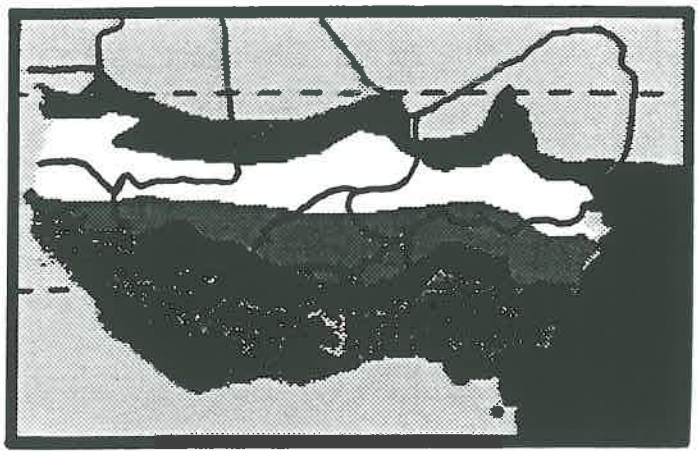
- Les estimations correspondront à de la **production primaire nette** et ne concerneront que la production **épigée**.

- Les valeurs de **production herbacées** seront à considérer en tant que valeurs **potentielles**. En effet, la valeur d'ε_b fournie pour *Panicum maximum* a été estimée à l'aide de plantes élevées en conditions non limitantes en alimentation hydrique et minérale.

- Bien que n'ayant pas d'autres mesures concernant des espèces herbacées savanicoles, les *Panicum maximum* semblent présenter une des croissances les plus fortes parmi les espèces savanicoles (Lavenu, F.; Menaut, J.C.; communications personnelles). Cette remarque renforce l'idée d'une représentativité potentielle des valeurs de productions herbacées estimées dans ce travail.

- La valeur d'ε_b utilisée dans ce travail est une valeur de conversion de l'énergie lumineuse en matière sèche aérienne. Or, cette valeur dépend fortement de la proportion des assimilats qui sont investis dans le système racinaire. Plusieurs éléments vont influer sur cette répartition. Tout d'abord, comme cela a déjà été mentionné de façon générale pour ε_b, la valeur dépendra de l'espèce végétale considérée. Ensuite, il existe de fortes différences de valeurs entre les plantes annuelles et les plantes perennes. En effet, pour ces dernières, le système racinaire constitue généralement l'organe de réserve et de survie de la plante durant la phase d'inactivité photosynthétique. Du fait de la lourdeur du travail et des nombreuses difficultés rencontrées lors de prélèvements d'échantillons racinaires, les résultats des travaux existant dans la bibliographie sont généralement très controversés. Cependant, dans l'état actuel des connaissances, il est souvent admis que la production racinaire représente 10 % de la production totale chez les plantes annuelles alors qu'elle vaut environ 50% chez les plantes perennes. Ainsi, à niveau d'activité photosynthétique et à niveau d'interception du rayonnement solaire indentiques, une plante annuelle aura une efficience de conversion de l'énergie en matière sèche aérienne supérieure à celle d'une plante perenne. La distinction entre ces deux groupes de plantes serait donc nécessaire, ceci d'autant plus que la répartition entre les annuelles et les perennes n'est pas constante tout au long du transect étudié dans ce travail. Alors que les perennes composent la majorité du tapis herbacé dans le sud du transect, ce sont les annuelles qui prédominent dans la flore herbacée sahélienne. La transition s'opére de façon relativement rapide entre le $10^{éme}$ et $12^{éme}$ degré de latitude nord. Cependant, en l'absence de valeurs d'ε_b permettant de caractériser ces deux groupes, une valeur constante a été utilisée pour tout le transect. De plus, actuellement, la distinction entre plantes annuelles et plantes perennes ne peut se faire que par une détermination sur le terrain. La disponibilité du sol en éléments minéraux ainsi qu'en eau constitue un autre facteur important agissant sur le niveau de productivité aérienne. Ainsi, en système cultivé intensif, les plantes n'ont pas à investir dans un système racinaire important pour pouvoir extraire tous les éléments dont elles ont besoin. L'essentiel de la production primaire totale est donc alloué aux parties aériennes. Les valeurs trouvées dans la littérature concernant le rapport production souterraine/production aérienne vont de 0.05 à 0.2 pour les plantes cultivées ce qui est largement inférieur aux valeurs mesurées pour les prairies naturelles soit 0.75 (Ruimy, 1991).

- La valeur d'ε_b obtenue pour la forêt dense sempervirente est très faible par rapport à celle retenue pour la végétation herbacée. Certains auteurs pensent que dans les écosystèmes de



Carte de la végétation (AETFAT. 1983)

mer

déserts

steppes sub-désertiques

steppes sahéliennes

forêts claires indifférenciées

forêts claires soudanniennes

savanes guinéennes herbeuses, arbustives, boisées

forêts denses humides

Figure 6.1 : Carte numérisée de la végétation de l'Afrique de l'ouest établie à partir de la carte de la végétation AETFAT/UNESCO/UNSO (1983)

forêts denses, la température constamment élevée conduit à un fort taux de respiration et, par conséquent à une diminution de la production primaire nette. De plus, la faible productivité aérienne résulte certainement d'un fort investissement des assimilats dans les parties racinaires. Face à cela, la valeur de végétation herbacée à été déterminée pour une plante ayant bénéficié de conditions favorables (fertilisation, irrigation). De surcroît, s'agissant d'une plante cultivée, cette variété de *Panicum* est certainement issue d'un programme de selection ayant fixé les espèces à forte efficience photosynthétique.

- Faute de données concernant les arbres des formations savanicoles, leur efficience photochimique a été considérée identique à celle des arbres de forêts denses. Il n'est cependant pas possible d'évaluer le niveau d'erreur entrainé par cette hypothèse.

6.13c) Intégration spatiale, différentiation de la végétation arborée et de la végétation herbacée

L'utilisation de données satellitaires implique l'intégration, pour un pixel donné, de la réponse due au sol, aux herbes et aux arbres. Cependant, pour fixer une valeur de ε_b il est souhaitable de pouvoir différencier, au minimum, les herbes des arbres. Pour avoir une estimation du pourcentage arbre/herbe contenu dans un pixel, deux types de solutions ont ete adoptées.

La première (1) est basée sur l'utilisation de l'information fournie par les cartes de végétation, la seconde (2) consiste à déterminer le pourcentage arbre/herbe à partir de données satellitaires.

(1) - Plusieurs cartes existent concernant la classification de la végétation de certaines régions africaines. Ces cartes sont basées sur différents critères (floristique, édaphique, physionomique, ...) et les terminologies utilisées pour définir la végétation varient d'un auteur à l'autre ce qui rend les comparaisons difficiles (Schnell, 1976). Cependant, il existe à l'échelle continentale, une carte de la végétation naturelle potentielle de l'Afrique au 1:5.000.000 qui a été dressée par White (1983). Elle résulte de la collaboration entre l'AETFAT, l'UNESCO et l'UNSO (voir liste des sigles en annexe). Cette carte présente l'avantage d'être établie en grande partie à partir des critères de classification de la végétation africaine définis lors du colloque de Yangambi (Anonymous, 1956) qui fait largement office de référence dans la communauté scientifique. De plus, de par le faible nombre de classes que comporte cette carte, il est plus facile de fixer pour chaque classe des valeurs moyennes de recouvrement arboré et herbacé. C'est donc cette carte qui a été utilisée dans notre travail après avoir été numérisée afin de constituer une image superposable aux données NOAA/AVHRR (fig. 6.1).

Dans les formations savanicoles, une strate herbacée est présente sous la strate arborée. Cependant, certains auteurs considèrent qu'il existe des phénomènes de compétition entre ces deux strates (Walter *in* Menaut, 1983). Fournier (1987) a observé cette influence dépressive le

Situation topographique et formation végétale	Couvert ligneux (tous ligneux)	Phytomasse maximale t/ha (poids de matière sèche)
Savane arbustive à *Combretum collinum* haut de pente.	15 %	5,31 ± 1,24
Savane arbustive à *Combretum collinum* haut de pente.	17 %	4,89 ± 2,04
Savane boisée à *Terminalia avicennioides*	27 %	4,91 ± 1,06
Savane arbustive à *Pteleopsis suberosa* et *Detarium microcarpum* bas de pente	32 %	3,72 ± 1,11
Savane boisées à *Pteleopsis suberosa* bas de pente	28 %	3,97 ± 1,16
Savane boisée à *Combretum collinum* et *Detarium microcarpum* bas de pente	39 %	3,73 ± 1,73
Savane boisée à *Pteleopsis suberosa* plateau	47 %	3,30 ± 1,50

Tableau 6.2 : influence dépressive du couvert ligneux sur la phytomasse maximale, exemple d'une toposéquence à Nazinga en zone soudanienne (Burkina Faso), année 1984.

D'après Fournier (1987).

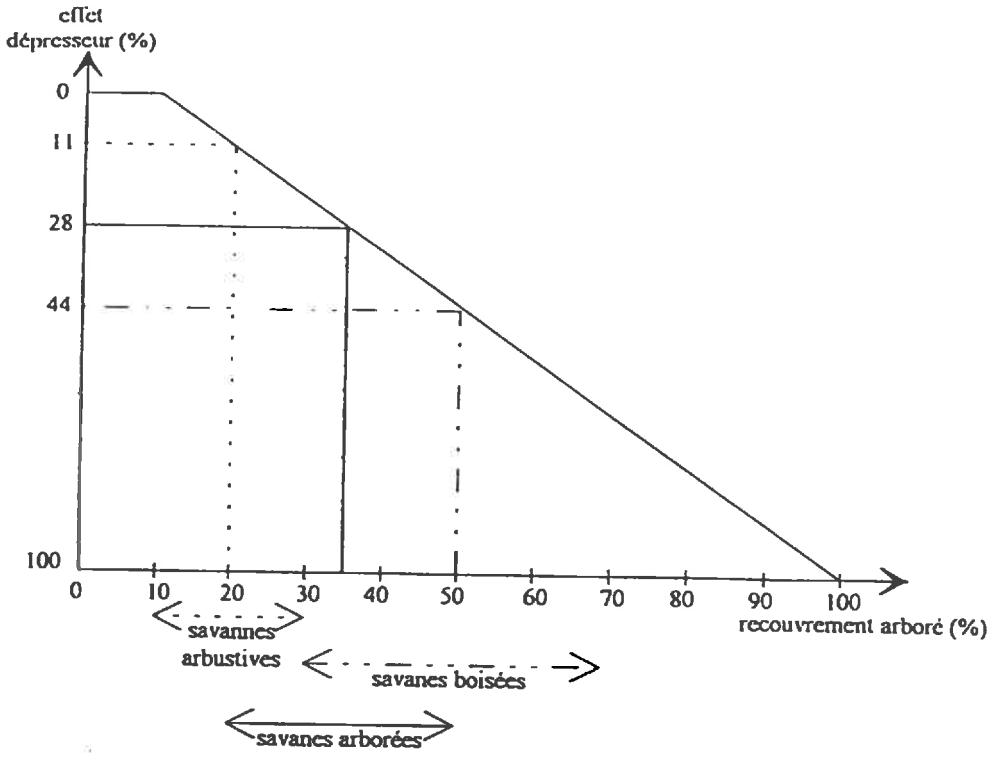


Figure 6.2 : Influence dépressive des ligneux sur la phytomasse herbacée. Valeurs théoriques estimées à partir de données bibliographiques. Adaptation effectuée en fonction des classes de végétation de la carte de l'AETFAT.

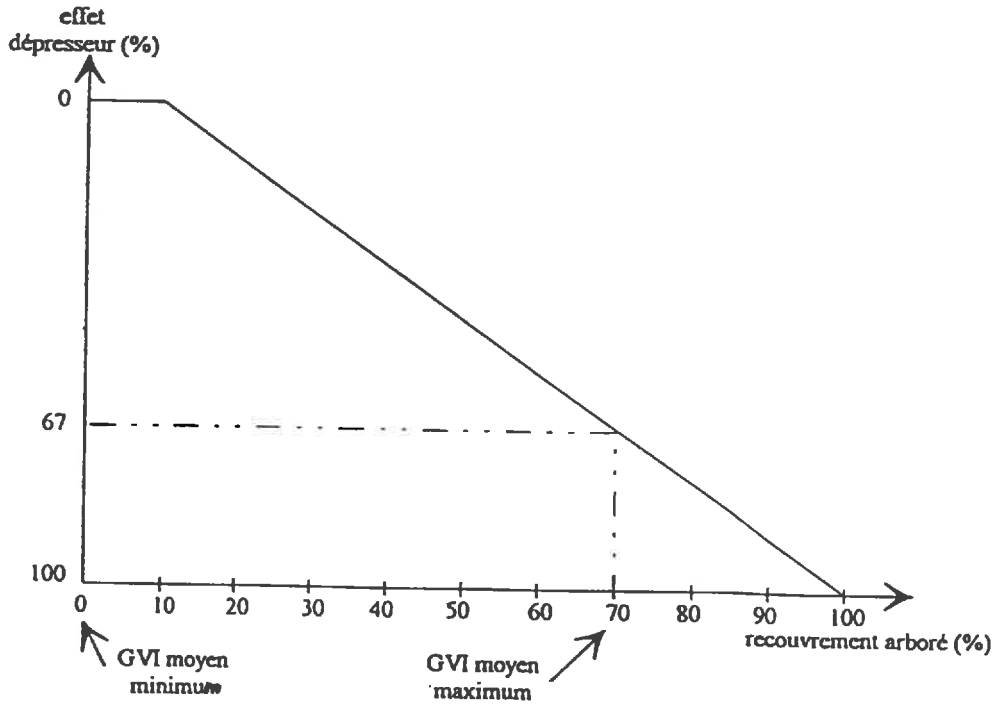


Figure 6.3 : Influence dépressive des ligneux sur la phytomasse herbacée. Valeurs théoriques estimées à partir de données bibliographiques. Adaptation effectuée en fonction des valeurs d'indices de végétation moyens annuels.

long d'une toposéquence à Nazinga (tabl.6.2). Elle cite cependant Sanford (1982) qui constate que pour des recouvrements ligneux faibles, la production herbacée serait au contraire favorisée. Le couvert ligneux, sans trop limiter la lumière protégerait la strate herbacée d'un échauffement excessif préjudiciable à la photosynthèse.

A partir des ces différents éléments, j'ai tenté de constituer un diagramme, fixant pour chaque grande formation savanicole contenue dans la carte de l'AETFAT, les bornes minimales et maximales de recouvrement ligneux ainsi que les valeurs d'influence dépressive sur la strate herbacée (fig. 6.2). Cependant, la détermination de ces valeurs pour chaque classe de végétation est également difficile car, de façon similaire aux valeurs d'ε_b, ces données font défaut dans la bibliographie. En effet, la discrimination de la végétation dans la classification de Yangambi est principalement basée sur la hauteur respective des différentes strates (herbacée, arbustive, arborée). De ce fait, dans les descriptions de milieu effectuées dans la bibliographie, la notion de recouvrement est rarement abordée. Dans cette étude, je me suis principalement basé sur les données issues des travaux de Fournier (1987) et qui concernent plusieurs types de savanes d'Afrique de l'ouest

Ensuite, à l'aide du diagramme généré (Fig. 6.2), une pondération des valeurs de ε_b a été effectuée pour chaque pixel après avoir repéré sa classe d'appartenance dans la carte de l'AETFAT.

Ainsi, pour chaque pixel, les valeurs de production sont déterminées à partir de :

- (100 - x % recouvrement arboré) d'herbacées avec une valeur d'ε_b de 2.39 g MS/MJ RPAi ;
- (x % recouvrement arboré) d'herbacées avec une valeur d'ε_b minorée de l'influence dépressive des ligneux ;
- x % d'arbres avec une valeur de ε_b de 0.52 g MS/MJ RPAi.

(2) - Une carte de végétation, eu égard à la lourdeur du travail nécessaire, ne peut être remise à jour fréquemment. Elle ne permet donc pas de rendre compte de l'évolution de la végétation ainsi que des variations rapides qui peuvent intervenir (déforestation, désertification). De plus, le passage d'un type de végétation à un autre se fait généralement par l'intermédiaire de zones de transition plus ou moins étendues et non de façon brusque comme l'entraîne une représentation cartographique. J'ai donc tenté de fixer les pourcentages arbre/herbe directement à partir des données satellitaires disponibles. Sur la base des travaux effectués par Justice *et al.* (1985) ; Justice *et al.* (1986) ; Goward *et al.* (1987), l'hypothèse d'une forte dépendance entre les courbes d'évolution temporelle du GVI enregistré et la phénologie de la végétation observée par le satellite a été émise.

Le critère de sélection utilisé a été la valeur du GVI moyen annuel. Deux bornes ont été fixées. La première représente la limite des zones de déserts, la seconde la limite des zones de forêts denses. Entre ces deux valeurs de GVI moyen, les valeurs de recouvrement arboré ont été fixées selon une décroissance linéaire régulière depuis la valeur de GVI moyen forêt jusqu'au GVI moyen désert (fig 6.3). Les deux valeurs bornes de GVI sont déterminées à l'aide des

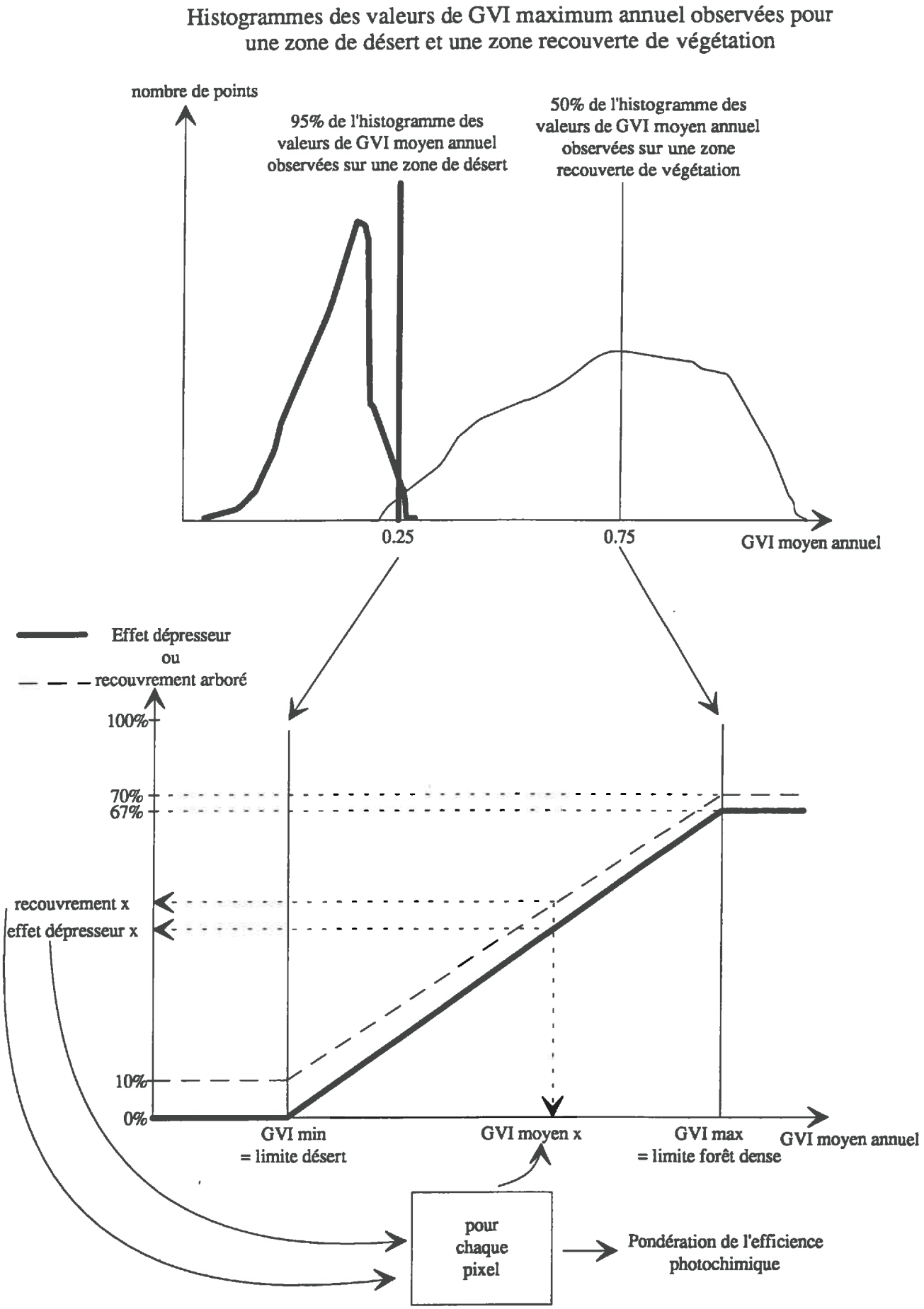


Figure 6.4 : méthode de détermination des valeurs de recouvrement arboré et d'effet dépresseur en fonction des valeurs de GVI moyen annuel

histogrammes des valeurs de GVI maximum annuels générés pour une zone centrée sur le désert (24° nord - 16° nord ; 14° ouest - 13° est) et une zone centrée sur les régions végétalisées (5° nord - 10° nord ; 10° ouest - 5° est). La valeur de GVI moyen équivalant à la valeur 95 % de l'histogramme des GVI maximum sur la zone désert a été considérée comme la limite des zones de déserts (Fig. 6.4). La valeur de GVI moyen correspondant à la valeur moyenne de l'histogramme des valeurs de GVI maximum rencontrés sur la zone végétation a été retenue comme limite de la forêt dense (Fig. 6.4). Ainsi, par cette démarche, seule la transition en limite de classe "forêt dense" se fait de façon brutale.

6.13d) Précision des valeurs d'efficience de conversion.

Les sources d'erreurs concernant les valeurs d'ε_b sont nombreuses. Elles proviennent :

- des différentes approximations faites dans ce travail ;
- des incertitudes sur les mesures effectuées lors de la détermination des valeurs d'ε_b ;
- des différences dues aux différentes méthodes d'échantillonnage utilisées dans les travaux (phytomasse maximale, coupes successives, rayonnement absorbé ou rayonnement intercepté, ...) ;
- des différences d'efficience de conversion qui existent entre les nombreuses espèces qui composent le milieu d'étude et les deux valeurs retenues dans ce travail.

S'il est évident que ce paramètre est entaché d'une forte imprécision, il est très difficile de la quantifier. Cependant, nous choisirons de prendre les variations de valeurs de ε_b observées dans la bibliographie pour la classe des plantes cultivées soit une moyenne de 2.26 g MS épigée/MJ/RPAa ±0.70 g MS/MJ/RPAa qui correspond à une erreur relative de 30 %. Bien que les plantes cultivées soient largement plus étudiées que la végétation naturelle, il n'est pas évident que la précision des mesures soient pour autant améliorée. On peut donc ainsi émettre l'hypothèse d'une similitude de niveau d'imprécision entre ces deux types de végétation.

6.14) Adaptation des valeurs d'efficience d'interception (ε_i)

Comme nous l'avons vu dans le chapitre III, l'existence d'une forte correlation entre le NDVI et le rayonnement intercepté par un couvert végétal homogène sur un sol homogène a été mise en évidence par plusieurs auteurs (Asrar *et al.*, 1984 ; Sellers, 1985). Dans la majorité des études, cette relation, mesurée ou obtenue à l'aide de simulations, est de la forme linéaire. Nous avons donc décidé d'utiliser ces résultats pour estimer les valeurs d'efficience d'interception à intégrer dans cette étude.

Lorsque l'on veut travailler à une l'échelle régionale, les équations des relations RPA_i/ε_i obtenues par les auteurs cités ci-dessus, ne peuvent être utilisées directement. Elles ont été établies localement et la valeur de l'équation varie pour chaque type de couvert étudié. De plus, les mesures radiométriques ont été effectuées à l'aide de radiomètres au sol. Bien que certains modèles existent, la mise en correspondance de valeurs radiométriques mesurées au sol et celles

obtenues par les satellites NOAA/AVHRR est très difficile à réaliser. En effet, les renseignements utiles au fonctionnement de ces modèles (conditions atmosphériques, conditions de visée lors de la mesure) sont rarement tous connus. Il est donc nécessaire d'établir une relation NDVI/ε_i directement à partir des données spatiales.

6.14a) Détermination de la valeur de GVI correspondant à l'efficience minimale d'interception.

Pour une interception égale à 0, donc dans le cas où la végétation est absente, le choix de l'indice seuil (GVImin) doit être fait parmi les valeurs correspondant à un sol nu. Les valeurs de GVI observées sur les zones de désert s'étalent sur une large gamme de valeurs. Nous avons donc cherché à adopter une méthode permettant d'éliminer toutes les valeurs de GVI comprises dans cette gamme. Pour chaque année de traitement et pour chaque pixel de la zone étudiée, la valeur de GVI la plus élevée a été extraite. Des images de GVI maximum ont ainsi été obtenues. Ensuite, la valeur "**GVI sol nu**" retenue a été la valeur correspondant à **95 % de l'histogramme des valeurs de GVI maximum annuel, issues d'une zone centrée sur le désert** (16 à 24° Nord - 16° Ouest à 14° Est). La valeur 95 % de l'histogramme est préférée à la valeur maximale (100 %) afin d'éliminer les valeurs marginales extrêmes pouvant résulter d'erreurs intervenant pendant les différentes phases de traitement des données.

6.14b) Détermination de la valeur de GVI correspondant à l'efficience maximale d'interception.

L'efficience d'interception est maximale lorsque le couvert végétal est entièrement couvrant. Pour la plupart des espèces végétales, donc pour un nombre élevé de structures de couvert, la valeur 100 % de recouvrement est observée pour des indices foliaires relativement faibles 3.5 à 4 (Hipps *et al.*, 1983 ; Huete *et al.*, 1985). Si l'on considère ensuite le comportement du NDVI par rapport au LAI, on observe également une saturation pour des valeurs de LAI similaires (Asrar *et al.*, 1984 ; Huete *et al.*, 1985). Les études de modélisation des relations NDVI/LAI ont également montré une saturation du NDVI pour des valeurs de LAI >= 3.5 (Sellers, 1985). Dans notre cas d'étude, c'est donc la valeur de GVI la plus forte qui doit être retenue en tant que valeur correspondant à l'**efficience d'interception maximale.** Nous avons donc déterminé ce point en prenant la valeur correspondant à **95 % de l'histogramme des valeurs de GVI maximum annuel issues de zones non désertiques** (5 à 12° Nord, 10° Ouest à 8° Est). La valeur d'efficience d'interception maximale a, quant à elle, été fixée à 0.95.

Pour chaque année, une relation linéaire de la forme $\varepsilon_i = (a \,.\, GVI) + b$ a été calculée à l'aide de ces deux points (tab. 6.3).

Année	GVI min	GVI max	relation εi = f (GVI)
1986	0.233	0.881	εi = (1.466 x GVI) - 0.341
1987	0.262	0.947	εi = (1.387 x GVI) - 0.363
1989	0.257	0.853	εi = (1.594 x GVI) - 0.410
1990	0.290	0.947	εi = (1.446 x GVI) - 0.419
1991	0.257	0.914	εi = (1.446 x GVI) - 0.372

Tableau 6.3 : Valeurs de GVI min, GVI max et relations εi = f (GVI) déterminées, pour les 5 années d'études, à partir des données NOAA/AVHRR étalonnées, corrigées et filtrées.

6.14c) Validité de la relation ε_i/GVI pour un pas de temps hebdomadaire.

L'existence d'une relation linéaire entre ε_i et le NDVI n'a été démontrée et discutée que pour des pas de temps n'excédant pas une journée. L'application d'une équation valide pour une semaine suppose que l'on aboutisse à l'utilisation d'une valeur moyenne d'efficience d'interception. Dans notre cas d'étude, cela nous contraint à faire correspondre une valeur moyenne hebdomadaire d'ε_i à une mesure instantanée de GVI. Cette hypothèse ne peut être envisagée que si les valeurs de GVI retenues sont bien représentatives de l'état moyen du couvert durant chaque semaine. Cela veut dire que les mesures ne doivent pas avoir été bruitées par la présence de nuages, la présence d'aérosols ou des conditions d'angles de mesure trop perturbatrices. La méthode Maximum Value Composite développée par Holben (1986) est appliquée lors de la synthèse des données GVI par la N.O.A.A. Bien que cette sélection des valeurs de GVI les plus fortes enregistrées sur une semaine permette d'éliminer une partie du bruit, de nombreux travaux ont montré que cette synthèse n'est pas suffisante (Goward *et al.*, 1991). En plus des problèmes de comparaison interannuelle des données satellitaires, c'est également dans le but d'améliorer le filtrage des effets perturbateurs que nous avons décidé d'effectuer plusieurs prétraitements des données de réflectance.

6.14d) Précision des valeurs de ε_i

Les sources d'erreur qui affectent ce paramètre sont multiples. Elles vont provenir de l'incertitude due à l'ajustement de la relation NDVI/ε_i par une loi linéaire. Elles proviennent également de l'erreur comprise dans les valeurs de NDVI. Huete *et al.* (1985) ont montré, dans une étude concernant des plantations de coton, que le sol a un effet perturbateur sur les mesures radiométriques pour des taux de recouvrement herbacé allant jusqu'à 70%. L'influence exercée ne se fait pas de façon constante, si bien qu'il est difficile à l'heure actuelle, et malgré les tentatives de génération d'indices destinés à s'affranchir de ce problème (PVI, Richarson et Wiegand, 1977 ; SAVI, Huete, 1988 ; TSAVI, Baret et Guyot, 1991), d'éliminer entièrement ces perturbations.

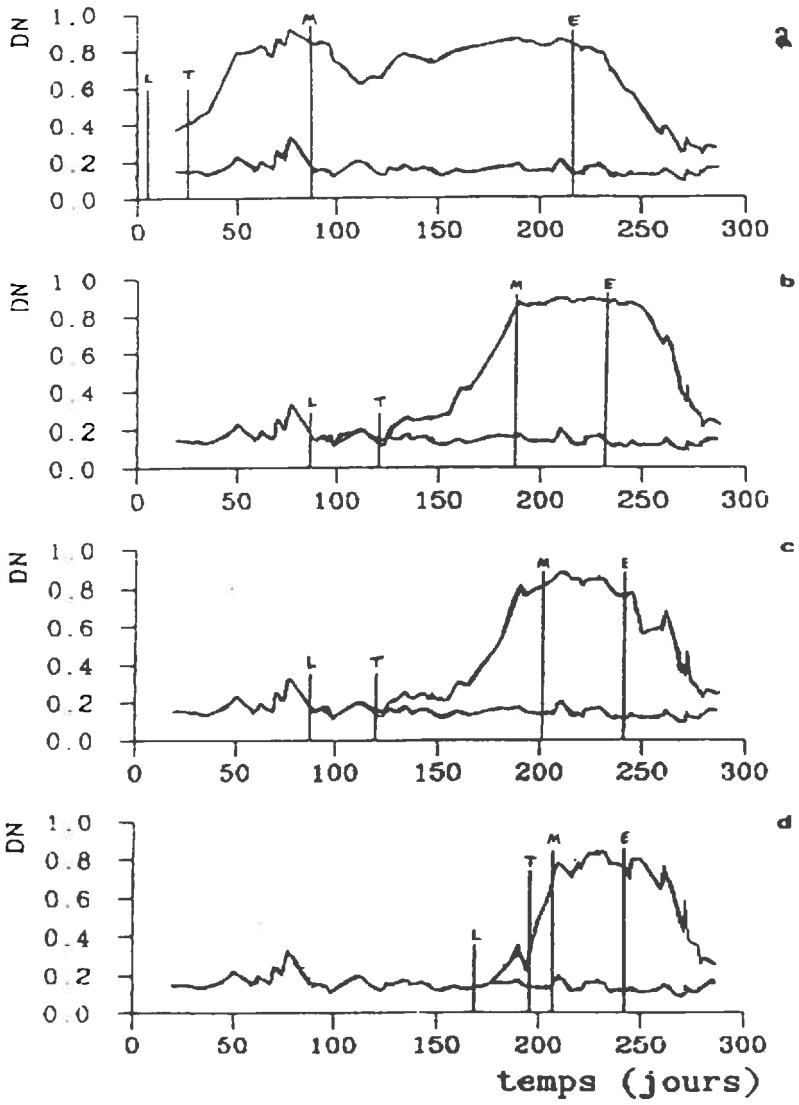


Figure 6.5 : Evolution de l'indice de végétation mesuré au sol pour quatre types de couvert de blé.(a:Fidel 1, b:Fidel 2, c:Arminda 2, d:Fidel 3, les numèros correspondant à différentes dates de semis). (L=levée, T=début tallage, M=stade épis à 1 cm; E=épiaison). La courbe du bas correspond aux mesures faites sur le sol nu.

d'après Baret et Olioso,(1989).

Baret et Guyot (1991) ont modélisé l'influence conjointe du sol et de l'inclinaison foliaire sur l'estimation du rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par l'intermédiaire du NDVI. L'erreur relative, calculée sur les valeurs de RPA_a, ne devient inférieure à 10 % que lorsque l'absorption par le couvert du RPA incident devient supérieure à 60 %. Pour les faibles valeurs d'absorption du RPA, l'erreur relative peut atteindre 60 %.

Toutes les études ont été effectuées pour un couvert homogène observé sur un sol homogène. Or, dans le milieu étudié, peu de régions présentent une homogénéité structurale sur une surface de 15 x 15 km. L'erreur entrainée sur l'estimation de l'efficience d'interception sera donc d'autant plus forte que le milieu considéré sera hétérogène. Malheureusement, les études concernant cet effet étant, à ma connaissance inexistantes, il est impossible de quantifier l'erreur occasionnée.

6.15) Estimation de la longueur du cycle végétatif.

En toute logique, la période pendant laquelle le modèle doit être appliqué est celle pendant laquelle la végétation est active. Cependant, comme nous l'avons vu précédemment dans l'exposé, certains paramètres ne sont valides que dans des conditions particulières. Il en est ainsi des valeurs d'ε_b dont le domaine d'application est la période de croissance végétative. De même, la linéarité entre les valeurs d'efficience d'interception ou d'absorption du RPA et les valeurs de NDVI n'a été observée que pendant cette même période.

Pour de nombreuses plantes, il a été observé un début de sénescence dès le stade d'épiaison-maturation des graines. A partir de ce stade, une forte décroissance de ε_b est observée (Varlet-Grancher *et al.*, 1982).

J'ai donc décidé de **limiter le temps d'intégration à la phase de croissance végétative.** Pour déterminer cette période, les données satellitaires ont été utilisées en formulant les hypothèses suivantes :

- L'évolution du signal corrigé reflète bien l'évolution de la végétation observée. Par l'intensité de l'absorption enregistrée dans le canal visible de NOAA/AVHRR on a un reflet de la plus ou moins forte activité photosynthétique du couvert observé. Par l'intensité de la réflexion dans le canal proche infrarouge, ce sont surtout les caractéristiques de type surfaces végétales actives ou sénescentes qui conditionnent le signal. Ces informations semblent suffisantes pour pouvoir, par un suivi temporel de l'évolution du signal, déterminer des cycles de végétation ;

- La fin de la période de croissance végétative ou le début de la phase d'épiaison/maturation correspond à la période de biomasse aérienne maximale et également à la période où le NDVI est le plus élevé. Des mesures radiométriques effectuées au sol confirment ces hypothèses. Ainsi, sur la figure 6.5 on peut observer une très forte corrélation entre la succession des différents stades phénologiques de cultures de Blé et l'évolution du NDVI correspondant (Baret et Olioso, 1989) ;

- Le NDVI atteint sa valeur la plus faible lorsque la végétation herbacée est absente ;

- Sur tout le transect étudié, quelle que soit la végétation présente, le cycle végétatif se met en place avant le 15 août. De même, quelle que soit la zone considérée, nous avons estimé que sur l'ensemble de l'Afrique de l'ouest, aucun type de végétation devient sénescent avant la mi-août ;

- Dès que le stade d'épiaison/maturation est atteint, la valeur d'ε_b décroît très fortement et la quantité de matière sèche aérienne produite à partir de cette phase est considérée comme négligeable ;

A partir de ces hypothèses, la longueur de la phase de croissance a été établie, pour chaque pixel, comme la durée comprise entre la date pour laquelle on observe la valeur de GVI la plus faible, observée avant le 15 août, et la date pour laquelle on observe la valeur la plus forte, observée après le 15 août. L'utilisation de cette date arbitraire permet, lorsque deux ou plusieurs pics de GVI apparaissent dans le signal, de ne retenir que celui intervenant le plus tard dans la saison.

Quand les valeurs minimales de GVI ont été inférieures à la valeur GVImin déterminée pour la relation GVI/ε_i, c'est la date à laquelle la valeur de GVI devient inférieure à GVImin qui a été retenue.

Lorsque les valeurs de NDVI demeurent élevées tout le long du cycle, le pixel est considéré comme recouvert majoritairement par des arbres et la longueur du cycle est fixée à un an.

6.16) Etude de sensibilité

L'équation utilisée dans le modèle est de la forme :

$$PPN = \sum_{x=0}^{x=n} \varepsilon_s * \varepsilon_i * \varepsilon_b * Rg * \Delta t$$

avec : $\varepsilon_i = a + b * GVI$

En prenant comme hypothèse que les différents paramètres de l'équation sont indépendants les uns des autres, l'erreur absolue commise sur les valeurs de PPN et due à l'erreur intrinsèque de chacun des paramètres peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{\Delta PPN}{PPN} = \frac{\Delta \varepsilon_c}{\varepsilon_c} + \frac{\Delta \varepsilon_i}{\varepsilon_i} + \frac{\Delta \varepsilon_b}{\varepsilon_b} + \frac{\Delta Rg}{Rg}$$

où $\Delta\varepsilon_c$, $\Delta\varepsilon_b$, $\Delta\varepsilon_i$ et ΔRg sont les erreurs aléatoires commises sur ε_c, ε_b, ε_i, et Rg. Les caractéristiques statistiques des variables du modèle de production sont données dans le tableau 6.4.

variable	ε_c	ε_i	ε_b g MS/MJ RPAi	Rg W m^{-2}
moyenne	0.48	0.4	2.39	260
écart-type	0.03	0.066	0.7	26
référence	(1)	(2)	(3)	(4)

Tableau 6.4 : Caractéristiques statistiques des paramètres du modèle de production

(1) d'après Stigter and Musabilha (1982)
(2) d'après Asrar *et al.* (1984)
(3) d'après Ruimy (1991)
(4) d'après Dedieu *et al.* (1987a)

Lorsque les valeurs moyennes référencées dans le tableau 6.4 sont appliquées, **la valeur de PPN moyenne hebdomadaire obtenue est de 0.72 t MS ha^{-1}**. Les variations de PPN dues à chacun des paramètres de l'équation sont rassemblées dans le tableau 6.5.

variable	ε_c	ε_i	ε_b g MS/MJ RPAi	Rg W m^{-2}	total
variation absolue	±0.045	±0.119	±0.211	±0.072	±0.447
variation relative	±6.25%	±16.50%	±29.30%	±10.00%	±62.00%
$\frac{\text{variation}}{\text{variation totale}}$	10.0%	**26.6%**	**47.3%**	16.1%	100.0%

Tableau 6.5 : Variations de la PPN moyenne hebdomadaire dues à chacun des paramètres du modèle de production.

Lorsque l'on considère le tableau 6.5, on s'apperçoit que les problèmes actuels de mesure ou de détermination des paramètres du modèle sont importants car ils occasionnent une erreur totale sur l'estimation de la PPN qui peut aller jusqu'à 62 %. L'efficience photochimique est à elle seule responsable de près de la moitié de cette variation. L'efficience d'interception du rayonnement explique, quant à elle, plus du quart de l'erreur totale. Ces chiffres confirment bien, comme nous l'avons plusieurs fois mentionné, la nécessité de porter les efforts de connaissance et de mesures sur ces deux facteurs.

CHAPITRE VII

RESULTATS - DISCUSSION

CHAPITRE VII

RESULTATS - DISCUSSION

7.1) Détermination de la longueur des cycles de végétation

Plusieurs travaux ont permis de montrer de fortes corrélations entre l'évolution du signal radiométrique mesuré au sol et le cycle de végétation du couvert observé. L'hypothèse d'une obtention de courbes similaires à partir de mesures d'origine satellitaire a donc été testée.

Lorsque les données corrigées de l'influence de l'atmosphère mais non filtrées ont été utilisées, la démarche, expliquée dans le chapitre précédent, s'est avérée infructueuse. Ceci peut s'expliquer aisément lorsque l'on observe l'allure générale des évolutions temporelles de NDVI. Ainsi, on peut voir sur la figure 7.1 que la forte variation haute fréquence qui subsiste dans les données corrigées, conduit à des déterminations aléatoires des dates de début et de fin de cycle. Par contre, lorsque l'on utilise les données filtrées, on assiste à une nette amélioration des résultats (fig 7.1). Cette amélioration consiste en plusieurs points :

- L'élimination, par les différents filtres, d'une forte proportion des fluctuations du signal conduit à des courbes lissées dont les différentes phases sont plus facilement discernables.

- Le seuillage des nuages, combiné au filtrage "BISE" utilisant une large "fenêtre" conduit, dans les zones de forêts denses sempervirentes, à un relèvement et à un lissage des valeurs de NDVI (Fig 7.2). Les courbes obtenues sont plus semblables à ce que l'on s'attend à observer pour ce genre de végétation, c'est à dire une valeur de NDVI proche du maximum et quasiment constante tout au long de l'année. Les valeurs de NDVI observées sur cette figure oscillent entre 0.75 et 0.85 et sont proches de la valeur maximale (0.89) obtenue par Baret et Olioso (1989). Cette valeur a été comparée favorablement par ces auteurs avec la valeur maximale de 0.90 déterminée à l'aide du modèle SAIL (Verhoef, 1984).

- Lors de l'utilisation des valeurs de NDVI filtrées pour estimer la production primaire, on peut penser que la qualité des résultats sera améliorée de deux façons. Tout d'abord, une grande partie des variations haute fréquence de NDVI que l'on ne pense pas dues à une réalité biologique sont éliminées. Ensuite, ces données rendent possible l'identification de "longueurs de cycle de végétation". Par l'intermédiaire de ces derniers, on peut procéder à une élimination sinon à une réduction des valeurs de NDVI ne correspondant pas à un couvert photosynthétiquement actif (fig 7.3).

Sur la figure 7.4 ont été reportées les longueurs de cycles déterminées pour l'année 1986. On assiste bien à une augmentation régulière de la longueur du cycle végétatif du nord vers le sud du transect. Il semble cependant que seuls les cycles courts (< 4 mois) et les cycles longs (> 10 mois) puissent être différenciés sans trop d'erreurs. Par exemple sur la figure 7.3 obtenue pour un pixel situé au Sénégal, les dates de début et fin de cycle sont cohérentes avec les périodes de végétation généralement observées dans cette région.

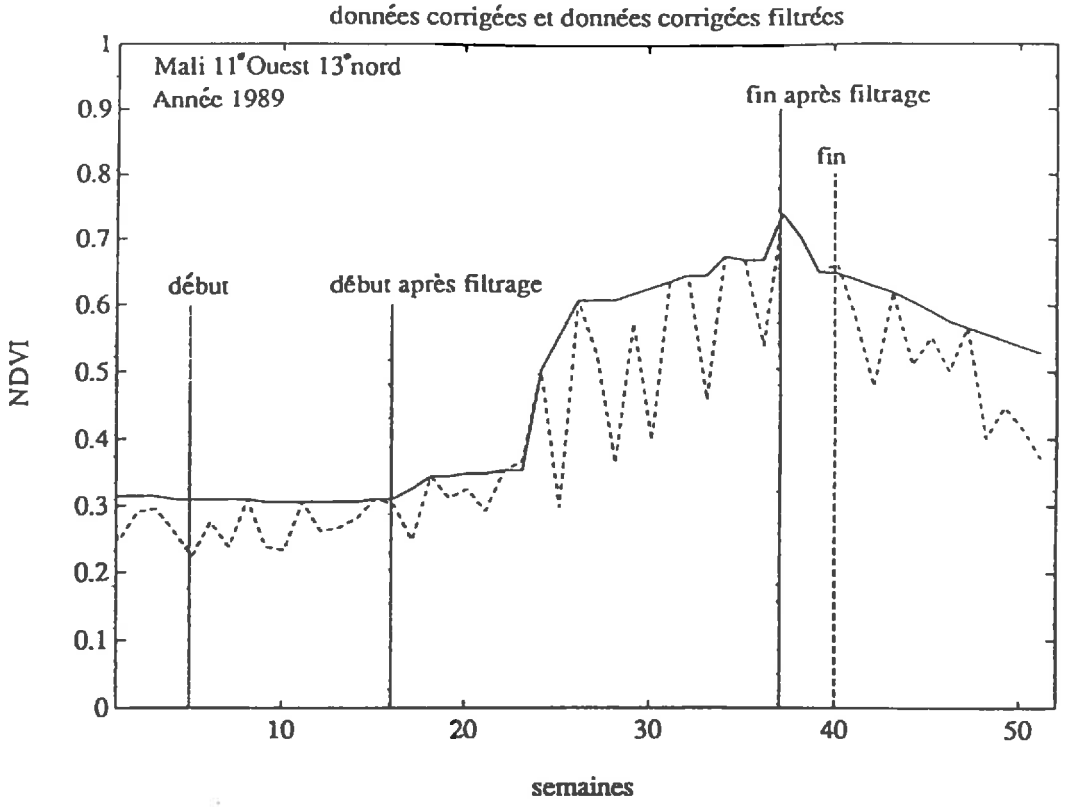


Figure 7.1 : Exemple de cycles de végétation déterminés à partir de l'évolution annuelle du NDVI pour des données corrigées et des données corrigées filtrées.

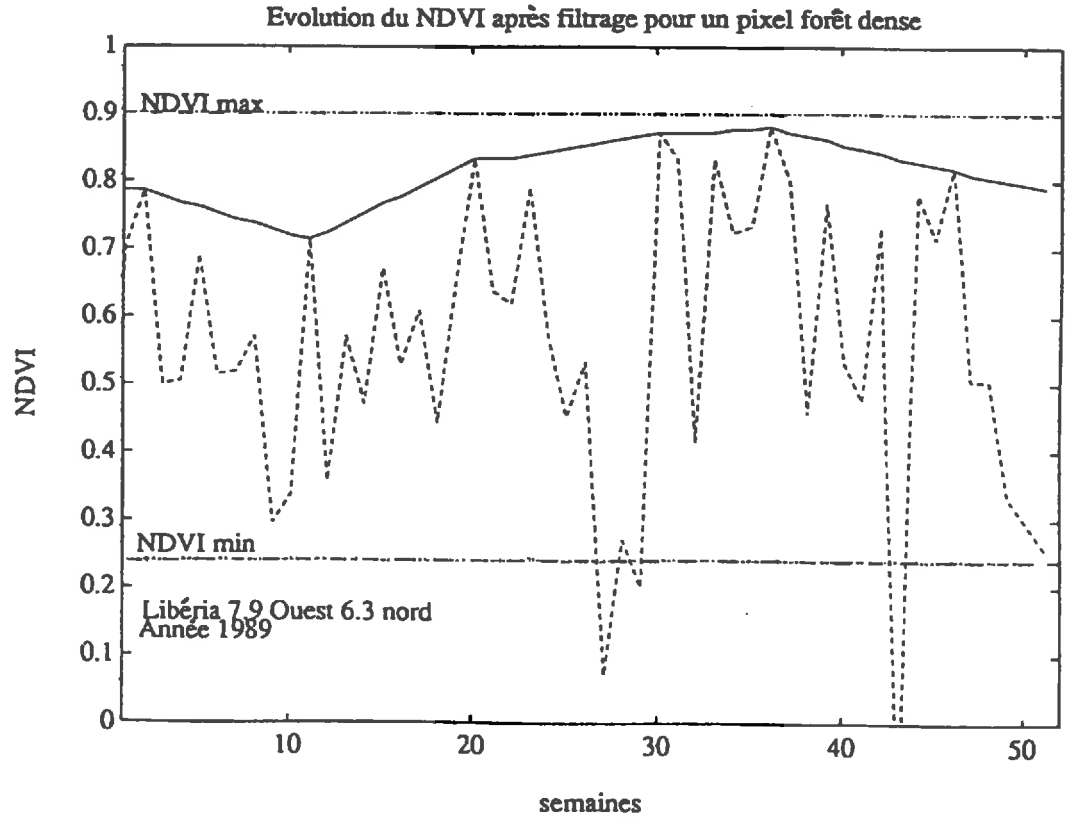


Figure 7.2 : Modification de l'évolution annuelle du NDVI obtenue après filtrage des données corrigées, pour un pixel correspondant à une zone de forêt dense.

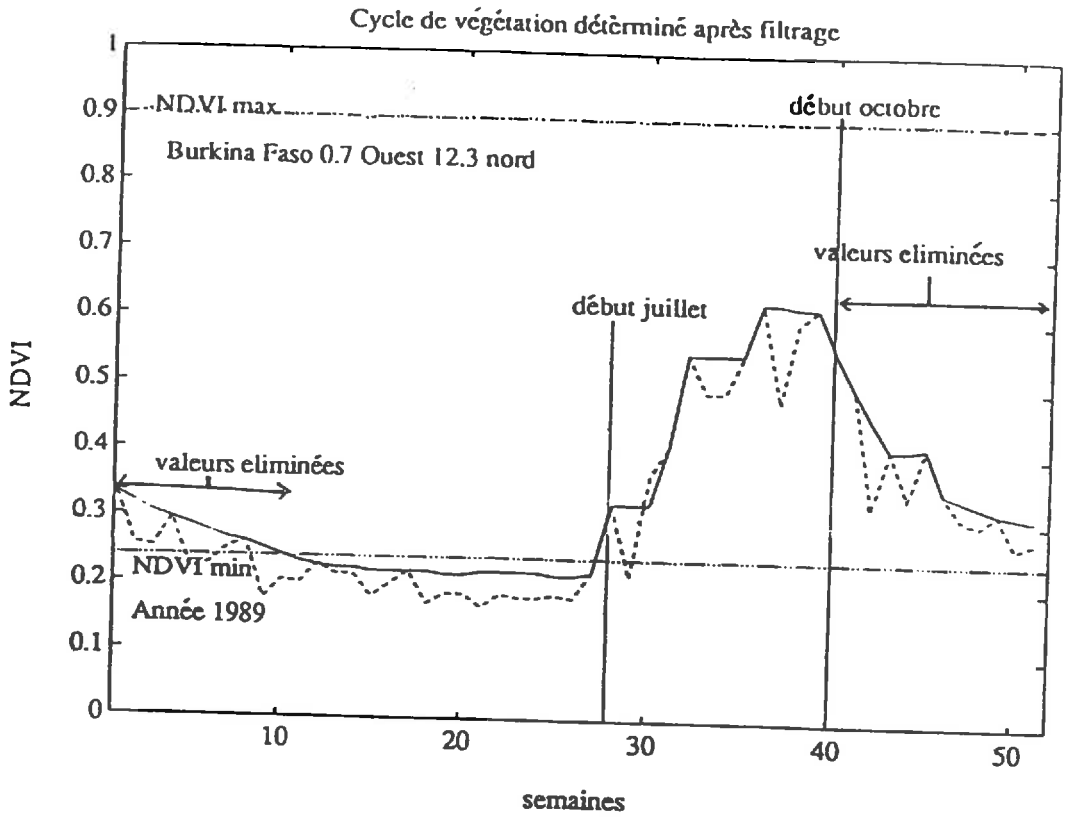


Figure 7.3 : Exemple de cycle de végétation déterminé à partir de l'évolution annuelle du NDVI et mettant en évidence le nombres de valeurs de NDVI rejetées lors du filtrage.

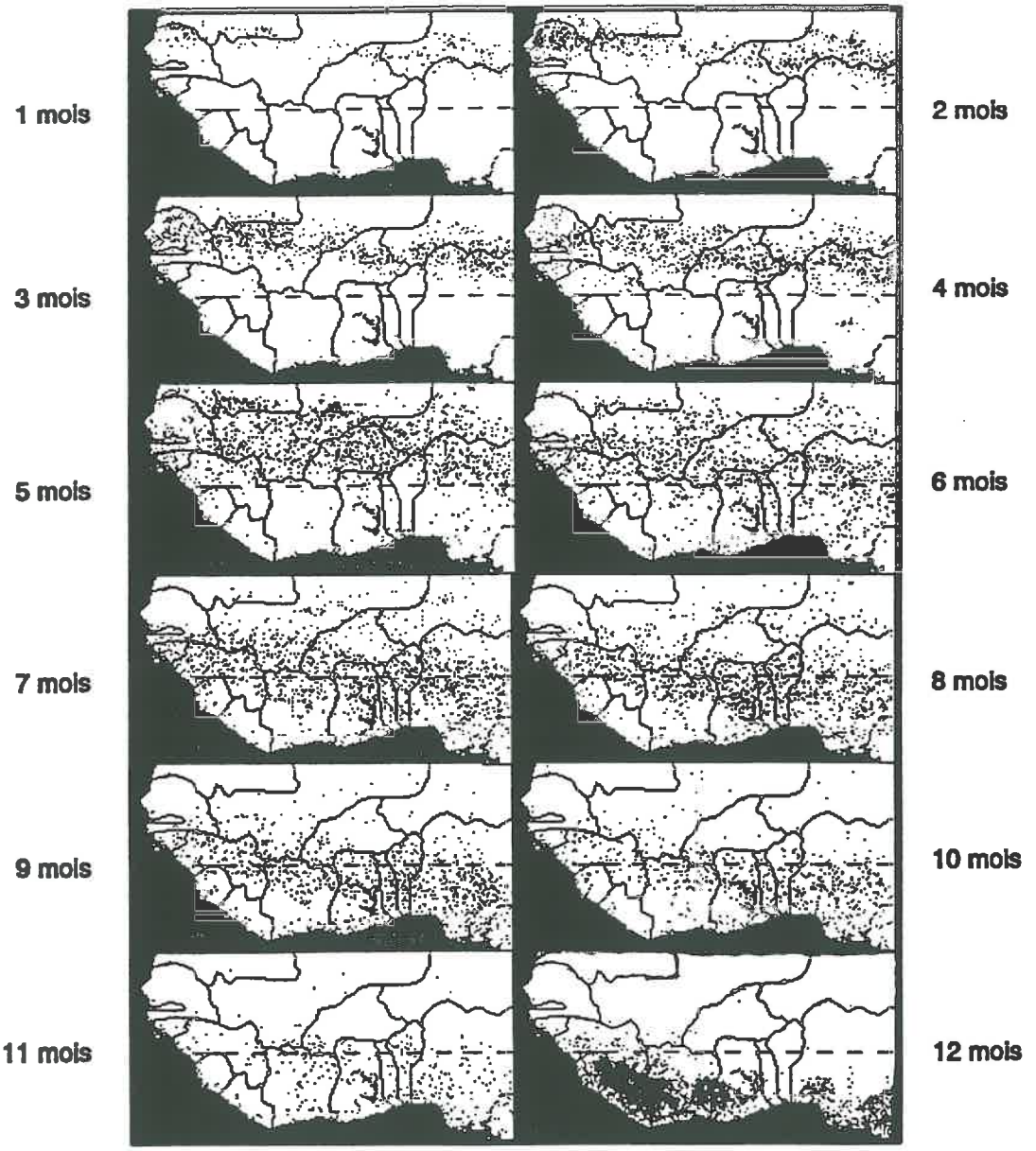


Figure 7.4 : Longueurs des cycles de végétation déterminées à partir de l'évolution temporelle du NDVI (Année 1986).

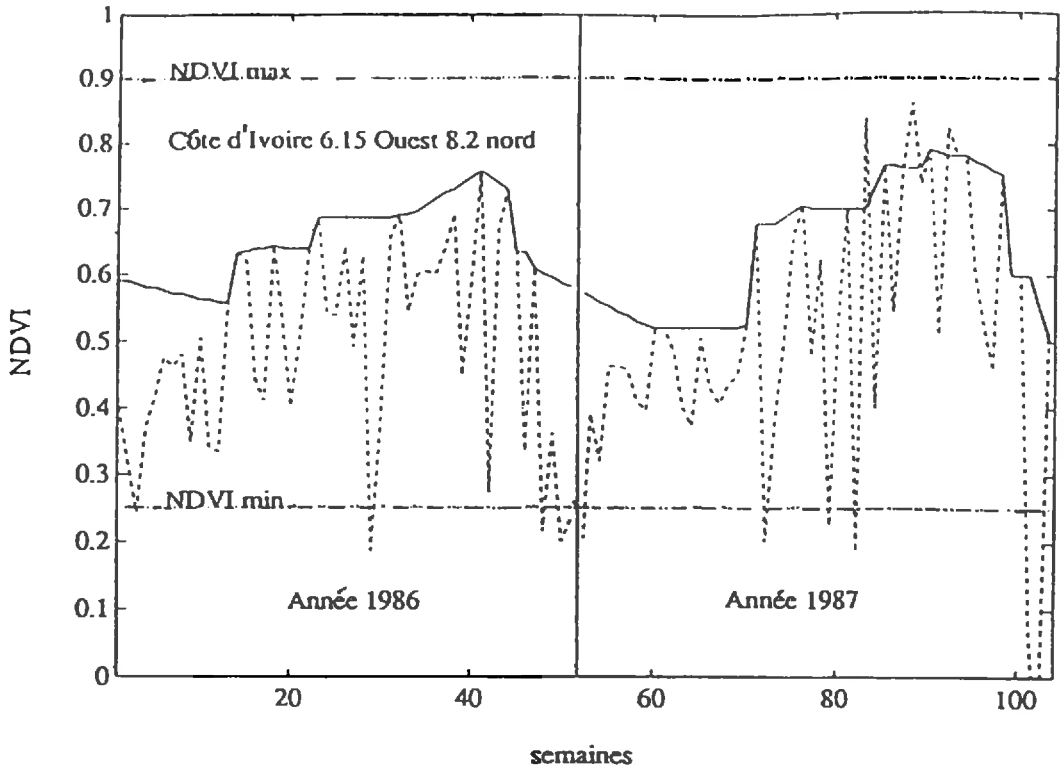


Figure 7.5 : Exemple de profil de NDVI observé pour un pixel situé en Côte d'Ivoire et montrant la suppression de points entraînée par le filtrage.

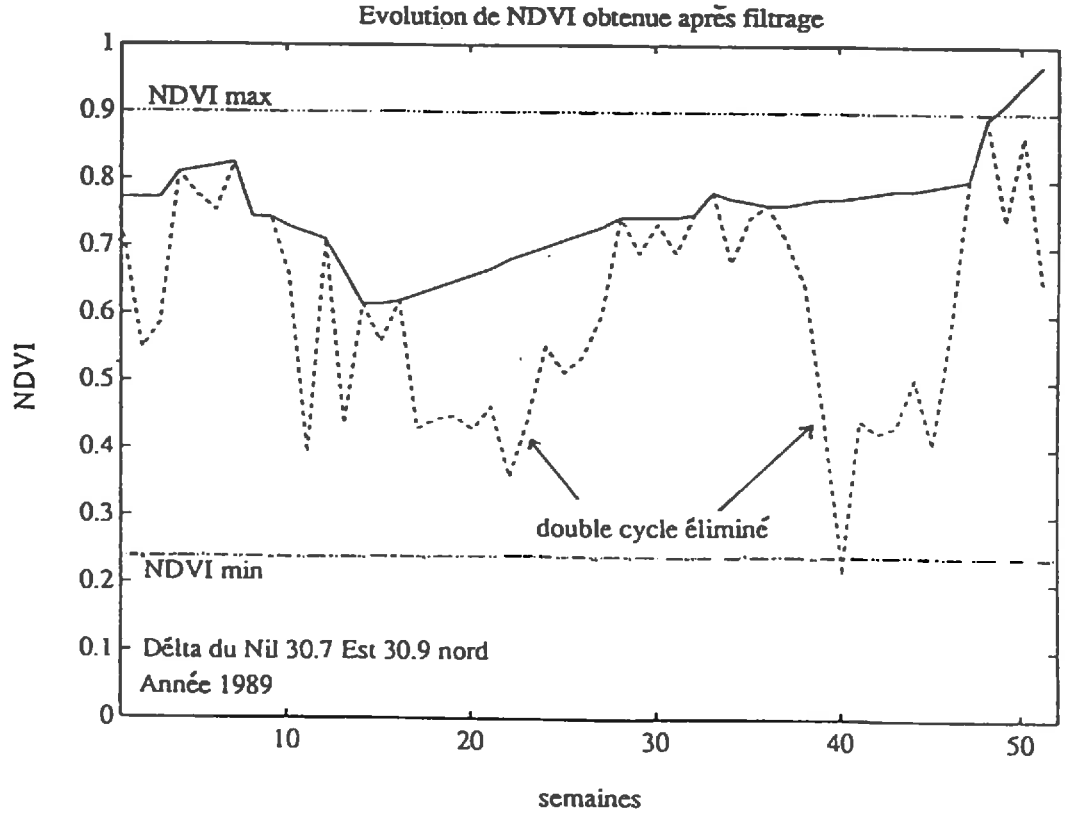


Figure 7.6 : Exemple de profil de NDVI observé pour un pixel situé dans le Délta du Nil et montrant la suppression du double cycle de végétation existant dans cette région.

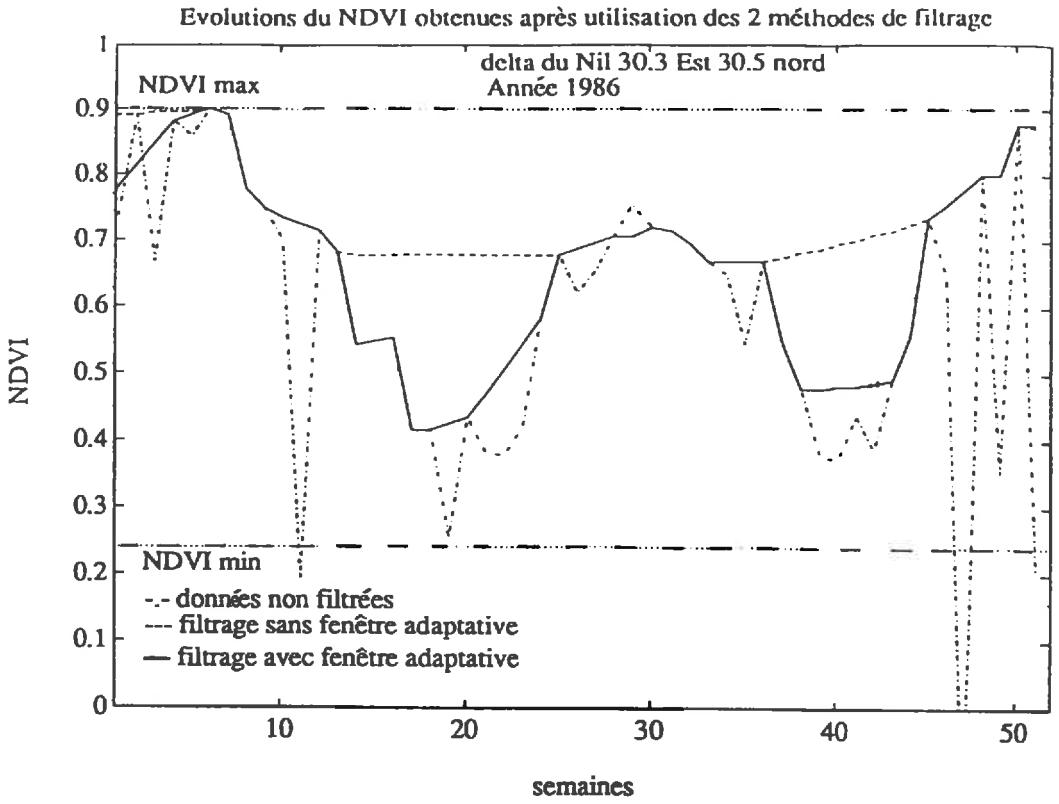


Figure 7.7 : Modification de l'évolution annuelle du NDVI obtenue après utilisation d'une fenêtre adaptative en fonction de la fréquence d'occurrence des nuages. Exemple donné pour un pixel localisé dans le Delta du Nil.

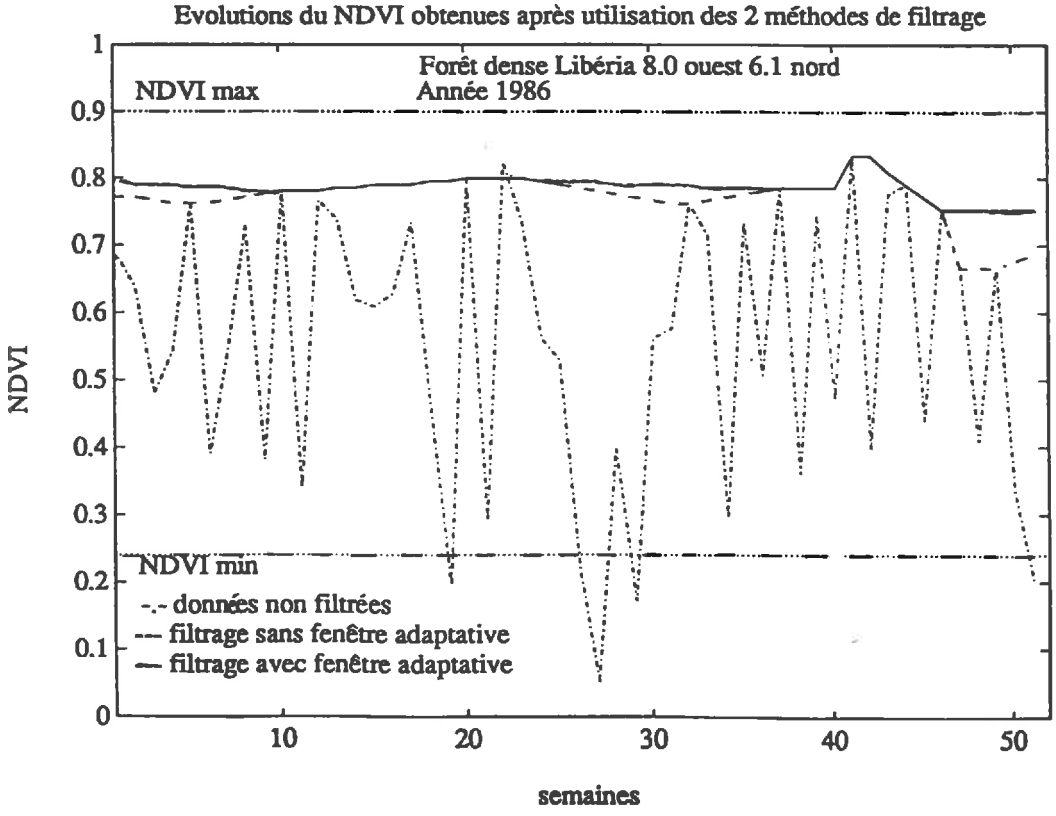


Figure 7.8 : Modification de l'évolution annuelle du NDVI obtenue après utilisation d'une fenêtre adaptative en fonction de la fréquence d'occurrence des nuages. Exemple donné pour un pixel correspondant à une zone de forêt dense (Libéria).

Par contre, pour les régions situées latitudinalement au centre du transect étudié et dont les cycles de végétation sont en moyenne compris entre 6 et 9 mois, la précision des estimations semble être beaucoup plus aléatoire. Sur la figure 7.5 est présenté un profil de NDVI pour un pixel situé dans le "V baoulé" en Côte d'Ivoire. Dans cette région, le cycle de végétation est caractérisé par un démarrage intervenant fin janvier/début février et par un arrêt de la végétation et un dessèchement très rapide fin novembre. Idéalement, l'allure de ce cycle pourrait correspondre à l'enveloppe maximum des NDVI non filtrés observés sur la figure 7.5. Or, on peut s'apercevoir sur cette figure que le filtrage a conduit à une forte réduction, voire à une élimination des valeurs faibles de début et fin de cycle. Ceci est du à la taille de la "fenêtre glissante" qui a été retenue pour le filtrage des données. Ainsi, de par les spécifications du filtre, la diminution du NDVI intervenant entre les deux années, a été considérée comme une anomalie et éliminée.

Ce résultat montre bien les limitations des corrections que l'on peut apporter lorsque que celles-ci ne sont pas spécifiques aux effets que l'on cherche à éliminer. Si pour les forêts denses, les valeurs supprimées semblent bien correspondre à des effets perturbateurs, il est certain que dans certaines zones les valeurs éliminées correspondent à de l'information. Par exemple, nous avons sélectionné un pixel situé dans le delta du Nil (fig 7.6). L'application d'une fenêtre de 15 semaines a conduit à la suppression des deux cycles existant dans les données non filtrées. Cette suppression n'intervient pas lorsque la "fenêtre glissante" est fixée à 8 semaines. Or, dans cette région le mode de culture conduit effectivement à la succession de deux cycles de végétation bien distincts dans l'année.

Il serait donc nécessaire d'adapter la taille de la fenêtre pendant laquelle on considère qu'une variation est le reflet d'un effet perturbateur. La mise en pratique ne semble être possible que par l'intermédiaire de l'utilisation de masques tels que des cartes d'ennuagement. En effet, une modulation en fonction, par exemple, de la latitude ne serait pas suffisante. Pour des régions comme le "V baoulé" qui est situé entre deux zones de forêts denses, le traitement serait identique à celui obtenu dans ce travail. Suite à ces différentes réflexions, j'ai tenté de mettre au point un algorithme de "fenêtre glissante adaptative". Le critère choisi pour adapter la longueur de la "fenêtre glissante" a été le pourcentage de données éliminées par le seuillage effectué à l'aide des canaux visible, proche infrarouge et infrarouge thermiques. J'ai émis l'hypothèse d'une assimilation de ces valeurs à des fréquences d'occurrence annuelle des nuages. Un exemple, sous forme d'une image colorée des pourcentages obtenus en 1986, a déjà été présenté figure 5.12. La taille de la fenêtre a été reliée linéairement à la fréquence d'occurrence des nuages. Les bornes ont été fixée arbitrairement, après avoir testé plusieurs combinaisons, à huit semaines pour une fréquence de 0 % et à 15 semaines pour une fréquence de 50 %. Les résultats obtenus à l'aide de cette démarche sont plus qu'encourageants. En effet, les différents problèmes exposés pour les pixels situés dans le "V Baoulé" ou dans le Delta du Nil, n'apparaissent plus (Fig 7.7). Les améliorations apportées par cette démarche ne semblent pas se faire aux dépens de celles issues de la démarche précédente puisque, par exemple, les cycles de "forêts denses" ne sont pas modifiés (Fig 7.8). En plus de ces cas particuliers, il semble que la détermination des cycles soit

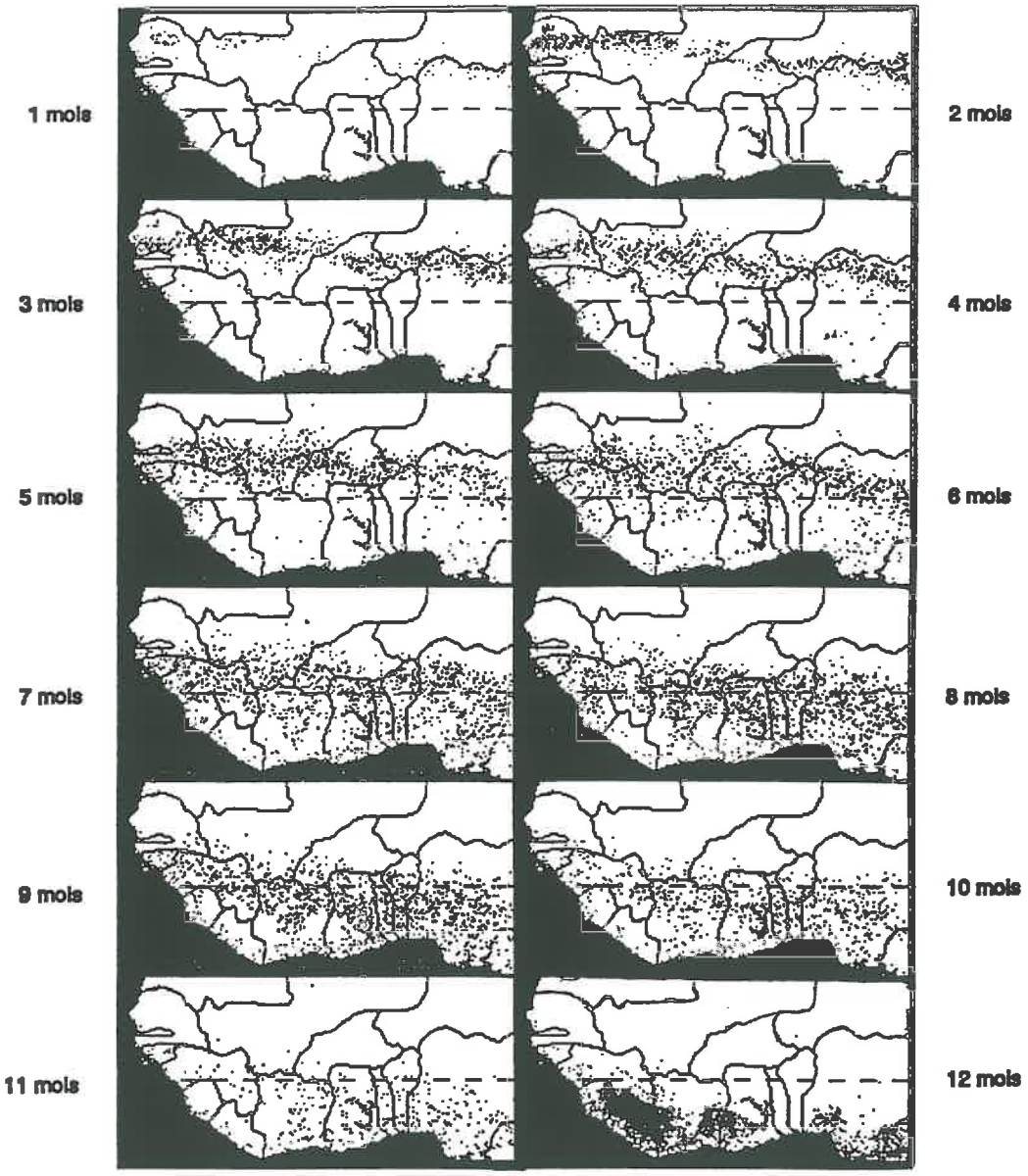


Figure 7.9 : Longueurs des cycles de végétation déterminés à partir de l'évolution temporelle du NDVI (Année 1986)
Lors du filtrage à l'aide de la méthode "BISE", la "fenêtre glissante" a été adaptée en fonction de la fréquence d'occurrence des nuages.

améliorée dans son ensemble. En effet, en comparant les longueurs de cycles de végétation nouvellement obtenus (fig 7.9) par rapport à ceux de la figure 7.4, on peut noter une diminution sensible de la dispersion en latitude de toutes les longueurs de cycle. L'augmentation de la longueur des cycles de végétation du nord vers le sud de l'Afrique de l'Ouest apparaît de façon plus marquée. Malheureusement, étant donné le coût élevé en temps nécessaire au retraitement du jeu complet de données satellitaires, il ne m'a pas été possible de prendre en compte ces améliorations dans le travail présenté ici.

Il faut également souligner que cette démarche ne semble pouvoir être utilisée efficacement que pour le filtrage de signaux enregistrés au dessus des régions chaudes du globe. En effet, dans les régions tempérées par exemple, il est possible d'observer des températures à la surface du sol voisines et même inférieures à celles obtenues au niveau de certains nuages. Dans ces conditions, il sera très difficile de pouvoir appliquer un seuillage thermique destiné à éliminer les pixels contaminés par les nuages.

Malgré la non prise en compte de la "fenêtre adaptative", j'ai estimé que l'utilisation des longueurs de cycle déterminées pouvait apporter une amélioration sensible dans le modèles d'estimation de la production primaire. Par leur intermédiaire il serait possible de négliger, pour chaque pixel, une proportion plus ou moins grande de valeurs de NDVI qui sont supposées ne pas correspondre à de la végétation photosynthétiquement active. La figure 7.3 donne un exemple des valeurs qui seront éliminées lors de l'emploi de ces cycles. Dans l'hypothèse d'une forte correspondance entre l'évolution du cycle végétatif et l'évolution temporelle du NDVI, les points rejetés peuvent bien être considérés comme des valeurs de sol nu ou/et de végétation sénescente.

7.2) Estimation de la PPN à l'aide du modèle satellitaire.

Après avoir exposé les possibilités d'améliorations de l'information qui peuvent être apportées par correction des données satellitaires, nous allons maintenant considérer l'apport de ces données dans l'estimation de valeurs de PPN. Ensuite, nous comparerons les estimations obtenues à l'aide de notre modèle à celles fournies par le modèle de Lieth and Whittaker (1975). Cette démarche, fondée sur l'établissement d'une relation statistique entre des valeurs climatologiques (pluviométrie annuelle, température moyenne annuelle) et des mesures de PPN, est actuellement l'une des seules permettant d'effectuer des estimations à l'échelle globale. Malheureusement, je n'ai pu disposer que de valeurs de pluviométries annuelles. Ces données ont été obtenues après interpolations des valeurs de pluviométries enregistrées et fournies par les stations météorologiques du réseau Agrhymet (régions sahéliennes) et de l'ASECNA (Côte d'Ivoire, Burkina Faso). La composante du modèle statistique de Lieth utilisant des valeurs de température n'a pas pu être prise en compte. Toutefois, l'erreur occasionnée est relativement faible car les moyennes de température observées en Afrique de l'ouest sont supérieures à 20°C. Dans la formulation fournie par Lieth, de telles valeurs n'entraînent pas de limitation du niveau

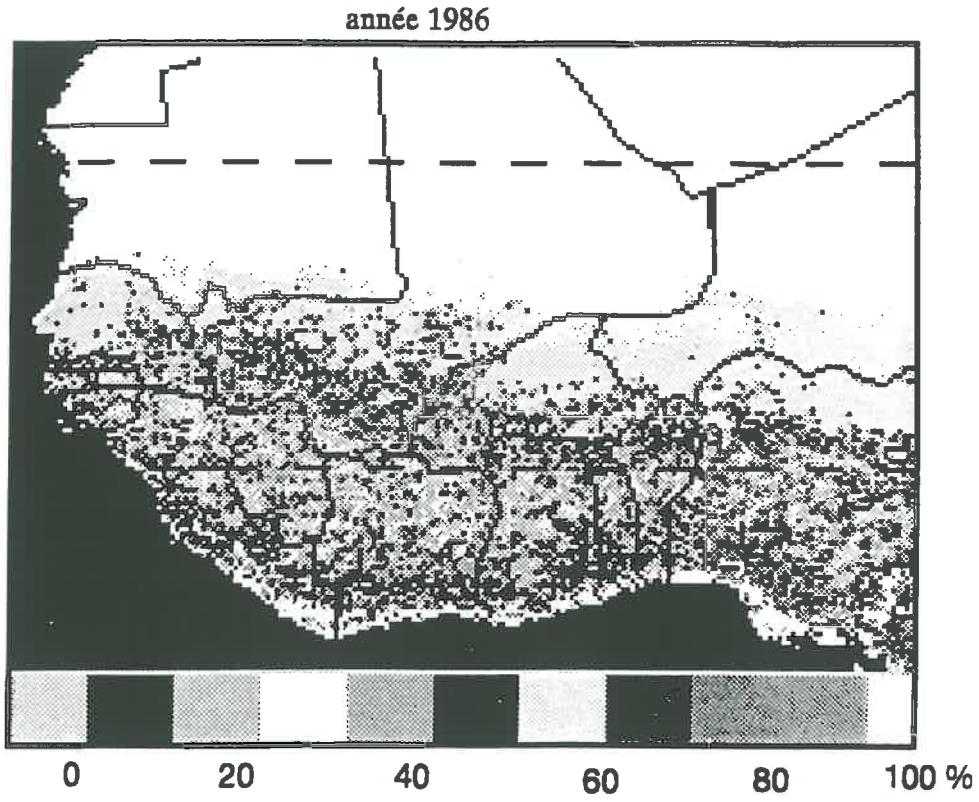


Figure 7.10 : Hausse, en pourcentage, des valeurs de PPN obtenues à l'aide des données NOAA/AVHRR corrigées filtrées par rapport aux valeurs de PPN obtenues avec les données corrigées non filtrées.

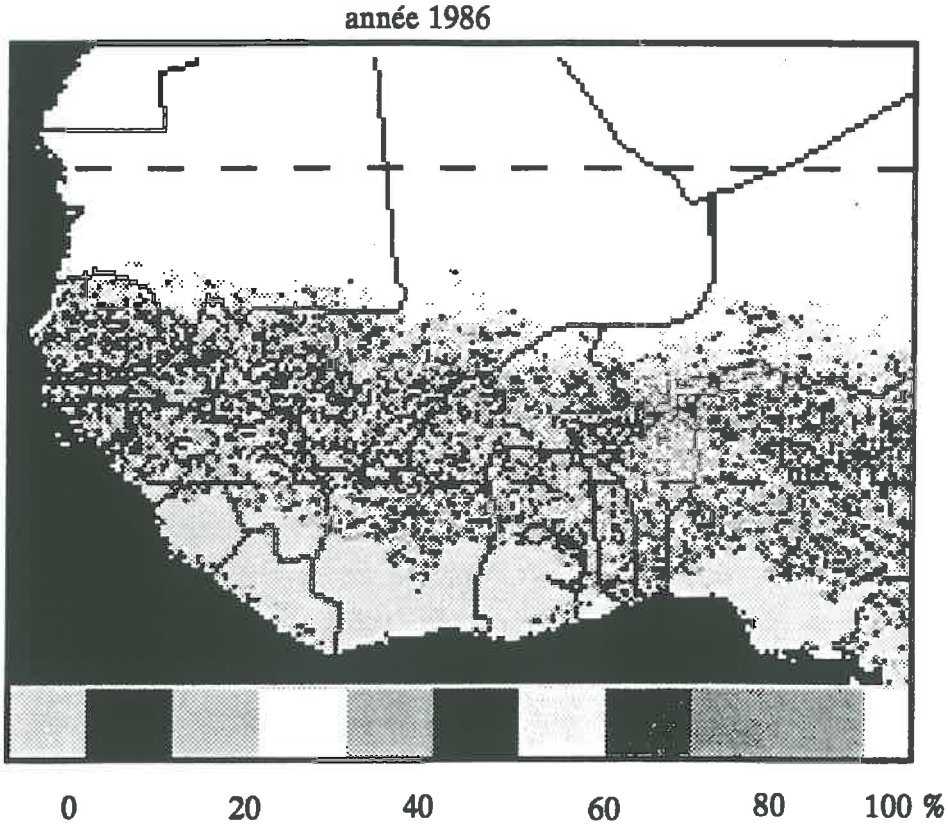


Figure 7.11 : Baisse, en pourcentage, observées sur les valeurs de PPN après application des longueurs de cycle de végétation déterminés sur les courbes annuelles d'évolution du NDVI.

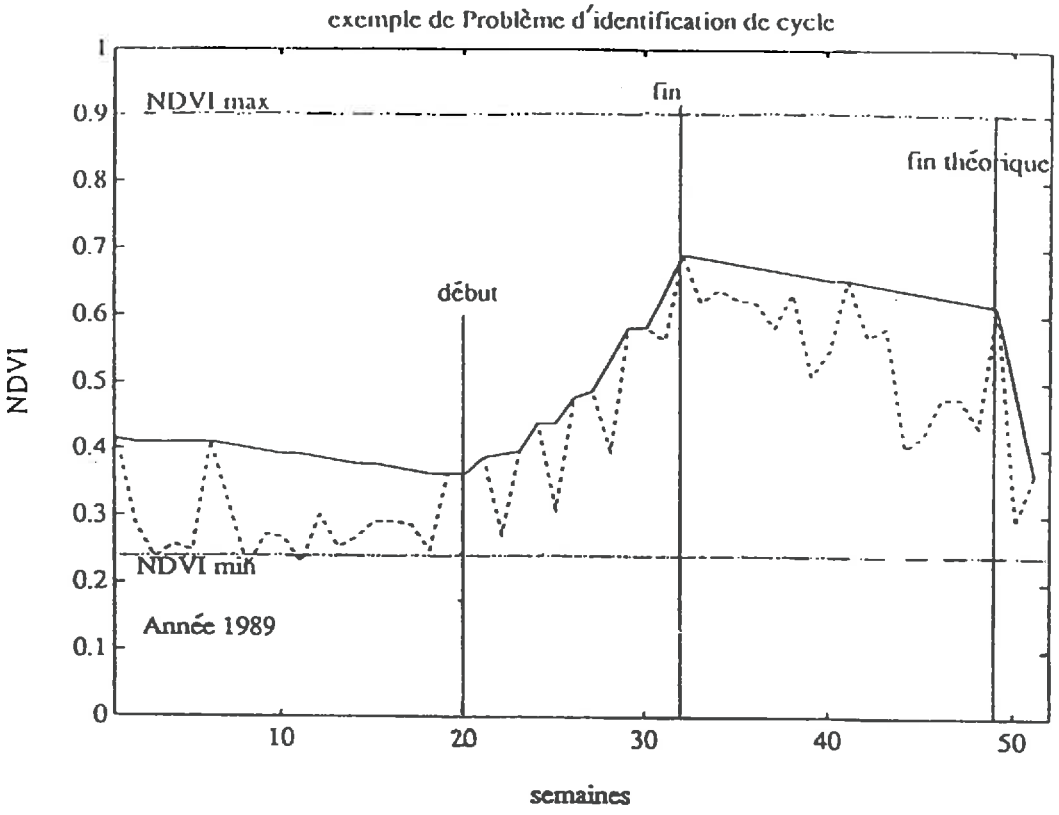


Figure 7.12 : Exemple de problème de détermination de cycle subsistant après filtrage des données corrigées.

de productivité. De plus, en considérant l'incertitude qui caractérise actuellement le modèle de production "satellitaire", le centre d'intérêt de la comparaison effectuée entre les deux types de modèle sera principalement d'ordre qualitatif.

7.21) Apport des données filtrées

Sur la figure 7.10 est représentée l'augmentation, sous forme de pourcentage, des valeurs de PPN obtenues en 1986 à l'aide des données corrigées filtrées par rapport aux données corrigées non filtrées. L'augmentation suit un gradient croissant du nord vers le sud du transect où l'on observe des valeurs proches de 70%. Ce comportement est à mettre en relation avec l'augmentation similaire de la fréquence d'occurrence des nuages le long de ce gradient. Si les hypothèses faites lors du filtrage des données satellitaires sont considérées comme valides, ces résultats montrent quelle peut être l'importance de l'erreur relative que l'on peut faire sur l'estimation de la PPN si l'influence de certains effets perturbateurs est négligée.

7.22) Apport des cycles de végétation estimés

Comme nous l'avons vu dans le chapitre II, l'efficience d'interception du RPA ne peut être assimilée à l'efficience d'absorption que pendant le phase de croissance végétative des plantes. Dans cette étude, si aucune distinction n'est faite sur les évolutions temporelles de NDVI, toutes les valeurs supérieures à la valeur seuil "sol nu" seront prises en compte dans l'estimation de la PPN. Dans ces valeurs sont incluses, par exemple, des valeurs correspondant à de la végétation sèche. A la suite des résultats fournis par certains travaux (Varlet-Grancher *et al.*, 1982) l'hypothèse d'une décroissance rapide de l'activité photosynthétique des plantes juste après avoir atteint le maximum de biomasse a été émise. Dans ces conditions, on peut noter sur la figure 7.3 que la proportion de valeurs de NDVI ne devant pas être prise en compte dans le calcul de la production peut représenter jusqu'à 50 % des points pour des cycles courts. Dans ces 50 %, sont également compris les points inférieurs à la valeur "sol nu".

Sur la figure 7.11 est représentée, en pourcentage, la diminution des valeurs de PPN obtenues grâce à la limitation du temps d'intégration à l'aide des longueurs de cycle de végétation qui ont été estimées. Les résultats montrent une baisse qui excède rarement 50 %. On note cependant la présence par endroit de valeurs très fortement abaissées. Pour ces points, il s'avère que la démarche utilisée pour retenir les points minimum et maximum du cycle conduit à des estimations fausses des débuts et fins de "cycle de végétation". Ainsi, sur la figure 7.12 est présenté un exemple pris au hasard parmi les pixels ayant une valeur très abaissée de PPN. Si l'on se réfère aux courbes obtenues par Baret et Olioso (1989) la date de fin de cycle effective devrait se situer à la semaine 49. Or, l'inclinaison du "plateau" observé sur cette courbe a conduit à la rétention de la semaine 32 plutôt que cette valeur. Il serait peut être possible de s'affranchir de ces problèmes en ne considérant que les variations de NDVI dépassant un seuil fixé. Pour l'exemple montré sur la figure 7.12, les variations observées entre les semaines 52 et 49 sont

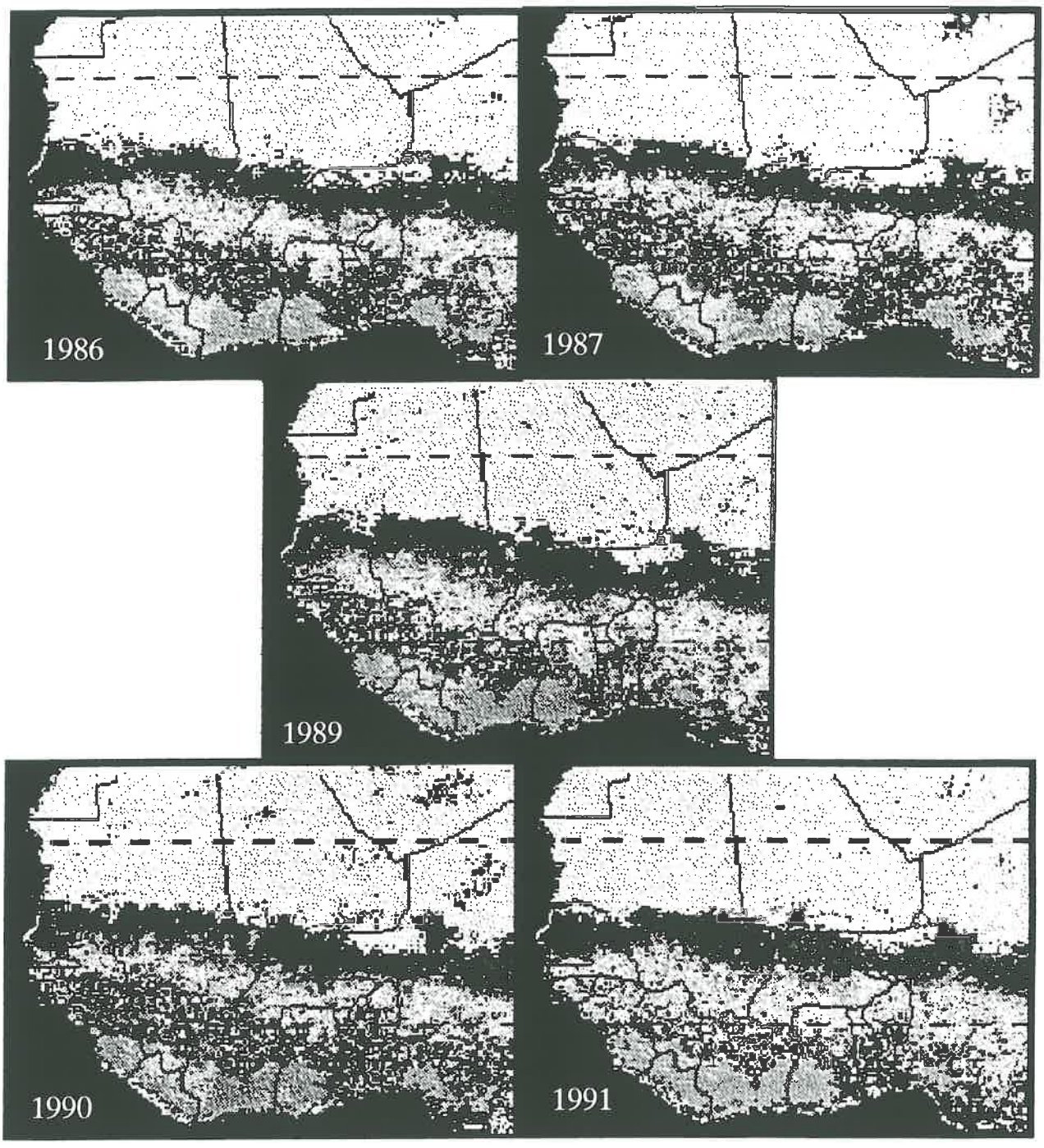


Figure 7.13 : Valeurs de Production Primaire Nette aérienne estimées à l'aide du modèle satellitaire pour les années 1986, 1987, 1989, 1990 et 1991 (données étalonnées, corrections atmosphériques, filtrage) . Masque appliqué à la forêt dense à l'aide de la carte de l'AETFAT.

supérieures à 0.1 unités de NDVI alors que pour les semaines 49 à 32 les variations sont, en moyenne, 10 fois moins élevées. Ainsi, si l'on ne retient un point comme valeur maximale uniquement lorsque la différence avec la valeur qui la précède est supérieure à un seuil arbitraire de 0.05 unités de NDVI, ce sera bien la semaine 49 qui sera sélectionnée dans l'exemple cité.

Outre ces points particuliers, il faut également rappeler que pour certains pixels situés dans le sud du transect, la détermination des débuts et fins de cycle a été fortement perturbée par la procédure de filtrage (cf. 7.1). Dans ce cas, contrairement à la situation précédente, cela entraîne une certaine surestimation de la PPN par la prise en compte de valeurs de NDVI qui auraient théoriquement dues être rejetées. Il semble cependant que ce type d'erreur pourra être résolu par l'utilisation de cycles de NDVI filtrés par la procédure de "fenêtre adaptative" en fonction de l'intensité d'ennuagement.

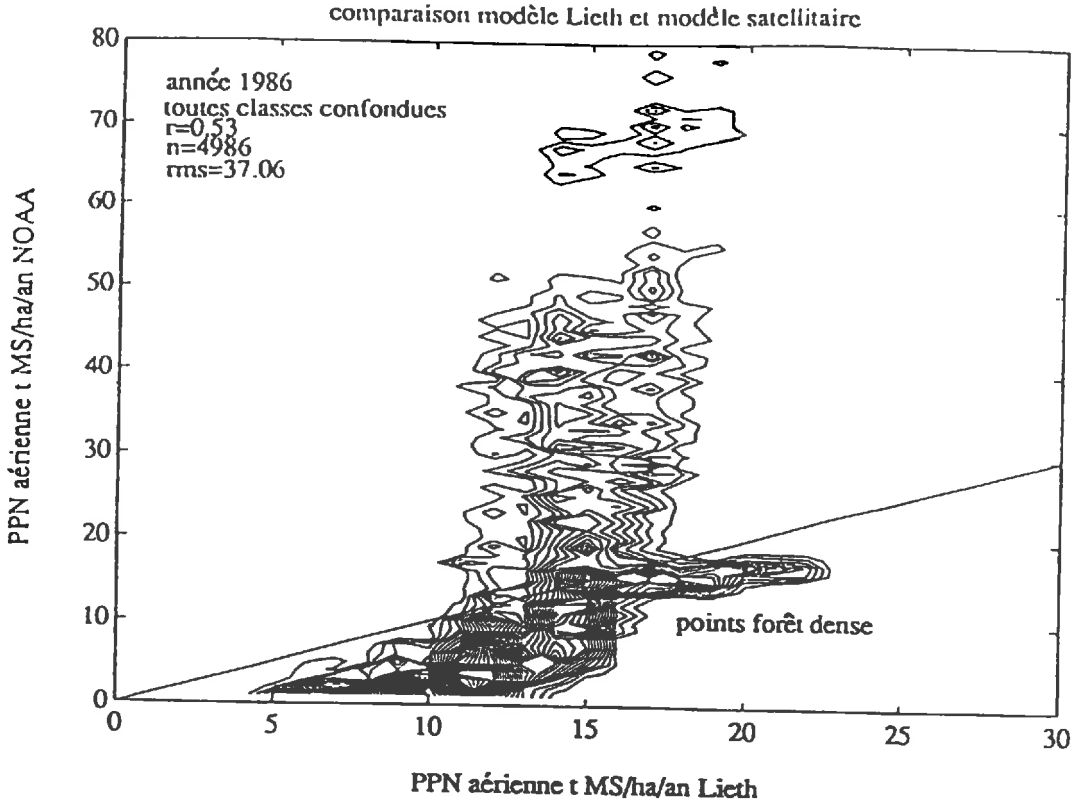
La phase de prétraitement des données satellitaires a consisté en un étalonnage des données de réflectances suivi d'une correction de l'influence de l'atmosphère. Ensuite, un seuillage des nuages a été effectué puis les courbes de NDVI ont été lissées. Enfin, des bornes de début et fin d'intégration du modèle ont été déterminées. C'est parvenu à cette phase de traitement que les valeurs de NDVI ont été utilisées pour estimer les valeurs de PPN.

7.23) Estimations des valeurs de PPN aérienne.

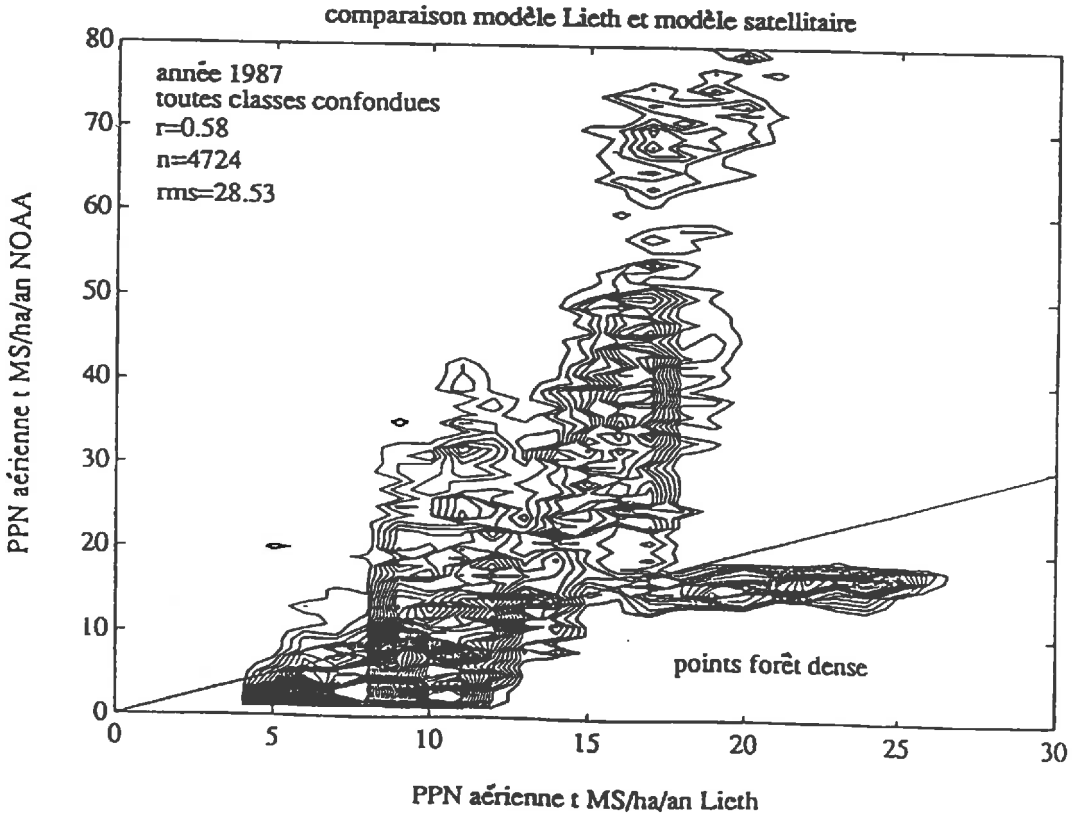
Sur la figure 7.13, sont reportées les cartes de valeurs de PPN potentielle aérienne estimées pour les années 1986 à 1991 (1988 exceptée). Plusieurs observations générales peuvent être faites.

- On retrouve, au niveau des valeurs de PPN, le gradient nord-sud observé dans la distribution de la végétation. Ce fait semble démontrer, d'un point de vue qualitatif, la bonne représentativité de l'estimation de la PNN à partir de données satellitaires ;
- Dans des régions particulières, telles que le delta intérieur du Niger (Mali), des valeurs de PPN supérieures à celles des régions environnantes sont observées, ce qui est tout à fait en accord avec la réalité ;
- De 1986 à 1991, on observe un déplacement vers le nord de la limite de production nulle (ce fait est bien visible au nord du Burkina Faso). Un tel redéveloppement de la végétation a été observé en zone sahélienne par P. Hiernaux, qui procède à un suivi de la végétation dans le "Gourma" malien depuis 1984 (Gond, Lavenu, communications personnelles) ;
- De fortes variations spatiales et temporelles des valeurs de PPN sont observées ;
- Mises à part les zones de forêts denses, délimitées à l'aide de la carte de l'AETFAT, les valeurs de PPN estimées semblent fortement surévaluées comparativement aux ordres de grandeurs des valeurs obtenues par prélèvement de biomasse. Certaines estimations atteignent 80 t MS/ha/an alors que les valeurs de productions les plus fortes fournies dans la bibliographie ne dépassent pas 22 t MS/ha/an.

a) année 1986



b) année 1987



Figures 7.14 a et b : Comparaison des estimations de la production primaire nette obtenue à partir des données satellitaires avec les données obtenues à l'aide de la formulation de Lieth (1975). Les valeurs sont exprimées en t MS/ha/an. Comparaison effectuée pour l'ensemble de l'Afrique de l'ouest.

Afin de pouvoir discuter plus objectivement des résultats obtenus, les estimations faites à l'aide du modèle satellitaires ont été comparées avec les estimations fournies par modèle de Lieth et Whittaker (1975).

7.24) Comparaison avec le modèle de Lieth et Whittaker.

Un jeu relativement complet de données pluviométriques n'a pu être disponible que pour les années 1986 à 1988. Cependant, pour des raisons de non signification des données satellitaires en 1988, cette année n'a pas été étudiée. La comparaison ne pourra donc porter que sur les années 1986 et 1987.

Comme nous l'avons vu dans les deux premiers chapitres, il est nécessaire, pour des raisons d'efficiences photochimiques bien distinctes, de pouvoir différencier, au minimum, la végétation arborée de la végétation herbacée. Or, jusqu'à présent, dans cette étude, seules les zones de forêts denses ont été distinguées grâce à l'utilisation d'une carte de végétation comme masque. Pour tout le reste du transect, la végétation a été considérée comme entièrement herbacée. De ce fait, l'application du modèle entraînera une surestimation de la production. Son intensité dépendra de la plus ou moins forte présence d'arbres dans chaque pixel. Actuellement, à l'échelle NOAA/AVHRR et à partir de la seule observation du signal enregistré, il est impossible de conclure à l'existence d'arbres dans un pixel donné. Cette présence ne peut être estimée que par la connaissance *a priori* du milieu étudié. Ainsi, dans ce travail, c'est à l'aide de données bibliographiques que j'ai essayé de pondérer les estimations de PPN en tenant compte du recouvrement respectif pris par les arbres et les herbes pour chaque pixel. Cependant, au vu du manque actuel de données, les deux démarches abordées dans ce travail (cf. 6.13c) ne peuvent avoir qu'un caractère prospectif. Les hypothèses faites risquent d'entraîner des biais dans les estimations des valeurs de PPN. J'ai donc préféré, avant de considérer ces estimations, réaliser une première comparaison en utilisant les valeurs ne tenant pas compte de l'importance du recouvrement arboré.

Sur les figure 7.14a et 7.14b sont représentées les comparaisons obtenues entre le modèle de Lieth et le modèle satellitaire pour toute l'Afrique de l'ouest. En raison du grand nombre de points traités, la représentation des points est faite sous forme de courbes d'isodensités de points. Plusieurs remarques générales peuvent être dégagées de ces 2 figures.

- Pour une valeur de PPN estimée par le modèle de Lieth on observe une forte variabilité des estimations du modèle satellitaire. Ces phénomènes conduisent à l'obtention de coefficients de corrélation très faibles ($r<0.6$).

- Les estimations fournies par le modèle satellitaire sont beaucoup plus élevées que celles fournies par le modèle de Lieth, exception faite des points concernant les faibles valeurs de PPN.

- Pour ce qui concerne la surévaluation observée, un deuxième groupe de points fait exception et correspond aux valeurs de PPN s'appliquant aux zones de forêts denses.

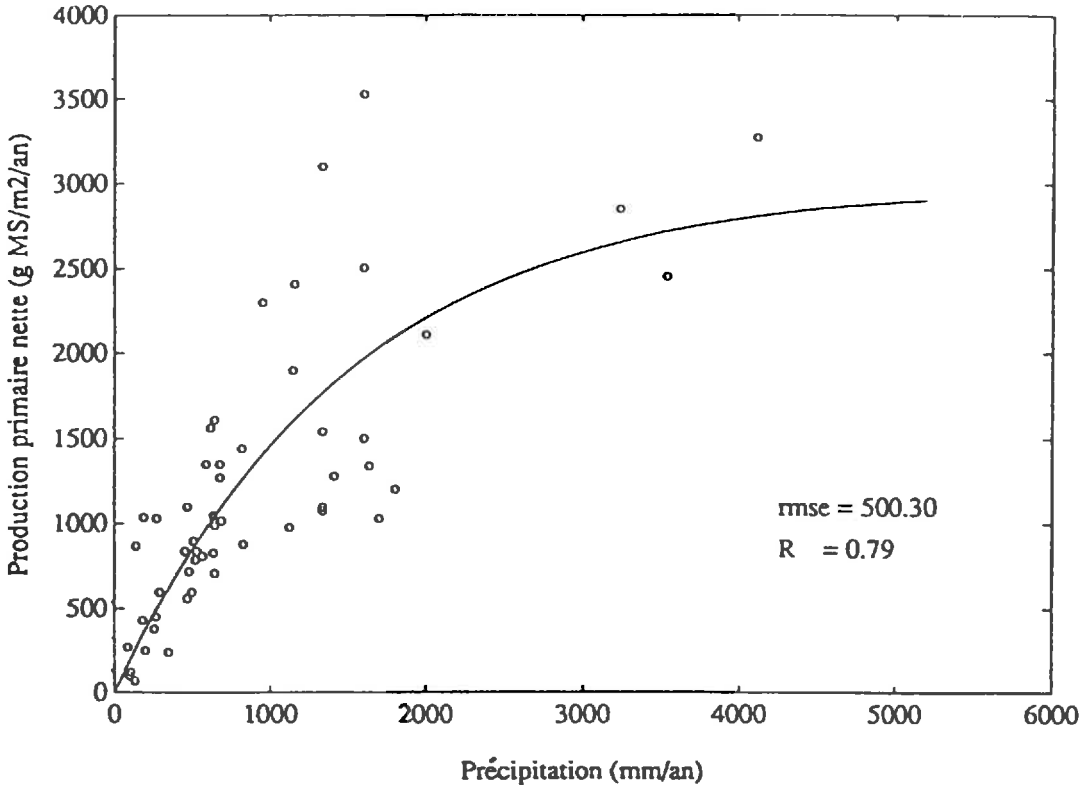
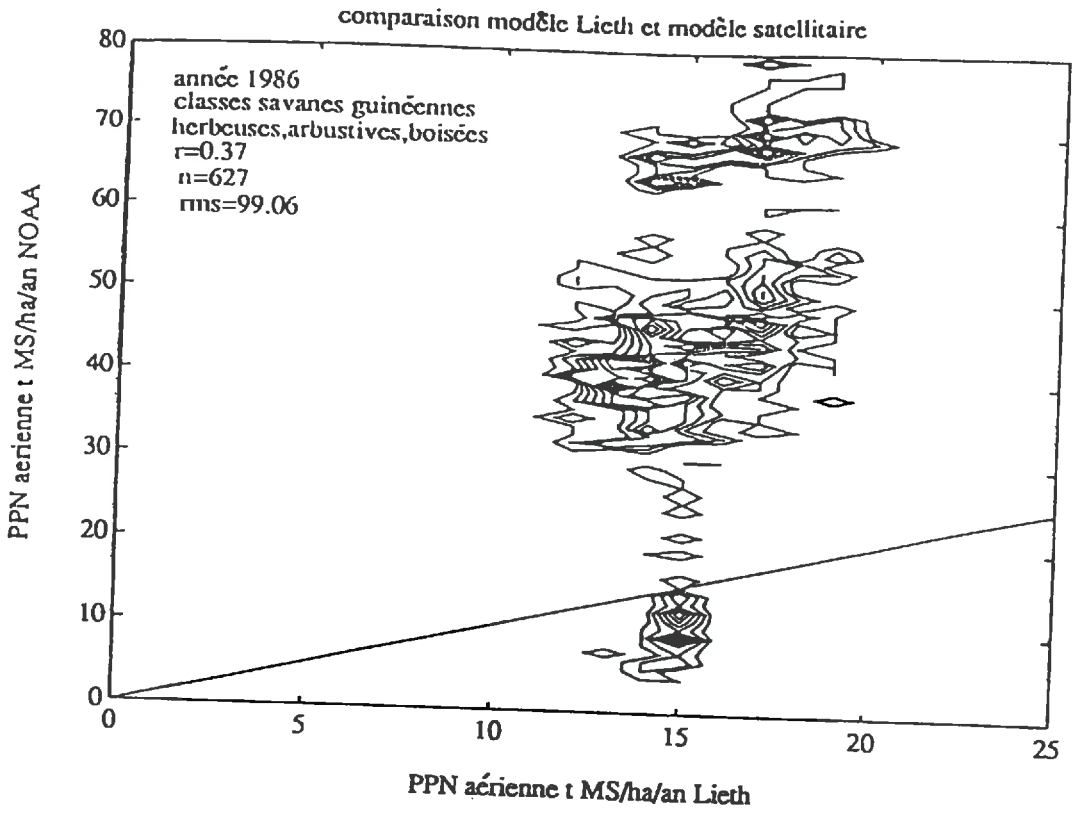


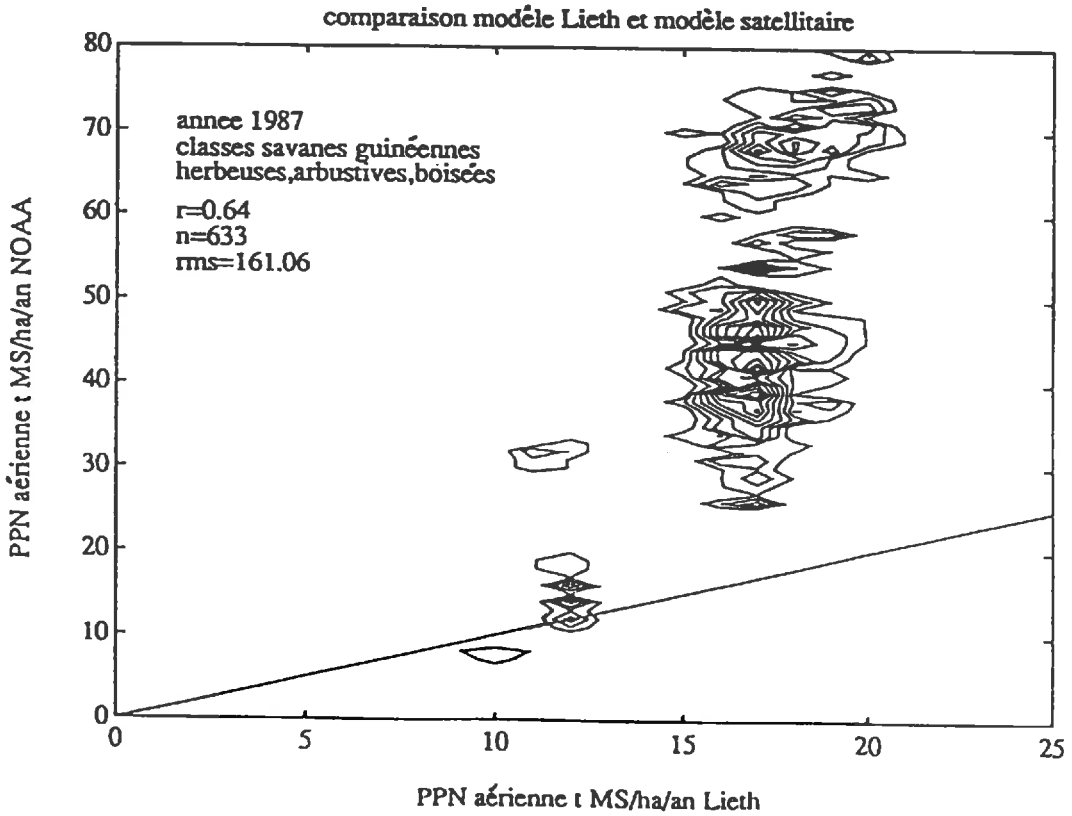
Figure 7.15 : Relation entre la pluviomètrie annuelle et la Production Primaire Nette déterminée dans le modèle de Miami (1972).

d'après Lieth,(1975).

a) année 1986



b) année 1987



Figures 7.16 a et b : Comparaison des estimations de la production primaire nette obtenue à partir des données satellitaires avec les données obtenues à l'aide de la formulation de Lieth (1975). Les valeurs sont exprimées en t MS/ha/an. Comparaison effectuée pour la classe des savanes guinéennes de la carte de l'AETFAT (1983).

- Il existe une variation importante dans la répartition des nuages de points entre les deux années.

Ces trois caractéristiques majeures des résultats obtenus (faible corrélation, forte surestimation et variabilité interannuelle) vont maintenant être présentées.

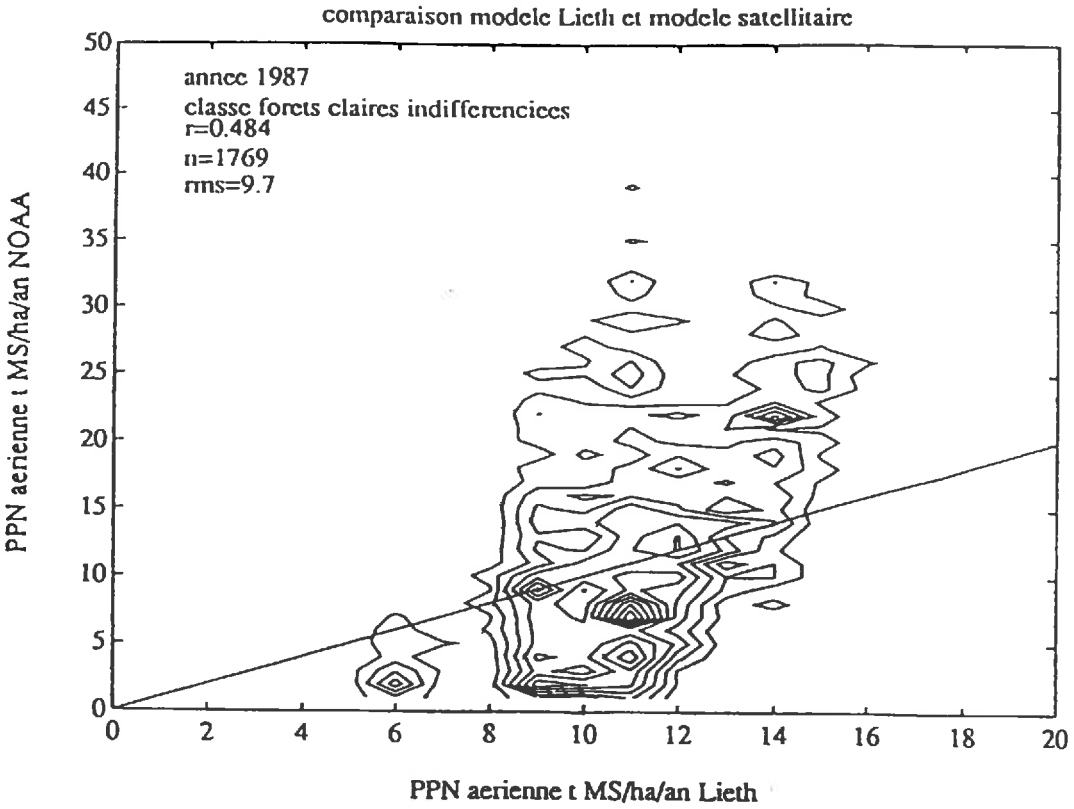
7.24a) Obtention de faibles corrélations.

La faible corrélation obtenue n'est pas un fait alarmant. En effet, ce résultat semble être issu des différences de caractéristiques que possèdent les deux modèles.

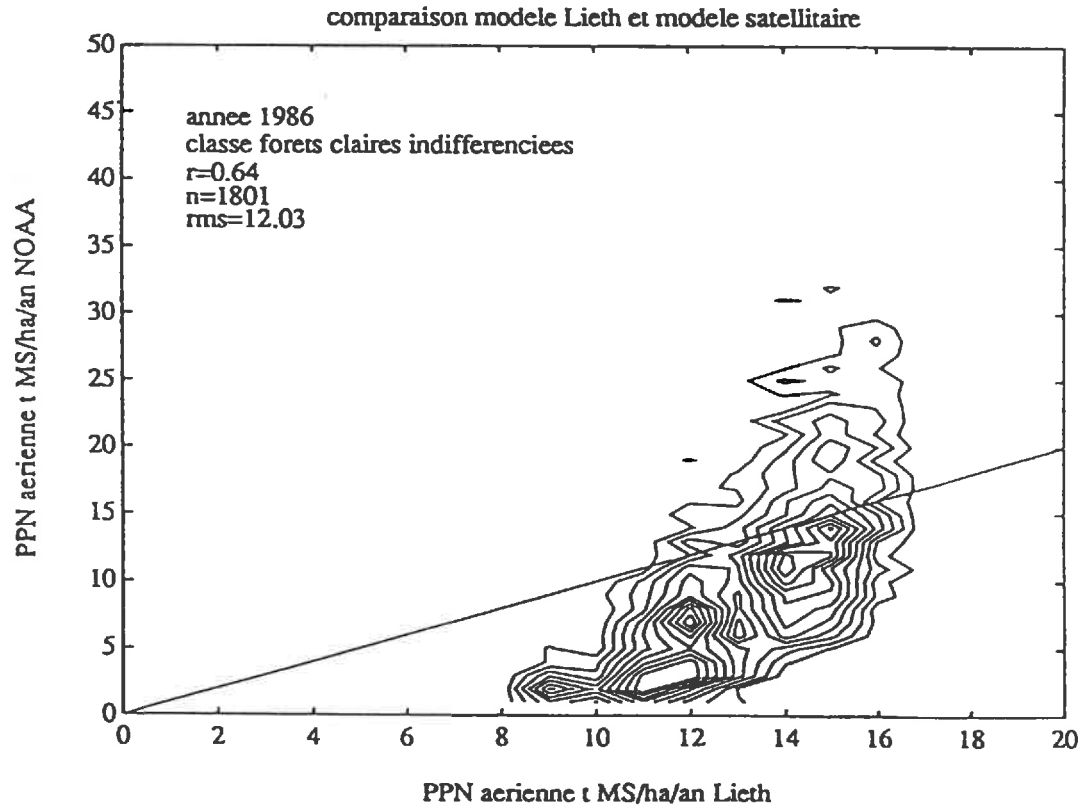
- Ainsi, le modèle de Lieth a été établi en émettant l'hypothèse d'une forte dépendance de la production des plantes vis à vis de facteurs tels que la pluviométrie et la température. Cette dépendance a été traduite sous la forme d'une relation statistique entre la pluviométrie ou la température et la PPN. En utilisant cette relation, à une valeur de pluviométrie on ne fera correspondre qu'une seule valeur moyenne de PPN. Une telle relation conduit donc à un lissage des variations de PPN pouvant intervenir en un lieu donné. De plus, pour construire son modèle, Lieth a employé indifféremment des valeurs de PPN déterminées pour des formations herbacées et des formations arborées. Ensuite, les valeurs de pluviométries utilisées dans ce travail, résultent d'une interpolation des valeurs enregistrées dans différentes stations météorologiques. Ces deux derniers points conduisent à une accentuation du lissage des valeurs de PPN estimées. Lorsque l'on utilise les données satellitaires, la situation est tout à fait différente puisque l'information utilisée est une mesure de l'état de la surface observée. S'il intervient des variations dans le milieu étudié, les données satellitaires permettent leur appréhension. Un lissage de l'information s'opère toutefois à l'échelle du pixel où les réflectances de tous les objets compris sur la surface observée sont confondues en une seule valeur. Il faut rappeler qu'à la suite des différents sous échantillonnages opérés sur les données satellitaires, cette surface, qui originellement varie entre 1.1 Km x 1.1 Km et 2.4 Km x 6.5 Km, est de 15 x 15 Km dans notre étude.

- La dépendance de la PPN vis à vis d'un facteur du milieu n'est réellement effective que dans une gamme définie de valeurs. Il existe généralement un seuil au delà duquel la dépendance s'estompe et ce sont alors d'autres éléments qui apparaissent comme facteurs limitants de la production. Ainsi, comme on peut le voir sur la figure 7.15, la dispersion des points ayant servi à établir la relation de Lieth augmente fortement au delà d'une pluviométrie annuelle de 900 à 1000 mm. De ce fait, ce modèle n'est pas capable de rendre compte de la variabilité de production existant dans les zones où la pluviométrie annuelle est supérieure à cette limite. La mesure satellitaire contient, quant à elle, la réponse intégrée de la végétation à tous les facteurs qui influent sur son fonctionnement et son développement. Quel que soit le facteur limitant agissant sur la végétation, la valeur du signal satellitaire pourra en dépendre. Ainsi, sur les figures 7.16a et 7.16b sont représentées les estimations fournies par les deux modèles pour les formations de la zone guinéenne, zone où la pluviométrie est supérieure à 1000 mm par an et

a) année 1987



b) année 1986



Figures 7.17 a et b : Comparaison des estimations de la production primaire nette obtenue à partir des données satellitaires avec les données obtenues à l'aide de la formulation de Lieth (1975). Les valeurs sont exprimées en t MS/ha/an. Comparaison effectuée pour la classe des forêts claires indifférenciées de la carte de l'AETFAT (1983).

n'est donc plus limitante pour la production. Pour chaque estimation obtenue à l'aide du modèle de Lieth on a une très forte variation des estimations fournies par le modèle satellitaire. Bien que non clairement identifié, l'agent limitant principal mis en cause dans la productivité des zones guinéennes est la disponibilité du sol en éléments minéraux. D'autres facteurs tels que la fréquence de passage des feux sont également avancés. Cette zone est en fait recouverte par une mosaïque de formations végétales dont les valeurs de biomasses maximales annuelles observées différent assez fortement. Dans une étude bibliographique effectuée par Menaut (1979), pour une pluviométrie annuelle de 1250 mm des valeurs variant entre 7 et 20 t MS/ha sont reportées pour des savanes herbeuses alors qu'elles ne dépassent pas 7 t MS/ha pour des savanes préforestières ou des savanes arbustives.

- Même lorsque l'on se situe dans des zones où la pluviométrie est le facteur déterminant de la production, l'utilisation d'une formulation de type Lieth posera des problèmes de précision. En effet, par cette démarche on ne pourra reproduire que la tendance générale de variation de la production dans la zone observée. Des conditions particulières d'environnement (zones d'accumulation de l'eau, zones de cuirasse, etc...) pourront conduire à de fortes variations de production qui ne seront pas prises en compte par une démarche de type Lieth. Dans ce cas également, la mesure directe de l'état de surface fournie par les données satellitaires va permettre l'accès à cette hétérogénéité. Cette affirmation peut être illustrée en prenant pour exemple la région du "Delta central" du Niger située au Mali. Dans cette zone marécageuse qui s'étend sur près de 4° de latitude et où la pluviométrie annuelle moyenne est inférieure à 500 mm (Schnell, 1976), on observe des valeurs de production beaucoup plus élevées que dans le reste des régions situées à ces latitudes. Il faut cependant noter que, eu égard à la taille des pixels NOAA/AVHRR il n'est pas possible d'exprimer toute la variabilité caractéristique des zones savanicoles. Ainsi, sur une toposéquence de 1.2 km de long, une variation de phytomasse d'un facteur 1 à 3 a été observée par Fournier (1982). Au niveau de l'enregistrement satellitaire toute cette variation sera confondue en une seule valeur de NDVI.

Sur les figures 7.17a et 7.17b sont présentés les résultats de la comparaison entre les deux types d'estimation de la PPN pour la classe des forêts claires indifférenciées. La gamme de pluviométrie caractérisant cette classe s'étend entre 400 et 900 mm. Dans ces régions, la pluviométrie est un élément déterminant de la production. De ce fait, c'est dans cette classe où l'on observe la seule tendance à une linéarisation entre les deux types de mesures. Cependant, cette tendance n'est réellement marquée que pour l'année 1986. En 1987, on assiste à une dispersion accrue des points. Ce fait être peut être du à des facteurs tels qu'une différence bien marquée de la qualité des pluies (nombre de jours de pluie, quantité d'eau précipitée par averse, durée moyenne de l'intervalle entre deux phases de précipitations) entre les deux années. Les données nécessaires et suffisantes pour tester cette hypothèse n'ont malheureusement pas été disponibles. Cependant, si ce fait venait à se confirmer, cela constituerait un avantage du modèle satellitaire par rapport au modèle de Lieth qui ne peut refléter que les variations de PPN liées directement à la quantité de pluie incidente.

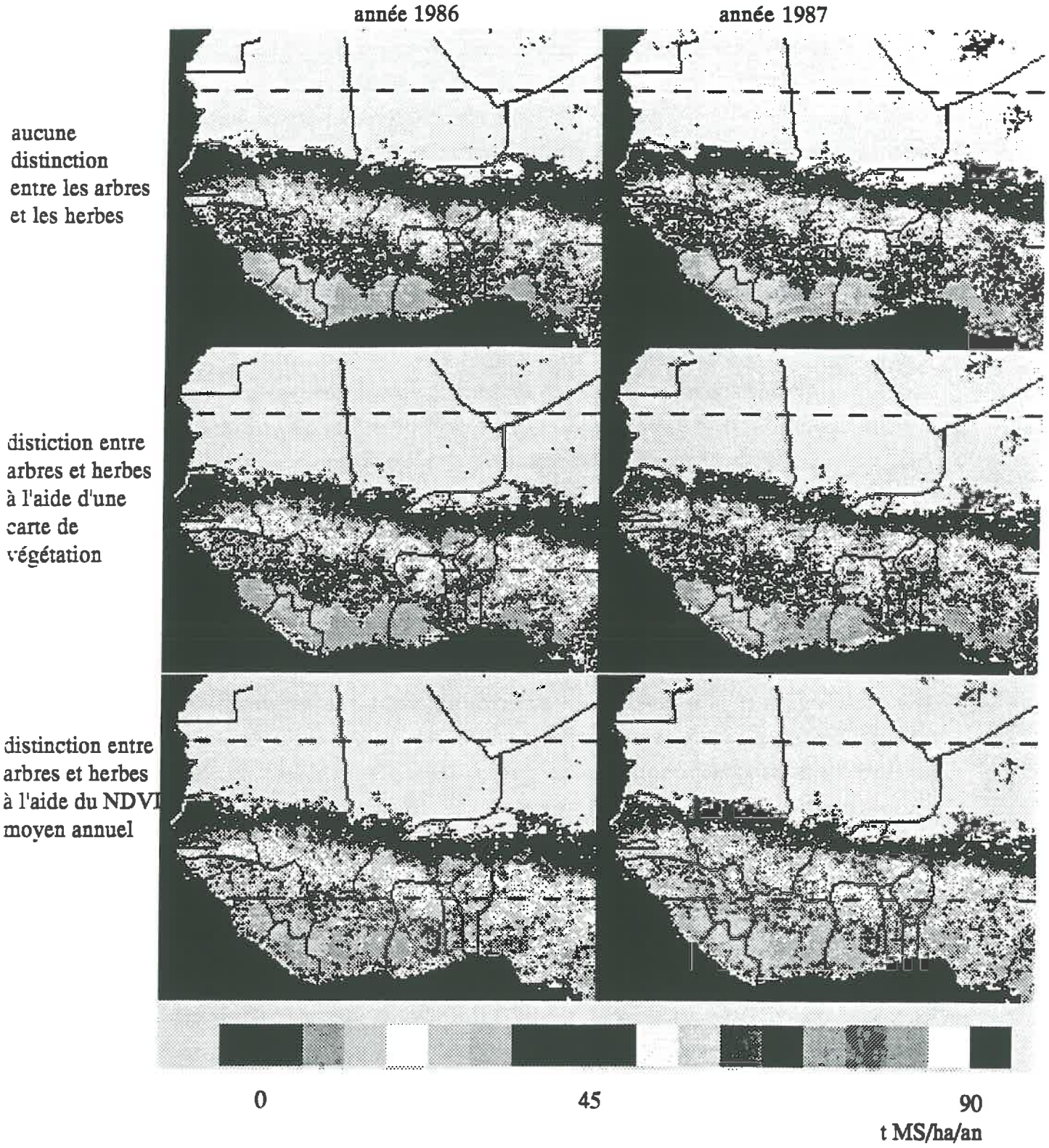


Figure 7.18 : Evolution des valeurs de Production Primaire Nette en fonction du traitement effectué afin de distinguer la végétation arborée de la végétation herbacée.

7.24b) Surestimation des valeurs de PPN

Les valeurs déterminées dans les zones de savanes paraissent fortement surévaluées puisqu'elles peuvent atteindre 80 t MS/ha/an. Les valeurs maximales disponibles dans la bibliographie concernent des savanes herbeuses pour lesquelles des valeurs de biomasses maximales de 21 t MS/ha ont été mesurées (Menaut, 1979).

Plusieurs remarques peuvent être faites pour expliquer cette différence.

- Comme nous l'avons déjà mentionné les arbres et les herbes présentent des efficiences photochimiques distinctes. Les valeurs d'efficience de conversion observées dans la bibliographie montrent généralement une supériorité des valeurs concernant les espèces herbacées par rapport aux espèces arborées. Le fait de considérer le transect étudié comme uniquement recouvert par des herbes constitue donc une première cause de surestimation de la PPN. De plus, des phénomènes de compétition existent entre les strates arborées et herbacées qui conduisent à une diminution de la productivité des herbacées (Menaut, 1983). Pour essayer de tenir compte de ces deux facteurs de surestimation de la PPN, deux démarches ont été testées. Dans la première, pour chaque classe de la carte de la végétation AETFAT, une valeur moyenne de recouvrement arboré associée à une valeur traduisant l'effet dépresseur exercé par ce recouvrement sur la production de la strate herbacée sous sous-jacente, a été attribuée. Ensuite, cette carte a été utilisée comme masque pour attribuer à chaque pixel une valeur de recouvrement et une valeur d'effet dépresseur. Dans la seconde, ces deux facteurs ont été adaptés en fonction de la valeur de NDVI moyen annuel. Les estimations obtenues à l'aide de ces deux méthodes sont reportées sur la figure 7.18 et sont comparées aux résultats obtenus en considérant la végétation faite uniquement d'herbacées. A l'aide de la première méthode, on assiste à une diminution des estimations de valeurs de PPN d'environ 5 % en zone soudanienne et d'environ 15 % pour les zones guinéennes. En région sahélienne, les valeurs sont bien évidemment inchangées puisque le recouvrement arboré a été considéré comme inférieur à 10 %. La deuxième démarche conduit, quant à elle, à une diminution en moyenne deux fois plus forte que la première. Les diminutions sont comprises entre 5 et 15 % pour les zones soudaniennes et 15 à 30 % pour les zones guinéennes. Pour certains points situés dans le sud du transect la baisse enregistrée atteint 75 %. Ces points, possédant une valeur de GVI moyen annuel élevée, correspondent certainement à des zones arborées denses non prises en compte dans le masquage des zones de forêts denses effectué à l'aide de la carte de l'AETFAT. La prise en compte du recouvrement arboré entraîne donc une diminution sensible des estimations de la PPN surtout pour ce qui concerne la deuxième démarche. Cependant, en raison du de manque de données de terrains, la validité des valeurs de recouvrement et d'effet dépresseur retenues est de ce fait très critiquable. De plus, les hypothèse formulées dans les deux approches utilisées ne sont pas entièrement satisfaisantes. Dans la première méthode, l'emploi d'une seule valeur de recouvrement pour toute une classe de végétation empêche l'appréhension de l'hétérogénéité du

milieu étudié. Cette hétérogénéité est par contre beaucoup mieux exprimée à l'aide de la deuxième démarche. Cependant, pour un pixel donné, si la valeur moyenne de NDVI varie chaque année, cela conduit à l'estimation d'une valeur différente de recouvrement arboré chaque année. Or, dans la réalité les vitesses de peuplement ou dépeuplement arborées se font, sauf exception (déforestation), à un rythme relativement lent. Les variations de recouvrements arborés ne sont généralement perceptibles qu'après comparaison sur plusieurs années d'intervalle. Il semble donc qu'il faille s'orienter vers d'autres démarches destinées à identifier le type de formation végétale majoritairement responsable du signal enregistré pour chaque pixel. Une solution envisageable consisterait en un couplage des informations NOAA/AVHRR avec des données à haute résolution spatiale de type SPOT. Cette procédure pourrait comporter une première étape de classification automatique des évolutions temporelles de NDVI. Les classes ainsi déterminées délimitent des zones caractérisées par un comportement spectral similaire qui seront supposés être le reflet d'une certaine homogénéité du type de végétation leur correspondant. La seconde étape consisterait à caractériser chaque classe à l'aide d'un échantillon de scènes SPOT. Elles seraient utilisées pour déterminer des paramètres tels que le taux moyen de recouvrement herbacé et arboré, le type principal de formation végétale, la présence majoritaire de plantes annuelles ou pérennes. Ces dernières, par la mise en place de tissus de réserves (tubercules, bulbes) pour survivre à la saison sèche, possèdent un rapport "partie aérienne/partie souterraine" qui diffère sensiblement de celui des annuelles. Si l'on veut améliorer les estimations de la PPN de l'Afrique de l'ouest, cette distinction entre ces deux groupes d'herbacées sera obligatoire. En effet, le tapis herbacé passe d'une dominance de plantes pérennes en zone guinéenne à une dominance d'annuelles en zone sahélienne.
Les valeurs déterminées à l'aide des images SPOT seraient ensuite étendues à toute la classe NOAA correspondante. Il faut souligner que cette démarche serait en mesure de fournir également des informations telles que le type de sol en présence. Cette donnée pourrait servir à mieux définir la valeur de "NDVI sol nu" servant à établir la relation "ε_i/NDVI" ou encore à permettre l'emploi d'indices de végétation moins sensibles à l'influence du sol. Cependant, selon le nombre de classes déterminées, cette démarche pourrait rapidement s'avérer impossible à mettre en oeuvre en raison du coût et de la quantité élevés des données satellitaires requises.

- Une deuxième cause de surestimation des valeurs de PPN par le modèle satellitaire concerne la valeur de ε_b retenue pour l'étude. Faute de données s'intéressant aux espèces savanicoles naturelles, j'ai dû opter pour l'utilisation d'une valeur se rapportant à une espèce savanicole cultivée (*Panicum maximum*). Comme ja l'ai déjà mentionné, les plantes cultivées sont issues de programmes de sélection qui visent, le plus souvent, à obtenir des sujets à fortes productions. A cela s'ajoute le fait que ces plantes sont généralement cultivées en conditions non limitantes en eau et en éléments nutritifs. Pour puiser ce dont elles ont besoin dans le sol, elles n'ont donc pas à investir dans un système racinaire très développé. La demande en produits photosynthétiques par le compartiment racinaire est moins élevée et conduit à une augmentation apparente de la productivité des parties aériennes. De par ces processus, il semble que les

différences d'efficience de conversion entre espèces cultivées et espèces naturelles soient très sensibles. Ruimy (1991) a recensé, lors d'une étude bibliographique, une valeur moyenne de 2.34 g MS/MJ RPA absorbé pour des cultures herbacées en C3 non légumineuses. Pour des prairies basses naturelles, la valeur obtenue est de 0.74 g MS/MJ RPA absorbé soit une efficience 3 fois plus faible que celle des plantes cultivées. Pour ce qui concerne les plantes de type C4, les connaissances actuelles ne permettent pas de définir clairement si ce rapport d'efficiences photochimiques est similaire ou non à celui des plantes C3. Toutefois, en rassemblant des données de diverses origines bibliographiques, nous avons tenté d'en faire une estimation. Pour cela, il a été considéré que les valeurs moyennes de production mesurées dans le sud de la Côte d'Ivoire sont de 12 t MS/ha/an, que le rayonnement global moyen annuel y est d'environ 5800 MJ/m^2, que l'interception moyenne du rayonnement incident par le couvert est d'environ 50 % et enfin que la longueur du cycle de végétation est de 9 mois. A l'aide de ces données, la valeur de ε_b estimée est de 1.1 g MS/MJ RPA intercepté, soit une valeur deux fois plus faible que la valeur utilisée dans ce travail. Cependant, on ne peut retenir de cette estimation qu'un caractère prospectif et il est impossible, objectivement, de substituer cette estimation à la valeur retenue dans ce travail.

En dépit de la lourdeur du travail requis, il semble que la mise en place de campagnes de mesures de terrain soit la seule solution envisageable pour pouvoir disposer, à relativement court terme, de données concernant la végétation naturelle. Ce besoin vaut également pour la végétation arborée. Dans ce travail, l'efficience photochimique des arbres de savanes a été assimilée à celles des arbres de forêts denses ce qui conduit certainement à une imprécision des estimations de PPN. A titre d'exemple, lorsque l'on considère les forêts sempervirentes tempérées, une valeur moyenne d'ε_b de 1.38 g MS/MJ RPAa a été recensée pour des forêts de feuillus alors qu'elle n'est que de 1.09 g MS/MJ RPAa pour les forêts de conifères (Ruimy, 1991). Malgré les problèmes de validité qui caractérisent actuellement le paramètre ε_b, il semble cependant qu'il ne faille pas abandonner son utilisation. Cette remarque est motivée par deux raisons principales.

Premièrement on peut noter dans ce travail, que lorsque l'on a pu obtenir des valeurs de ε_b se rapportant effectivement à la formation végétale étudiée, les estimations de PPN semblent quantitativement satisfaisantes. C'est le cas des zones de forêts denses où la production estimée varie entre 12 et 20 t MS/ha/an et est en accord avec les valeurs fournies par la formulation de Lieth et également avec la valeur de 17 t MS/ha/an mesurée par Bernhard-Reversat *et al.* (1978) pour une forêt dense de Côte d'Ivoire.

Deuxièmement, de grands projets internationaux et multidisciplinaires sont mis en place actuellement et vont permettre, dans les quelques années à venir, de fournir ce type de paramètre. C'est le cas en particulier du programme Savane A Long Terme (SALT) qui a pour objectif d'étudier le fonctionnement et la dynamique des zones savanicoles (ouest africaines principalement). Des sites étudiés dans le cadre du programme Global Change and Terrestrial Ecosystems (GCTE) devraient permettre de fournir des valeurs pour d'autres types d'écosystèmes végétaux ou d'autres régions (steppes mongoliennes, savanes australiennes).

- Ainsi que cela a été largement souligné au cours de la présentation bibliographique, les estimations obtenues à l'aide de la formulation de Monteith, sont des valeurs de PPN potentielles. L'approximation de valeurs réelles suppose de prendre en compte les limitations de la productivité induites par le milieu. Certains auteurs tels qu'Asrar *et al.* (1984) ont essayé d'estimer cette pression du milieu en ajoutant à la formulation de Monteith un indice de stress. Celui-ci a été établi à partir du rapport "EvapoTranspiration Potentielle/EvapoTranspiration Réelle" (ETP/ETR) en vue de traduire l'effet d'un stress hydrique. L'utilisation d'un tel indice nous expose à plusieurs problèmes. Tout d'abord, pour une application à l'échelle régionale nous sommes une fois de plus confronté à un manque de données. Pour pallier ce besoin, certains auteurs ont tenté d'estimer l'ETP et l'ETR à partir de mesures satellitaires effectuées dans l'infrarouge thermique (Seguin et Itier, 1983; Vidal et Perrier, 1989; Lagouarde, 1991). Cependant, ces méthodes souffrent actuellement d'un problème de faible représentativité de la mesure ponctuelle satellitaire à l'échelle journalière. Ensuite, cet indice de stress ne tient compte que du facteur hydrique comme élément limitant la productivité. Enfin, comme nous l'avons déjà mentionné, la mesure satellitaire représente la réponse intégrée de la végétation à tous les facteurs qui agissent sur son fonctionnement. De ce fait, l'adjonction d'un indice de stress à l'utilisation de la mesure satellitaire risque d'entraîner une double prise en compte des effets limitant la production (Goward and Dye, 1987). Ainsi, la prise en compte du stress imposé par le milieu sur le niveau de productivité primaire demeure actuellement un problème entier.

- Dans certaines régions de l'Afrique de l'ouest l'homme exerce une action très importante sur la végétation naturelle. Ainsi, au Burkina Faso de larges surfaces de savanes ont été transformées en zones de culture extensive de coton (Gond, Lavenu, communications personnelles). La composition du tapis végétal est donc passée d'une dominance de plantes de type C4 à une dominance de type C3. La valeur d'ε_b utilisée dans cette étude conduira donc à une plus forte surestimation de la PPN pour ces zones. Cette remarque renforce l'idée d'une nécessité d'identification du type de végétation dominant compris dans chaque pixel.

Lorsque l'on considère les zones sahéliennes, on assiste non plus à une surestimation des valeurs de PPN mais à une sous estimation par rapport aux valeurs fournies par la formulation de Lieth. Les modèles statistiques de type Lieth ne sont généralement valides que pour la gamme de données qui ont servies à établir la relation. Ainsi, pour une pluviométrie annuelle de 500 mm une PPN de 7 t MS/ha est estimée à l'aide de la formulation de Lieth alors que les valeurs observées en Afrique de l'ouest dépassent rarement 2.5 t MS pour ce niveau de pluviométrie. Cette différence provient du fait que la majeure partie des données ayant servi à construire la relation sont issues de travaux effectués en zone tempérée froide. Dans ces régions, la demande évaporative climatique est beaucoup plus faible qu'en zone tropicale ce qui conduit à une forte diminution de l'impact hydrique sur la productivité. Cet exemple illustre bien les problèmes qu'entraînent l'utilisation de modèles statistiques à l'échelle globale. Il semble que pour obtenir

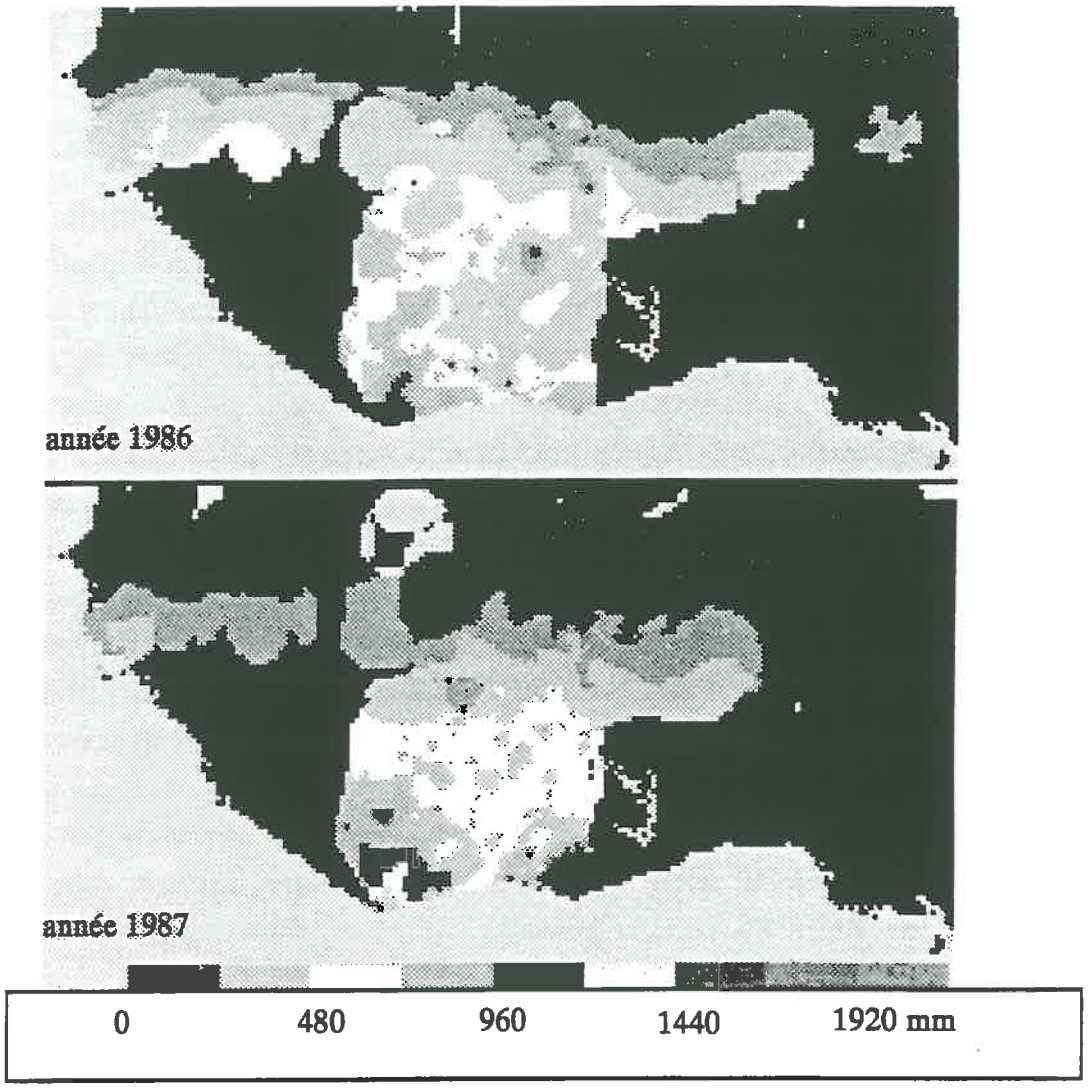


Figure 7.19 : Pluviomètrie annuelle dérivée des données fournies par l'A.S.E.C.N.A. et le réseau AGRHYMET

des comparaisons plus réalistes, il ne faudrait pas utiliser une relation globale mais une gamme de relations adaptées chacune à une région climatique particulière.

En comparant les images de production (fig. 7.18) et les images de pluviométrie (Fig. 7.19) on s'aperçoit que la limite des zones non productives qui est déterminée à partir du modèle satellitaire suit approximativement les limites de l'isohyète 250 mm. Or, dans les régions caractérisées par une pluviométrie comprise entre 100 et 250 mm la végétation est encore présente et les valeurs de biomasses mesurées peuvent aller jusqu'à 1.5 t MS/ha (Menaut, 1979). Pour ces zones, les caractéristiques spectrales et la résolution spatiale des capteurs NOAA/AVHRR ne permettent donc pas de discerner la présence de végétation. Ainsi, Tucker *et al.* (1985), Huete et Tucker (1991) dans des études menées au Sénégal, ont observé que les valeurs de NDVI extraites des zones dont la biomasse herbacée est inférieure à 300 kg/ha (< 20 % de recouvrement) étaient indissociables des valeurs enregistrées pour les sols nus voisins. Ce fait provoque une autre conséquence gênante lorsqu'une relation statistique "cumul de NDVI/biomasse" est utilisée pour estimer la production d'une région. En effet, dans les zones de faible production, les valeurs de biomasse seront associées à des cumuls de NDVI de valeurs identiques à ceux de certains sols nus. Lorsque la relation sera étendue à toute une région, de larges surfaces de sols théoriquement nus se verront attribuer une valeur de production. Sur des images de PPN aérienne obtenues au Sénégal en 1987 et 1988 par Diallo *et al.* (1991) à partir de données LAC NOAA/AVHRR, on peut noter que la valeur de ces attributions erronées peut atteindre 1 t MS/ha.

Comme nous l'avons vu au chapitre III, à cause de problèmes techniques de transmission et de stockage de l'information, l'obtention d'une répétitivité temporelle élevée de la mesure ne peut se faire qu'au dépend d'une limitation de la résolution spatiale des capteurs et même de sous échantillonnages des données. Il est possible d'envisager, dans les années à venir, de s'affranchir du problème de sous échantillonnage par une augmentation des capacités de traitement des systèmes informatiques. Ainsi, pour des études régionales, il serait possible d'utiliser l'information satellitaire non plus à une résolution GVI mais à une résolution GAC voir même LAC. Par contre, pour ce qui concerne la résolution des capteurs des satellites à haute résolution temporelle, aucune modification n'est à entrevoir avant les années 2000, 2010. Les futurs satellites de la NOAA sont actuellement prévus avec une résolution spatiale inchangée, soit 1.1 km au nadir. Le nouveau capteur européen "Végétation Monitoring Instrument : VMI", spécifié comme l'indique son nom pour l'étude de la végétation, et qui sera embarqué sur la plate-forme SPOT4, aura sensiblement la même résolution. Toutefois, il devrait présenter plusieurs avantages par rapport aux capteurs NOAA/AVHRR dont nous discuterons ultérieurement.

7.24c) Variations interannuelles de la PPN

Une comparaison quantitative des variations de valeurs de PPN estimées à l'aide du modèle satellitaire n'est pas réalisable. En effet, comme nous venons de le voir, d'une part la

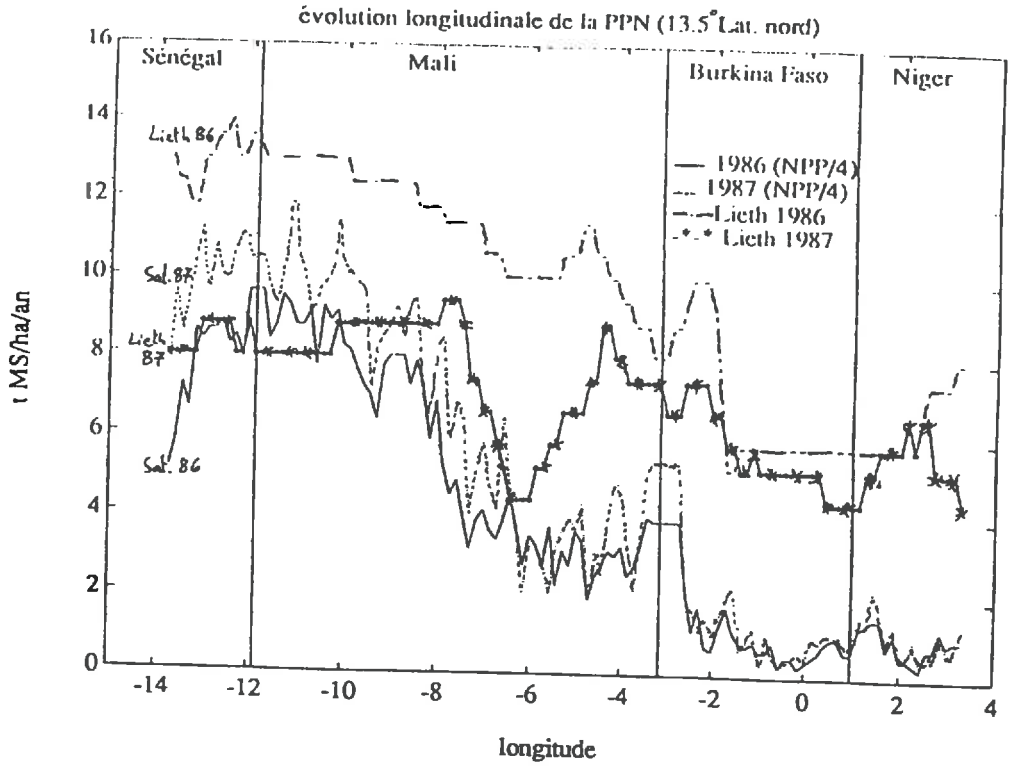


Figure 7.20 : Evolutions longitudinales de la PPN estimée par le modèle de Lieth and Whittaker (1975) et le modèle satellitaire. Les courbes sont tracées pour la latitude 13.5° nord. Les valeurs du modèle satellitaire ont été divisées par 4. Les années étudiées sont 1986 et 1987.

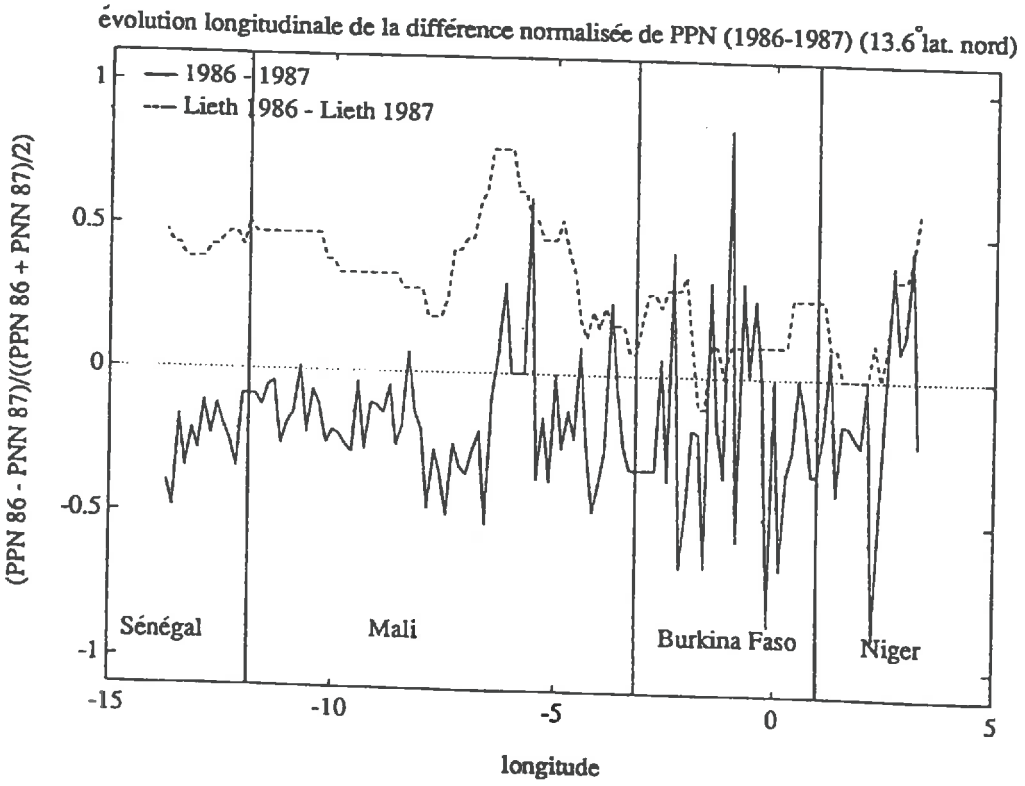


Figure 7.21 : Evolutions longitudinales de la différence normalisée (1986-1987) de la PPN estimée par le modèle de Lieth and Whittaker (1975) et le modèle satellitaire. Les courbes sont tracées pour la latitude 13.5° nord.

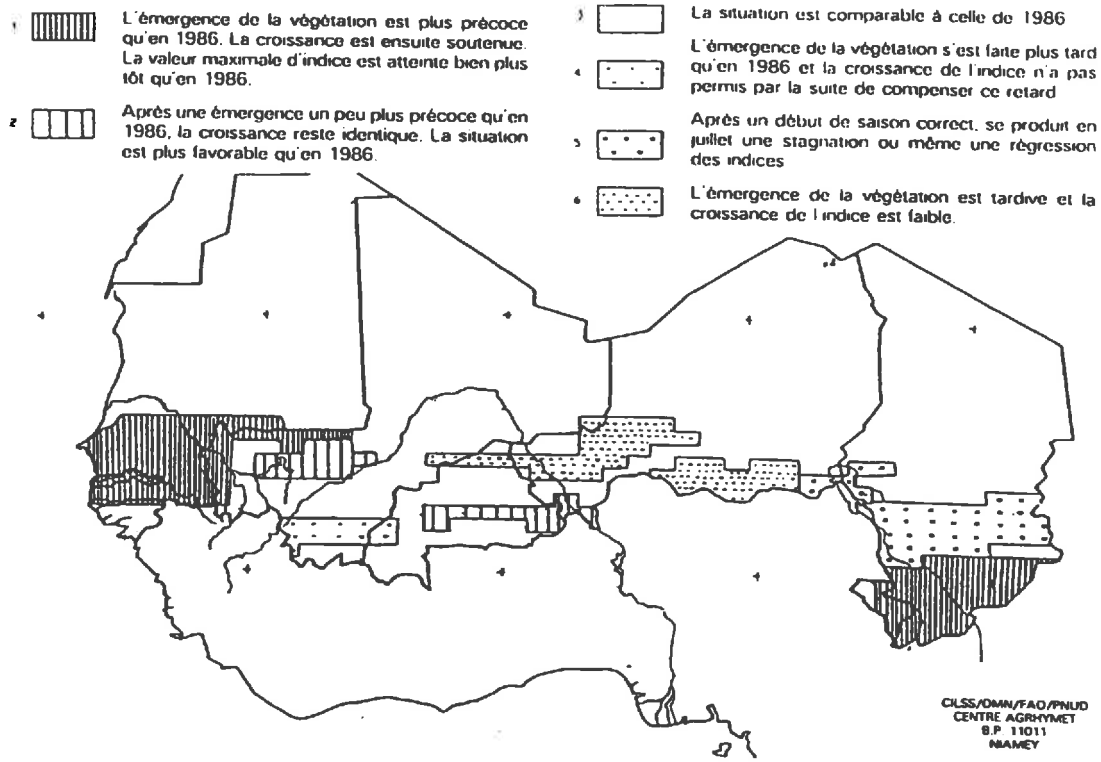


Figure 7.22 : Evolution de la biomasse végétale observée par satellite (NOAA/AVHRR). Situation au 20 septembre 1987. Comparaison avec l'évolution observée en 1986.

D'après Nègre (1988)

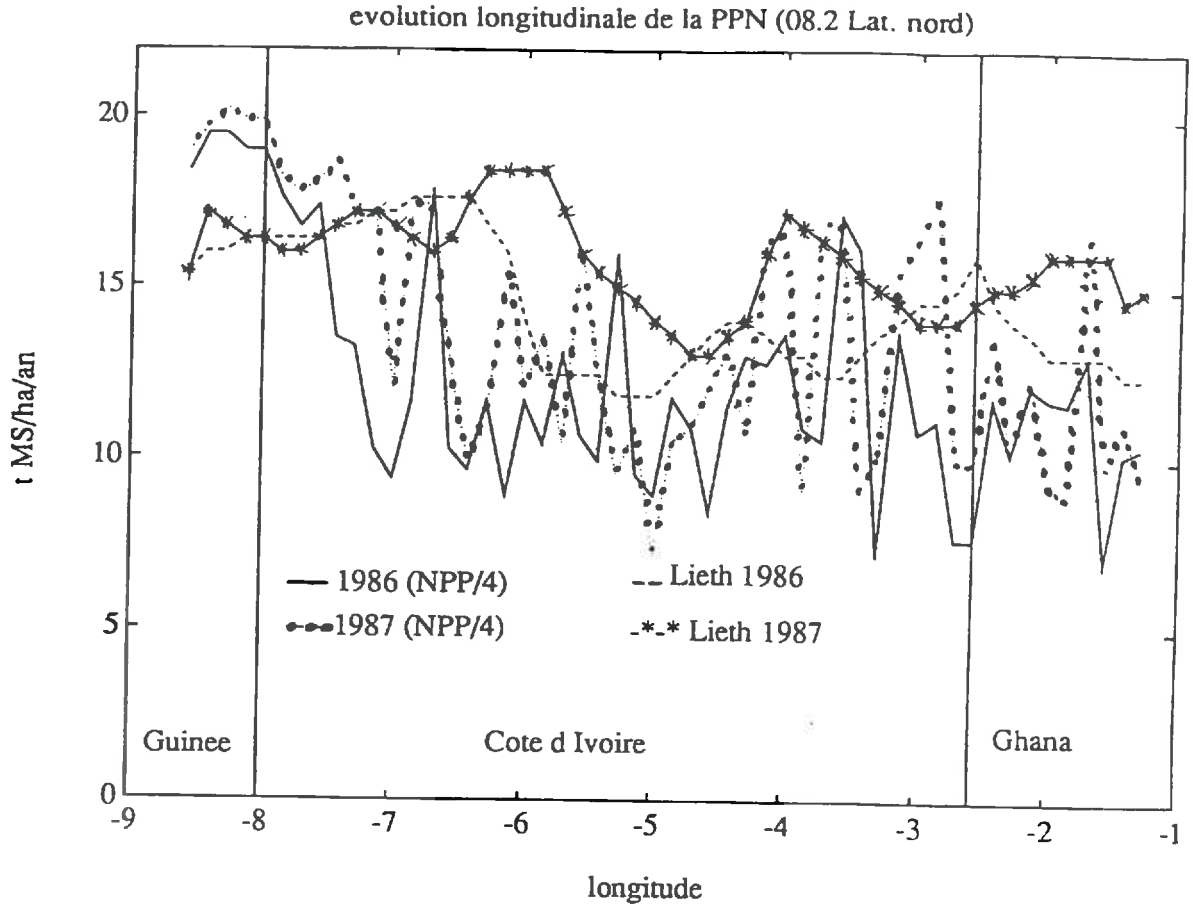


Figure 7.23 : Evolutions longitudinales de la PPN estimée par le modèle de Lieth et Whittaker (1975) et le modèle satellitaire. Les courbes sont tracées pour la latitude 08.2° nord et pour les années 1986, 1987. Les valeurs des courbes correspondant au modèle satellitaire sont à multiplier par 4.

formulation de Lieth n'est pas bien adaptée aux régions que l'on a étudiées, d'autre part, les estimations satellitaires sont actuellement assez fortement surestimées. Malgré cela, une appréciation qualitative des variations interannuelles de PPN semble possible.

- Les remarques faites quant à la détermination de la variabilité spatiale peuvent également s'appliquer à la variabilité interannuelle. En effet, si l'on se situe dans une région où la pluviométrie est le facteur limitant principal, les variations interannuelles de production dues à des variations de pluviométrie pourront être perçues par les deux méthodes d'estimation de la PPN. Cependant, en comparant les figures 7.18 et 7.19, on note qu'au Sénégal les valeurs de production estimées en 1987 sont supérieures à celles estimées en 1986 alors que la pluviométrie a été plus faible. Par le modèle de Lieth l'évolution estimée est bien entendu inverse. Ce fait peut être expliqué par une meilleure répartition des pluies au cours de l'année 1987 ou par des chutes de pluies moins violentes, ce que l'on rassemble généralement sous le terme de qualité de la pluie. La formulation de Lieth qui ne prend en compte que la quantité annuelle de pluies ne peut donc pas refléter ces phénomènes. Dans le nord du Burkina Faso et le sud du Niger (≅14.5° lat. nord) la production estimée à l'aide des données satellitaires a été supérieure en 1986 et suit la même évolution que la pluviométrie. Pour mieux mettre en évidence ces variations, des courbes d'évolution longitudinale de la PPN estimée par les deux méthodes en 1986 et 1987, ont été constituées à différentes latitudes. Un exemple en est donné sur la figure 7.20. Cependant, comme les valeurs des estimations diffèrent fortement j'ai préféré exprimer les résultats sous forme d'une différence normalisée de la PPN entre les deux. De ce fait, les amplitudes de variation enregistrées entre les deux méthodes sont comparables. Sur la figure 7.21 est présenté le résultat obtenu à 13.5 degrés de latitude nord. A cette latitude, on observe toujours une production supérieure en 1987 au Sénégal et au sud-ouest du Mali alors que la formulation de Lieth fournit l'inverse. Ensuite, les différences entre deux types d'estimation sont moins bien marquées. Au Burkina Faso, contrairement au nord du pays, la production est supérieure en 1987. Nègre (1988) a étudié les variations d'évolution du NDVI pour les zones sahéliennes entre l'année 1986 et 1987. Les variations qu'il a observé sont similaires à celles de la PPN obtenues à l'aide du modèle satellitaire (Fig.7.22). Ce résultat est évident puisque les données utilisées proviennent du même satellite. Par contre, l'auteur a pu comparer ces évolutions avec des cartes de rendements de mil et de sorgho évalués par enquêtes pour ces deux années au Sahel et rapportées par la FAO. Des indices de satisfaction en eau pour les cultures sont également fournis. L'examen de ces cartes a montré les mêmes évolutions que celles identifiées par l'imagerie satellitaire. Ces résultats confirment bien l'avantage que présentent les données satellitaires par rapport à une méthodologie de type Lieth, en fournissant une mesure qui rend compte directement de l'état de la surface étudiée. La figure 7.23 représentant les évolutions longitudinales des estimations de PPN obtenues à 8.2° de latitude nord permet de bien mettre en évidence ce fait. Les variations des profils restent inchangées d'une année à l'autre pour les estimations satellitaires, ce qui montre que l'on suit bien la même "structure" au sol chaque année. Seule l'amplitude des variations est modifiée d'une année à l'autre qui reflète une prise en

compte des changements de quantité de matières végétales, principalement vertes, situées dans ces "structures". Le modèle de Lieth traduit quant à lui les variations interannuelles des quantités de pluies et les profils obtenus sont, chaque année, très dissemblables.

7.25) Erreurs de précision du modèle satellitaire

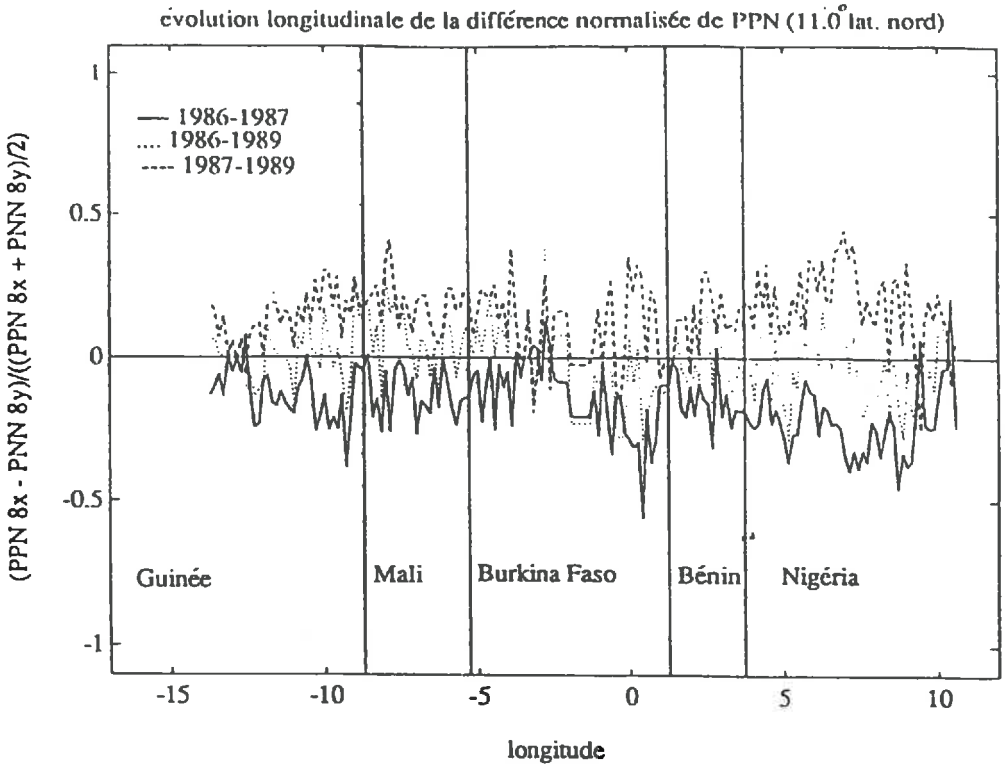
Nous avons vu au paragraphe 6.16 que les erreurs de précision de chacun des paramètres du modèle peuvent actuellement conduire à une erreur relative totale dans l'estimation de la PPN de près de 60 % par rapport à la valeur moyenne hebdomadaire. Nous allons maintenant discuter de différents facteurs qui, dans la mise en oeuvre actuelle du modèle, entraînent une certaine imprécision dans le calcul des valeurs de PPN. Par commodité de présentation, ces points vont être identifiés en reprenant chacun des paramètres du modèle.

- Pour ce qui concerne l'efficience climatique (ε_c), nous avons vu que c'est un paramètre très peu variable. Mise à part l'erreur de précision que possède ce facteur, l'utilisation d'une seule valeur pour toute la zone étudiée et constante au cours du temps n'a semble t'il pas créé de fortes imprécisions dans le calcul des valeurs de PPN.

- La caractérisation de l'efficience biologique (ε_b) constitue bien quant à elle un facteur majeur d'imprécision du modèle. Comme cela a déjà été exposé, quelle que soit l'échelle considérée, les milieux savanicoles sont composés d'une gamme assez large de formations végétales et par conséquent de niveaux de productivité. L'emploi d'une seule valeur d'ε_b pour toutes ces formations conduit donc à une plus ou moins forte incertitude qui dépend de son plus ou moins bon accord avec la valeur d'efficience réelle de chaque formation. Dans ce travail, deux démarches visant à prendre en compte cette hétérogénéité du milieu ont été testées et se sont révélées générer également une certaine imprécision. Ces deux procédures souffrent d'un manque important de données permettant l'initialisation correcte de paramètres descriptifs des différentes formations végétales (taux de recouvrement arboré et herbacé par exemple). Dans la première démarche, une carte de la végétation a été utilisée pour délimiter les zones de répartition de grands groupes savanicoles. Depuis que cette carte a été établie il est possible que les surfaces occupées par certaines formations aient beaucoup évoluées ce qui semble être le cas en particulier de la forêt dense. A titre d'exemple, sont indiquées dans le tableau 7.1, des valeurs de déforestation moyenne annuelle (1976-1980) estimées par Lanly (1981) pour le compte de la FAO.

De plus, les critères de classification utilisés pour établir la carte de l'AETFAT sont basés surtout sur des notions de hauteur respective des différentes strates. Il est fort probable qui si des critères correspondant plus aux besoins de notre étude (densité et répartition des arbres, recouvrement arboré, recouvrement herbacé) avaient été utilisés, les limites de classes auraient été différentes. Dans la seconde méthode, comme cela a été indiqué précédemment, l'attribution

a)



b)

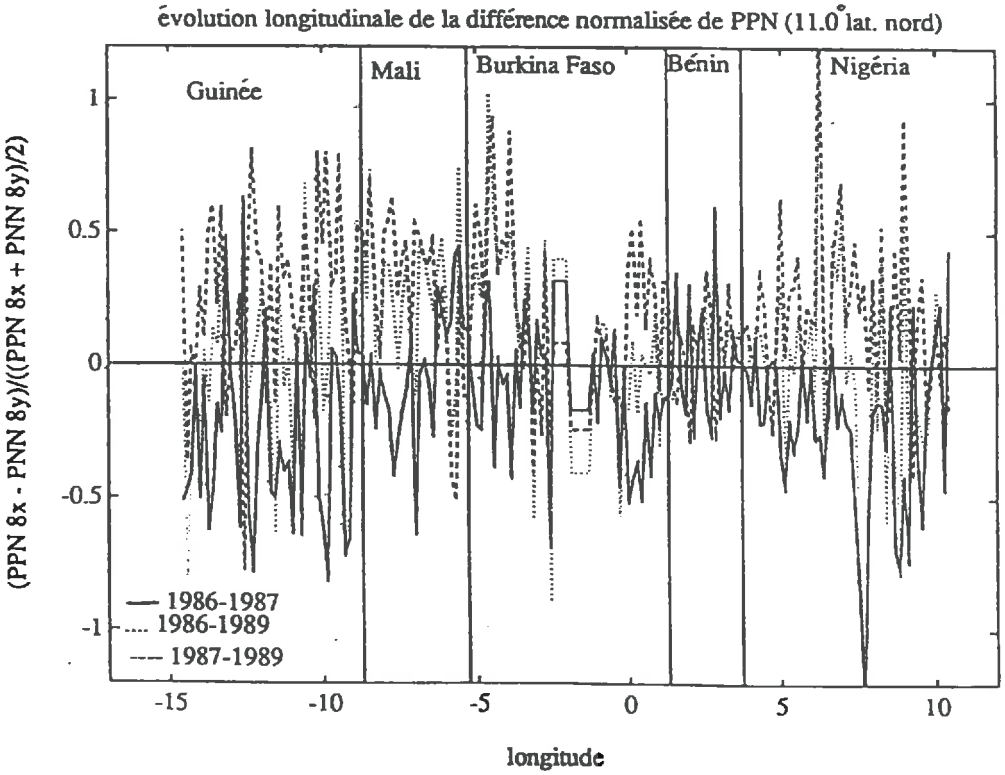


Figure 7.24 : Evolutions longitudinales des différences normalisées de la PPN estimée par le modèle de Lieth and Whittaker (1975) et le modèle satellitaire. Les courbes sont tracées pour la latitude 11° nord. Les années 1986, 1987 et 1989 sont comparées entre elles.
a) Les valeurs de PPN ont été calculées sans considérer de cycle de végétation.
b) Les valeurs de PPN ont été calculées en considérant un cycle de végétation

d'une valeur de recouvrement arboré en fonction de la valeur du GVI moyen annuel peut conduire à des variations interannuelles de recouvrement non compatibles avec la réalité.

Pays	Superficie forestière tropicale en 1980 (km2)	déforestation annuelle entre 1976 et 1980 (km2)
Bénin	470	15
Ghana	17180	220
Guinée	20500	360
Guinée Bissau	6600	170
Côte d'Ivoire	44580	2900
Liberia	20000	460
Nigeria	69500	3000
Sierra Leone	7400	60

Tableau 7.1 : Superficies des forêts tropicales humides en 1980 et déforestation annuelle (1976-1980) pour quelques pays d'Afrique de l'ouest. (d'après Lanly, 1981).

L'atténuation de ces imprécisions passe obligatoirement par une étape d'obtention de valeurs de terrain. Ces valeurs doivent être accompagnées d'une méthode de détermination du type principal de formation végétale responsable du signal enregistré pour chaque pixel telle que l'hypothèse de classification formulée dans le paragraphe 7.24b.

- L'existence d'une relation linéaire ou quasi linéaire entre l'efficience d'interception (ε_i) et le NDVI n'a, jusqu'à présent, été mise en évidence que pour des couverts homogènes. Exceptées les grandes zones de productions agricoles existant en Europe ou aux Etats-Unis, rares sont les régions du globe où les couverts végétaux sont homogènes sur des surfaces équivalent à un pixel NOAA/AVHRR. Il serait donc intéressant de faire une étude de sensibilité de la relation "ε_i/NDVI" à l'hétérogénéité du couvert. Une première approche consisterait peut être en l'étude de la variation des droites obtenues à partir de mesures effectuées pour différents couverts compris dans une surface donnée. Une autre cause d'imprécision provient de la sensibilité du NDVI à l'influence du sol. Dans ce travail, une seule équation de droite "ε_i/NDVI" a été déterminée et utilisée pour toute l'Afrique de l'ouest. De façon identique à l'efficience biologique, il serait souhaitable de pouvoir identifier, pour chaque pixel, la nature, la couleur du sol prédominant afin d'adapter la valeur correspondant au sol nu et donc à l'efficience d'interception égale à zéro. L'hypothèse de classification des sols peut être identique à celle proposée pour la végétation. La classification du signal serait limitée à la période d'hivernage (décembre à mars). Durant cette période la végétation herbacée est inactive sur la quasi totalité de l'Afrique de l'ouest. Enfin, eu égard à la difficulté de manipulation imposée, des relations "ε_i/NDVI" n'ont, jusqu'à présent, pas été établies pour des arbres. Cependant, étant donné le fort pourcentage que représentent les surfaces non photosynthétiquement actives (tronc, branches), il

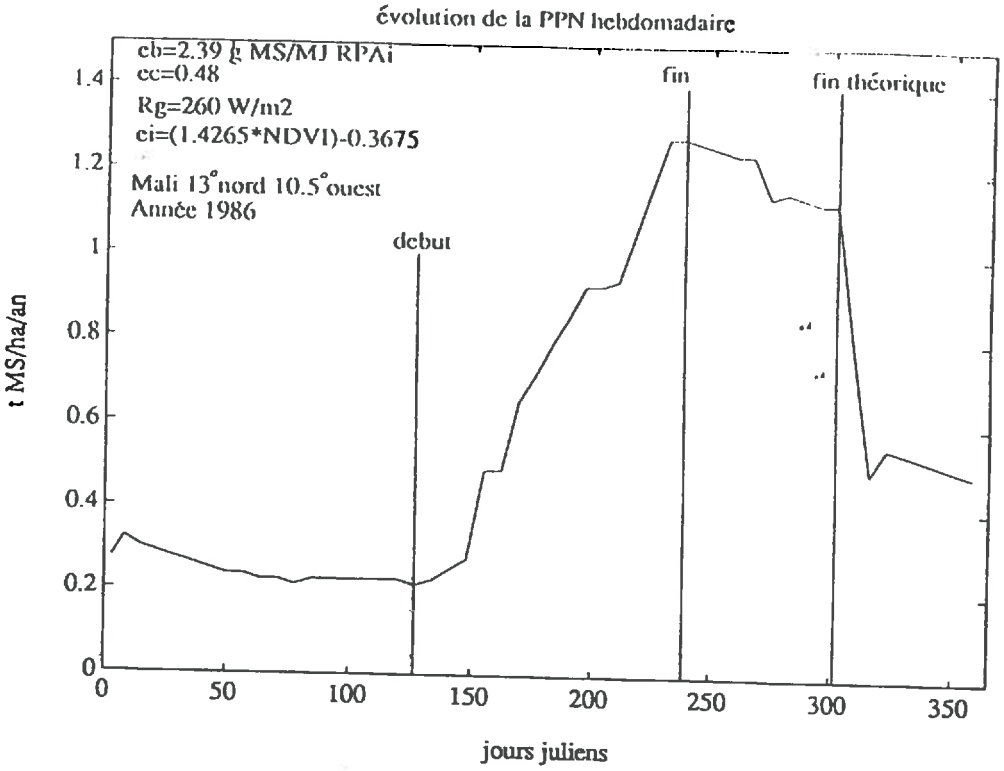


Figure 7.25 : Evolution de la PPN hebdomadaire estimée en 1986 pour un pixel localisé à 13° de latitude nord et 10.5° de longitude ouest. Les données satellitaires ont été étalonées et corrigées de l'influence de l'atmosphère. Les données de GVI ont été filtrées.

est fort probable que les relations "ε_i/NDVI" différent sensiblement de celles observées pour des structures végétales. Ainsi que nous l'avons déjà vu, le pourcentage de structures non photosynthétiquement actives est généralement faible dans les couverts herbacés durant la phase de croissance végétative. Ce fait autorise l'assimilation de la quantité de RPA interceptée par le couvert à la quantité réellement absorbée pour le fonctionnement photosynthétique. Pour ce qui concerne les arbres cette hypothèse ne peut plus être formulée. En effet, jusqu'à la fermeture de la canopée, les troncs et les branches constitueront des surfaces d'interception du rayonnement qui ne servira pas à la photosynthèse. L'absence actuelle de mesures ou de modèles empêche toute quantification de l'évolution temporelle du rapport RPAi/RPAa pour les arbres.

- Pour estimer le rayonnement global incident, des données dérivées de mesures effectuées par le satellite Météosat ont été utilisées. Le fichier estimé pour l'année 1983 a été considéré comme valide pour toutes les années de traitement. Nous avons vu dans le chapitre précédent que les variations inter-mensuelles et inter-annuelles de rayonnement ne diffèrent pas sensiblement de l'erreur de mesure caractérisant ce paramètre. Dans l'estimation du bilan d'erreur du modèle satellitaire, les données de rayonnement global ont une incidence sur l'estimation de la PPN bien inférieure aux valeurs d'efficience d'interception et d'efficience biologique. Malgré cela, il serait tout de même souhaitable de pouvoir disposer des estimations de rayonnement global pour chaque année de traitement. Ce travail est en cours de réalisation par différents laboratoires et en particulier à la NASA où il est procédé à une estimation globale du rayonnement à partir de données satellitaires.

- Pour ce qui concerne le temps d'intégration, une procédure destinée à déterminer pour chaque pixel une date de début et de fin de "cycle de végétation" a été utilisée. Le temps d'intégration des valeurs de PPN a ensuite été borné par ces deux valeurs. L'hypothèse d'un arrêt de l'activité photosynthétique lorsque le maximum du cycle de NDVI est atteint (date de fin de cycle) a également été émise. Lors de la comparaison interannuelle des estimations de PPN, un fort bruit est apparu dans les courbes d'évolution longitudinales de la différence de PPN comparativement aux variations obtenues sans limitation par un cycle (Fig. 7.24). Sur la figure 7.25 est présenté un exemple d'évolution de la PPN hebdomadaire estimée à l'aide du modèle satellitaire. Si toutes les valeurs de NDVI sont prises en compte, la valeur de PPN annuelle estimée est de 32.04 t MS/ha. Après détermination d'une date de début et fin de cycle, cette valeur est réduite à 12.28 t MS/ha. Pour l'exemple présenté, l'arrêt du temps d'intégration une semaine avant la date déterminée cause une baisse de 11.6% de la valeur de PPN. A l'opposé l'intégration d'une semaine de plus provoque une hausse de 9.6 %. De plus, on s'aperçoit que la fin de cycle se situe théoriquement 9 semaines après la date déterminée. Si l'on tient compte de cette date on obtient une production annuelle de 24.17 t MS/ha soit une valeur environ deux fois plus élevée que celle déterminée. Ces résultats montrent la forte sensibilité du modèle à l'hypothèse d'arrêt brutal de la productivité lorsque que le maximum de développement du couvert est atteint ainsi qu'au mode de détermination des dates de début et fin de cycle.

Pour pallier ce problème il serait possible de considérer une décroissance linéaire de l'efficience de conversion entre la valeur de NDVI maximum du cycle et la valeur "NDVI sol nu". Si l'on applique cette démarche à l'exemple cité ci-dessus, une valeur de PPN annuelle de 22.95 t MS/ha est obtenue, ce qui est plus en accord avec la valeur de 24.17 t MS/ha "théoriquement" déterminée. De plus, cet "arrêt progressif" de la productivité permettrait sans doute une meilleure représentation du fonctionnement des formations végétales naturelles dont les différentes espèces qui les composent présentent des cycles de végétation plus ou moins asynchrones.

- Comme nous l'avons vu dans la partie "traitement du signal satellitaire", les différentes étapes du traitement peuvent être actuellement génératrices d'une certaine imprécision. Ainsi le mode de détermination des coefficients d'étalonnage par le suivi d'une "cible stable" au sol ne permet l'obtention d'une forte précision des coefficients estimés. Lorsque les valeurs de réflectances sont corrigées de l'influence de l'atmosphère, l'utilisation de données climatologiques moyennées sur plusieurs années, à défaut de celles correspondant à l'année traitée, est également une source d'imprécision. D'ici à quelques années, des solutions devraient être apportées à ces problèmes. Tout d'abord, la mise en place de grands projets à long terme de type Global Change, SALT, Hapex, ... permettra l'accès à une large gamme de données qui seront utiles au traitement du signal (mesures d'épaisseur optique de l'atmosphère, détermination du contenu en eau de l'atmosphère, etc). Conjointement à ces programmes, la constitution de réseaux de bases de données devraient faciliter l'accès à de nombreuses données actuellement dispersées dans différents instituts à travers le monde. Enfin, de nouveaux capteurs satellitaires, bénéficiant de l'expérience des capteurs déjà lancés, vont prochainement être disponibles. Il en est ainsi de l'instrument européen V.M.I. qui doit être mis sur orbite en 1996. De résolutions spatiale et temporelle identiques aux capteurs NOAA/AVHRR, les enregistrements devraient être fournis avec une précision sensiblement améliorée. Ainsi, ce capteur disposera d'un système de calibration à bord. Les canaux visible et proche infrarouge ont été modifiés de façon à être mieux centrés sur les zones de forte absorption ou forte réflexion du rayonnement par les couverts végétaux. L'heure de passage à l'équateur devrait être située vers 10h30mn TU au lieu de 14h30mn TU pour NOAA. Cette heure a été déterminée comme celle présentant la plus faible probabilité d'occurrence de nuages au cours d'une journée. Ce capteur sera embarqué sur la même plate-forme que le satellite haute résolution spatiale SPOT 4. L'enregistrement simultané des données SPOT et V.M.I. devrait permettre d'obtenir une précision de localisation des enregistrements V.M.I. de l'ordre de 2.5 km contre 5 km actuellement pour les données NOAA/AVHRR. En plus de la simultanéité d'enregistrements, les deux instruments posséderont des bandes spectrales identiques ce qui devrait largement contribuer à l'étude de la dégradation spatiale de l'information satellitaire.

- Au vu des différents facteurs énumérés ci-dessus, il ressort que les valeurs de PPN, déterminées à l'aide du modèle satellitaire utilisé dans ce travail, sont actuellement empreintes

d'une assez forte incertitude. Cependant, comme nous avons pu le voir, l'acquisition future d'informations ainsi que l'amélioration du traitement du signal radiométrique laissent envisager qu'une nette réduction de cette imprécision sera réalisable. Face à cette démarche, l'autre méthode d'estimation de la PPN à l'échelle régionale et globale que constitue le modèle statistique de Lieth ne présente pas une précision sensiblement meilleure. Toutes les variations de PPN non dépendantes de variations quantitatives de la pluviométrie annuelle ne sont pas perçues par ce type de modèle. Les hypothèses émises pour formuler l'équation conduisent à une productivité nulle uniquement lorsque la pluviométrie est nulle et à un maximum de productivité ne pouvant excéder 30 t MS/ha /an. Or, en culture intensive, des valeurs de PPN aériennes allant jusqu'à 80 t MS/ha ont été enregistrées pour des plantations de canne à sucre. En végétation naturelle, des valeurs de 70 t MS/ha/an ont été observées pour des formations de canne de Provence (Massoud, 1992). Contrairement au modèle satellitaire, le modèle de Lieth ne peut permettre la caractérisation de ce type de formation végétale.

7.26) Perspectives d'extension à l'échelle globale

L'objectif du travail présenté était de tester l'apport des données satellitaires dans l'estimation de la PPN à l'échelle régionale. Pour ce faire, un modèle d'estimation a été mis au point et la mise en oeuvre à l'échelle de l'Afrique de l'ouest a été testée. Nous avons vu tout au long de l'exposé que plusieurs paramètres ont été initialisés en fonction d'hypothèses formulées à partir des caractéristiques propres des écosystèmes savanicoles ouest africains. L'objectif final étant l'estimation de la PPN pour l'ensemble du globe, nous allons brièvement discuter des modifications identifiées qu'il sera nécessaire de réaliser et des difficultés qu'il faudra résoudre afin d'y parvenir.

- Pour ce qui concerne l'efficience climatique, il semble, de par la faible variation qui caractérise ce paramètre, que le maintien d'une seule valeur constante pour l'ensemble du globe ne conduira pas à une source d'imprécision supérieure à celle observée dans ce travail.

- De même, l'obtention de données de rayonnement à l'échelle globale ne devrait pas constituer une limitation d'utilisation de la méthode. Comme je l'ai déjà indiqué, plusieurs laboratoires sont actuellement en cours de génération de ces données. Il est également possible d'envisager la création de chaînes de traitement des données satellitaires directement au niveau des stations de réception, assurant ainsi une fourniture en "temps réel" des données de rayonnement global.

- L'ajustement de l'efficience d'interception est, quant à lui, beaucoup plus sujet à caution. Ainsi, nous avons vu qu'il serait souhaitable d'effectuer une analyse de sensibilité de la relation "ε_i/NDVI" à la variation de structure de couverts rencontrés sur une surface donnée. L'estimation de l'évolution de cette relation pour la strate arborée est également nécessaire.

Ensuite, dans ce travail, les parties végétales sèches ont été considérées comme négligeables durant toute la période de croissance végétative. Par cette hypothèse il est possible de confondre la proportion de RPA interceptée par le couvert et déterminée par la relation "ε_i/NDVI", avec la proportion de RPA réellement absorbée pour l'assimilation chlorophyllienne. Or, lorsque l'on considère les arbres mais également certains groupements végétaux, ils présentent un pourcentage plus ou moins élevé de parties non photosynthétiquement actives (tronc, branches, feuilles sèches) qui vont intercepter une partie du rayonnement incident. Dans ces conditions, différents travaux sont nécessaires afin d'estimer comment faire évoluer une relation "efficience d'interception du RPA/NDVI" vers une relation "efficience d'absorption du RPA/NDVI".

Pour déterminer la valeur seuil de NDVI correspondant à une efficience d'interception égale à zéro, la vaste zone de sols nus que représente le Sahara a pu être utilisée comme référence. Les valeurs maximales de NDVI extraites de cette zone s'étendent sur une gamme de près de 0.2 unités de NDVI. Il serait donc utile d'adapter la relation "ε_i ou ε_a/NDVI" en fonction du type de sol présent sous le couvert végétal. Dans un premier temps, une solution pourrait consister à utiliser une carte mondiale des sols comme masque. Pour chaque classe de sol, une relation "ε_i/NDVI" devra être établie. Chaque valeur "sol nu" serait définie en prenant la valeur moyenne des NDVI minimum annuels extraits de tous les pixels correspondant à une classe de la carte des sols. Il est cependant possible que cette valeur ne puisse être déterminée pour certaines classes. Pour les forêts de conifères par exemple, la végétation est "verte" tout au long de l'année et l'observation du sol entièrement nu n'est jamais réalisable. Pour les régions tempérées et froides, il faudra être à même de différencier les périodes où les sols seront nus des périodes où ils seront recouverts de neige.

Pour ce qui concerne la valeur de NDVI correspondant à l'efficience maximale d'interception, il semble que la valeur maximale observée pour tout le globe puisse être utilisée de façon uniforme dans la détermination des différentes relation "ε_i/NDVI". Nous avons vu en effet que, pour de nombreux couverts végétaux, le NDVI sature lorsque le couvert se ferme.

- Pour ce qui est de l'efficience biologique, l'obtention de valeurs caractérisant les divers grands groupements végétaux recouvrant la surface du globe, devra obligatoirement passer par une étape de mesure de données sur le terrain. Les travaux sur les sites d'études des programmes GCTE, SALT, Hapex, ... devraient permettre de fournir un premier jeu de valeurs dans un avenir relativement proche. Pour envisager une extension d'utilisation de la démarche décrite dans ce travail à l'étude du suivi du CO_2 à l'échelle globale d'autres mesures seront nécessaires. Les deux principales, bien que difficiles à réaliser, sont l'estimation du taux de respiration et l'estimation de la production des parties souterraines.

- L'étalonnage des données satellitaires ainsi que la correction des effets perturbateurs représentent une étape très importante pour l'amélioration de la précision des estimations de PPN. Nous avons vu en particulier que le filtrage à l'aide d'une fenêtre adaptative en fonction de

la fréquence d'occurrence des nuages améliore sensiblement les possibilités d'utilisation de l'évolution temporelle du NDVI. Or pour ces régions chaudes, le repérage des nuages a été relativement aisé car les températures enregistrées à leur niveau sont généralement bien dissociables des valeurs de température à la surface du sol. Cela n'est pas le cas pour les régions tempérées et froides et l'adaptation de cette procédure de filtrage à ces régions risque d'être beaucoup moins précise.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'utilisation conjointe du modèle de Monteith (1972) et de données satellitaires à haute résolution temporelle, a permis de définir une méthodologie pour **estimer la Production Primaire Nette aérienne à l'échelle régionale**. L'apport de ces données à ce type d'échelle est un résultat très important. En effet, il répond à une forte demande formulée par la communauté scientifique internationale préoccupée par les phénomènes de changements globaux observés actuellement et tout particulièrement celui du cycle du CO_2. Il faut souligner que certaines études ou applications ont été effectuées à l'aide de ce modèle et montrent bien son intérêt lorsque les problèmes de précision seront atténués. Parmi ces travaux citons l'utilisation des valeurs de PPN afin d'estimer les émissions de CO_2 dues au passage des feux de brousse en Afrique (Delmas *et al.*, 1991; Menaut *et al.*, 1991). Une extension de cette méthode à l'ensemble du globe à également été réalisée par Ruimy (1991).

Une estimation à cette échelle n'a été possible que par l'apport de mesures globales fournies quotidiennement par certains satellites (NOAA/AVHRR, Météosat). Par exemple, l'utilisation de données de rayonnement global dérivées d'enregistrements effectués par le satellite Météosat, a permis de s'affranchir de manques de données climatologiques dans certaines régions.

La **méthodologie** proposée présente également l'avantage d'être **reproductible sur plusieurs années** sans passer par des étapes de réétalonnage de la formulation. Plusieurs travaux ont déjà fait état d'un suivi interannuel de la PPN (Diallo *et al.*, 1991). Cependant, les estimations étaient basées sur l'établissement d'une relation "cumul annuel d'indice de végétation/biomasse observée au sol". Celle-ci doit donc être recalculée chaque année, ce qui demande un travail régulier de mesures de biomasse au sol. De plus, chaque formulation n'est représentative que pour une zone géographique restreinte.

Un autre avantage de ce modèle, est qu'il permet, de par l'estimation indirecte de l'état du couvert qui est réalisée, de mieux **discerner** que d'autres modèles existant, les **variations spatiales et interannuelles de la PPN**. Ainsi, dans le modèle de Lieth et Whittaker (1975) les estimations de la PPN effectuées ne tiennent compte que des effets corrélés à la pluviométrie et à la température. Il faut rappeler que ce modèle a été pris en comparaison, car il représente, à l'heure actuelle, la seule autre démarche fournissant des données de PPN à l'échelle globale.

Les travaux effectués ont montré que la **comparaison interannuelle** des estimations de PPN n'est possible qu'après une étape importante de **prétraitement de données satellitaires**. Cette étape est destinée à éliminer l'effet de différents phénomènes perturbateurs. Cependant, les connaissances actuelles sur la physique de la mesure satellitaire, ne permettent que de limiter la dérive de l'information consécutive au vieillissement des capteurs ou l'influence de l'atmosphère sur l'information mesurée. Pour les autres facteurs intervenant, nous sommes obligés d'avoir recours à des corrections beaucoup moins dirigées. Ceci représente un problème car, comme nous avons pu le voir pour le filtrage du signal, on peut aboutir à une suppression de valeurs qui peuvent, en réalité, représenter de l'information utile.

Malgré ces résultats plus qu'encourageants du point de vue qualitatif, il faut émettre beaucoup plus de réserve en ce qui concerne les résultats quantitatifs. Il existe en effet une très **forte incertitude** sur les **valeurs estimées**. Il faut souligner cependant que cette forte incertitude n'est, malheureusement, pas propre à notre modèle et que le modèle de Lieth et Whittaker souffre également de ce défaut.

Plusieurs raisons peuvent être invoquées pour expliquer cette faiblesse du modèle.

- Pour ce qui concerne les données satellitaires, nous avons affaire à une technique récente et la **physique de la mesure** est encore relativement **mal maîtrisée**. Ainsi, comme nous avons pu le voir, s'il est possible de discerner la plus ou moins forte présence de végétaux au sol, son identification n'est pas faisable. De même, bien qu'étant conscient de l'influence exercée par le sol dans les mesures, il est impossible de s'en affranchir sans une connaissance *a priori* sur la nature de ceux-ci.

- Les satellites utilisés ont été créés pour des missions météorologiques et leur utilisation pour l'étude de la végétation n'est qu'un produit secondaire. Les canaux utilisés ne sont donc pas bien adaptés à l'observation des plantes.

- La précision des valeurs de PPN est extrêmement sensible aux valeurs d'efficience photochimique (εb) utilisées dans le modèle. Cette remarque permet de mettre en avant une remarque beaucoup plus générale maintes fois soulignées dans ce travail et qui concerne le **manque crucial de données de terrains**. En effet, la disponibilité trop éparse d'informations telles que des valeurs d'εb concernant la végétation naturelle, des mesures de biomasse, des estimations de recouvrement arborés, oblige à paramétrer le modèle de façon très empirique. Ce besoin s'exprime également en ce qui concerne les données climatologiques. Ainsi, comme nous l'avons vu lors des corrections des données satellitaires, l'utilisation de données moyennes sur 30 années plutôt que celles de l'année considérée, peut être une source d'erreur importante.

- De par sa conception, le modèle de **Monteith** ne permet de définir que des **valeurs potentielles de PPN**. Ce caractère potentiel découle de l'utilisation des valeurs d'εb. La mesure satellitaire représente la réponse intégrative de la végétation à tous les facteurs qui influent sur sa croissance. Toute tentative qui vise à modéliser les effets des facteurs limitants indépendamment de la mesure satellitaire peut entraîner une double prise en compte l'influence de ces facteurs. Cependant, il est impossible, actuellement, de quantifier cette information. Cela conduit donc à l'obtention de valeurs de PPN "faussement" potentielles tout en ne pouvant estimer les valeurs réelles.

Les propositions à apporter quant à la poursuite de ce travail sont d'ordres multiples :

1) Pallier au manque de données.

- La solution la plus évidente est la mise en place, malgré la lourdeur de travail nécessaire, de campagnes de mesures de terrain pour améliorer les connaissances sur la végétation naturelle.

- L'utilisation des données satellitaires à haute résolution spatiale (SPOT) n'a pas été abordée dans ce travail. L'intégration des ces données doit cependant être sérieusement envisagée dans l'avenir. En effet, il semble possible d'accéder à des renseignements déterminants pour l'application du modèle tels que : l'estimation des recouvrements arborés et herbacés, la caractérisation des types de sol en présence. Le choix des zones à échantillonner à l'aide cette démarche peut être aidé par l'observation de zones à comportement homogène sur les données à haute résolution temporelle.

Il faut noter que ces besoins commencent à être pris en compte. Ainsi, des campagnes de mesures de terrain de grande envergure ont récemment été mises en place et visent à étudier divers grands écosystèmes végétaux. Citons, par exemple, l'expérience Savanes A Long Terme (SALT) ou encore le programme forêts tempérées. Dans la première expérience citée l'utilisation conjointe de travail sur le terrain et de données satellitaires de type SPOT a permis de produire des cartes de la végétation.

- L'estimation des paramètres tels que le rayonnement global, la pluviométrie à partir de données satellitaires, doit pouvoir être réalisée en routine. Ceci, dans le but évident d'appliquer le modèle dans les condition de climatologie correspondant à la période d'enregistrement des données satellitaires à haute résolution temporelle.

2) améliorer la qualité de l'information satellitaire.

- Dans ce travail, il a été montré que la correction des données permet d'apporter une forte amélioration à la qualité des estimations effectuées. Ceci surtout pour ce qui concerne la comparaison interannuelle de ces estimations. Ces corrections doivent donc pouvoir être réalisées de façon systématique.

- De nombreuses études sont en cours visant à mieux maîtriser la physique de la mesure satellitaire. Une meilleure compréhension de phénomènes tels que les effets directionnels permettront peut être de dériver des informations importantes quant à la structure des objets observés. Il est fort probable que des méthodes de corrections adaptées seront proposées et permettront de remplacer les méthodes empiriques utilisées actuellement.

Des satellites adaptés à l'observation de la végétation vont prochainement voir le jour (V.M.I.). Ils présenteront de nombreux avantages tels que :

une définition des longueurs d'ondes adaptée à l'observation de la végétation ;

un système de calibration à bord du satellite qui permettra de mieux maîtriser les problèmes de dérive de l'information ;

la présence sur la même plate forme de capteurs haute résolution spatiale type SPOT/HRV qui permettra d'obtenir des enregistrements dans des résolutions spatiales différentes avec des conditions de visée similaires.

3) L'amélioration de la modélisation ou de l'intégration modèles-mesures.

Deux solutions principales sont envisageables :

- Poursuivre l'utilisation du modèle de Monteith. Cela ne peut être fait que par l'intégration de valeurs d'ε_b beaucoup moins empiriques. De plus, en prise en compte du stress imposé par le milieu doit également être faite.

- L'utilisation de modèles basés sur une formalisation des processus de fonctionnement des plantes et possédant, en priorité, des propriétés explicatives et prédictives faisant défaut dans le modèle de Monteith. Dans ces modèles, l'information satellitaire sera utilisée soit comme entrant du modèle (valeurs de rayonnement global) soit comme une mesure permettant le recalage des sorties intermédiaires ou finales du modèle, ou même des conditions initiales ou aux limites ainsi des paramètres du modèle. Dans cette démarche, une prise en compte du stress imposé par le milieu est alors réalisable. Ainsi, le modèle gère la partie estimation de la production de matière sèche alors que la mesure satellitaire est utilisée pour évaluer l'intensité du stress induit.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1) **Anonymous, 1956,**
Phytogoegraphy, Yangamby, C.S.A., C.C.T.A. Publ., **22** : 35p.

2) **Asrar J.K., Hipps L.E., Kanemasu E.T., 1984,**
Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agron. J.*, **76** : 300-306.

3) **Asrar G., Kanemasu E.T., Jackson R.D., Pinter, J., 1985,**
Estimation of total above-ground phytomass production using remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, **17** : 211-220.

4) **Asrar G., Kanemasu E.T., Miller G.P., Weiser R.L., 1986,**
Light interception and Leaf Area estimates from measurements of grass canopy reflectance, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **24** (1) : 76-81.

5) **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) : 253-296.

6) **Baret F., Olioso A., 1989,**
Estimation à partir de mesures de réflectance spectrale du rayonnement photosynthétiquement absorbé par une culture de blé, *Agronomie*, **9** : 885-895.

7) **Baret F., Guyot G., 1991,**
Potentials and limits of vegetation Indices for LAI and APAR assessment, *Remote Sens. Environ.*, **35** : 161-173.

8) **Beadle C.L., Long S.P., Imbamba S.K., Hal D.O., Olembo R.J., 1985,**
Photosynthesis in relation to plant production in terrestrial environments. UNEP, Oxford, England : 156 p.

10) **Bégué A., 1991,**
Estimation de la production primaire en zone sahélienne à partir de données radiomètriques. Cas d'un couvert discontinu : le Mil, **Thése 3ème cycle**, Université Montpéllier : 127 p.

11) **Bernhardt-Reversat F., Lémée G., Huttel C., 1978,**
La forêt sempervirente de basse Côte d'Ivoire. In : Problèmes d'écologie : structure et fonctionnement des écosystèmes terrestres, chap. **VII**, Masson (Eds.), Paris New York Barcelone Milan.

12) **Böhm W., 1979,**
Methods of studying root systems, *Ecological Studies 33*, Springer-Verlag (Eds.), Berlin, Heidelberg, New York : 190p.

13) **Bonhomme R., Chartier P., 1972,**
The interpretation and automatic measurement of hemeispherical photographs to obtain sunlit foliage area and gap frequency. *Isr. J. Agric. Res.*, **22** : 61-63.

14) **Calvin M., 1956,**
3ème congrès international de biochimie, Bruxelles 1955, (Eds.) Acad. Press, New York.

15) **César J., 1971,**
Etude quantitative de la strate herbacée de la savane de Lamto. *Thèse*, Université de Paris, Paris : 95 p.

16) **César J., Menaut J.C., 1974,**
Le peuplement végétal. in : Analyse d'un système tropical humide : la savane de Lamto (Côte d'Ivoire). *Bulletin de liaison des chercheurs de Lamto*, Paris, n° spécial, **fasc. 2** : 161 p.

17) **Chapman E.A., Graham D., 1974,**
The effect of light on the tricarboxylic acid cycle in green leaves. I: Relative rates of the cycle in the dark and light. *Plant. Physiol.*, **53** : 879-885.

18) **Charles-Edwards D.A., 1984,**
Physiological determinants of crop growth, Academic Press (Eds.) : 140 p.

19) **Charreau C., 1974,**
Soils of tropical dry and dry-wet climatic areas of West Africa and their use and management. *Agronomy Mimeo*, **74** (26), Cornell University, Ithaca : 434 p.

20) **Choudhury B.J., 1987,**
Relationship between vegetation indices, radiation absorption, and net photosynthesis evaluated by a sensitivity analysis. *Remote Sensing of Environment*, **22** : 209-233.

21) **Coulson K.L., Reynolds D.W., 1971,**
The spectral reflectance of natural surfaces, *Journal of Applied Meteorology*, **10** : 1285-1295.

22) **Dedieu G., 1990,**
Land surface reflectances and vegetation index derived from NOAA/AVHRR, *in* : Workshop on the "use of satellite derived vegetation indices in weather and climate prediction models", Camp Spring, MD, 26-27 Feb., *NOAA Technical Report* : 114 p.

23) **Dedieu G., Deschamps P.Y. Kerr Y.H., 1987a,**
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*, **26** (1) : 79-87.

24) **Dedieu G., Deschamps P.Y., Kerr Y.H., Raberanto P., 1987b,**
A global survey of surface climate parameters from satellite observations : Preliminary results over Africa, *Adv. Space Res.*, **11** : 129-137.

25) **Delmas R., Loudjani P., Podaire A., Menaut J.C., 1991,**
Biomass burning in Africa : an assessment of annually burned biomass. *in* : Global biomass burning, Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications, (Eds.) Levine J.S., MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, **15** : 126-132.

26) **Deshmukh I.K., 1984,**
A common relationship between precipitation and grassland peak biomass for East and Southern Africa, *Afr.J.Ecol.*, **22** : 181-186.

27) **Diallo O., Diouf A., Hanan N.P., Ndiaye A., Prevost Y., 1991,**
AVHRR monitoring of savanna primary production in Senegal, West Africa : 1987-1988, *Int. J. Remote Sens.*, **12** (6) : 1259-1280.

28) **Diarra L., 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 : 171-174.

29) **Dijk Van A., Callis S.L., Sakamoto C.M., Decker W.L., 1987,**
Smoothing vegetation index profiles : An alternative method for reducing radiometric disturbance in NOAA/AVHRR data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **53** (8) : 1059-1067.

30) **Emery W.J., Brown J., Nowak Z.P., 1989,**
AVHRR image navigation : Summary and review, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, **55** (8) : 1175-1183.

31) **Esser G., 1991,**
Osnabruck Biosphere Model : structure, construction, results, *in* : Modern Ecology, basic and applied aspects, Esser, G., Overdieck D. (Eds.), Elsevier, Amsterdam, London, Tokyo, New York : 679-709.

32) **Fournier A., 1982,**
Cycle saisonnier de la biomasse herbacée dans les savanes de Ouango-Fitini. *Ann. Univ. Abidjan*, Série E (Ecologie), **XV** : 63-94.

33) **Fournier A., 1987,**
Cycle saisonnier de la phytomasse et de la production herbacée dansles savanes soudaniennes de Nazinga (Burkina Faso). Comparaison avec d'autres savanes ouest-africaines., *Bull. Ecol.*, **18** (4) : 409-430.

34) **Gallagher J.N., Biscoe P.V., 1978,**
Radiation absorption, growth and yield of cereals. *J. Agric. Sci. Camb.*, **91** : 47•60.

35) **Gallo K.P., Daughtry C.S.T., Bauer M.E., 1985,**
Spectral estimation of absorbed photosynthetically active radiation in Corn canopies. *Remote Sensing of Environment*, **17** : 221-232.

36) **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*, **44** : 175-196.

37) **Gillon D., 1983,**
The fire problem in tropical savannas. *in* : Ecosystems of the world, 13, tropical savannas, (Eds.) Bourlère, F., Elsevier, Amsterdam, **30** : 617-641.

38) **Goudriaan J., 1977,**
Crop micrometeorology : a simulation study, *Simulation Monographs*, Pudoc, Wageningen.

39) **Goudriaan J., 1982,**
Potential production processes. *In* : Simulation of plant growth and crop production, F.W.T. Penning de Vries and H.H. Van Laar (Eds.), *Simulation monographs*, Pudoc, Wageningen : 98-113.

40) **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*, **6** (1) : 47-56.

41) **Goward S.N., Dye D.G., 1987a,**
Evaluating north american net primary productivity with satellite observations, *Adv. Space Res.*, **7** (11) : 165-174.

42) **Goward S.N., Dye D., Kerber A., Kalb V., 1987b,**
Comparison of north and south american biomes from AVHRR observations, *Geocarto International*, **1** : 27-39.

43) **Goward S.N., Markham B., Dye D.G., Dulaney W., Jingli Y., 1991,**
Normalized Difference Vegetation Index measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer, *Remote Sens. Environ.*, **35** : 257-277.

44) **Guillaumet J.L., Adjanohoun E., 1971,**
La végétation, *in* : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire, Mémoire ORSTOM, **n°50** : 157-263.

45) **Gutman G., Tarpley D, Ohring G., 1987,**
Cloud screening for determination of land surface characteristics in reduced resolution satellite data set, *Int. J. Remote Sens.*, **8** (6) : 859-870.

46) **Hatch M.D., Slack R., 1966,**
Biochem. J. : 101-103.

47) **Hatfield J.L., Asrar G., Kanemasu E.T., 1984,**
Intercepted photosynthetically active radiation estimated by spectral reflectance. *Remote Sensing of Environment*, **14** : 65-75.

48) **Heller R., Esnault R., Lance C., 1989,**
Physiologie végétale, 1 : nutrition. (Eds.) Masson, Paris, Milan, Barcelone, Mexico : 273 p.

49) **Henderson-Sellers A., Wilson G., Thomas G., Dickinson R.E., 1986,**
Current global land surface data sets for use in climate-related studies. NCAR technical note : 272 p + STR.

50) **Hipps L.E., Asrar G., Kanemasu E.T., 1983,**
Assessing the interception of photosynthetically active radiation in winter wheat, *Agricultural Meteorology*, **28** : 253-259.

51) **Holben B.N., Tucker C.J., Fan C., 1980,**
Spectral assessment of Soybean Leaf Area and Leaf Biomass, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **46** (5) : 651-656.

52) **Holben B.N., 1986,**
Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *Int. J; Remote Sensing*, **7** (11) : 1417-1434.

53) **Holben B.N., Kaufman Y.J., Kendall J.D., 1990,**
NOAA-11 AVHRR visible and near-IR inflight calibration, *Int.J.Remote Sensing*, **11** (8), 1511-1519.

54) **Huete A.R., 1988,**
A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, **25** : 295-309

55) **Huete A.R., 1989,**
Soil influences in remotely sensed vegetation-canopy spectra. *in* : Theory and applications of optical remote sensing, (Eds.) Asrar G., Wiley & Sons, New York, Toronto, Singapore, **4** : 107-141.

56) **Huete A.R., Jackson R.D., Post D.F., 1985,**
Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds, *Remote Sens. Environ.*, **17** : 37-53.

57) **Huete A.R., Tucker C.J., 1991,**
Investigation of soil influences in AVHRR red and near-infrared vegetation index imagery, *Int. J. Remote Sensing*, **12** (6) : 1223-1242.

58) **Innis G.S., 1978,**
Grassland simulation model, *Ecological studies 26*, Springer-Verlag, New York, Heidelberg, Berlin : 298p.

59) **Isnard H., 1974,**
Géographie de l'Afrique tropicale et australe. *Que sais-je?*, **n°1139**, (Eds.) PUF : 127 p.

60) **Janecek A., Ludeke M.B.K., Kindermann J., Lang T., Klaudius A., Otto R.D., Badeck F.W., Kohlmaier G., 1991,**
A global high-resolution mechanistic and prognostic model for the seasonal and long-term CO_2 exchange between the terrestrial ecosystems and the atmosphere, The FMB, *3rd International Environmental Chemistry Congress*, Salvador-Bahia, Brazil, Sep. 30 - Oct. 4.

61) **Justice C.O., Townshend J.R.G., Holben B.N., Tucker C.J., 1985,**
Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data, *Int. J. Remote Sensing*, **6** (8) : 1271-1318.

62) **Justice C.O., Holben B.N., Gwynne M.D., 1986,**
Monitoring east african vegetation using AVHRR data, *Int. J. Remote Sensing*, **7** (11) : 1453-1474.

63) **Kaufman Y.J., Holben B.N., 1990,**
Calibration of the AVHRR visible and near-ir bands by atmospheric scattering, ocean glint and desert reflection, *J.Appl.Meteorol.*

64) **Kidwell K.B., 1990,**
Global Vegetation Index user's guide. U.S. department of commerce, NOAA, NESDIS, NCDC, Satellite Data Service Division, Washington, D.C. : 30 p. + appendix.

65) **Lagouarde J.P., 1991,**
Use of NOAA AVHRR data combined with agrometeorological model for evaporation mapping, *Int. J. Remote Sensing*, **12** (9) : 1983-1864.

66) **Laing W.A., Forde B.J., 1974,**
Comparative photorespiration in Amaranthus, Soybean and Corn. *Plant. Physiol.*, **98** (3) : 221-231.

67) **Lanly J.P., 1981,**
Tropical forest resources assessment. Part II, (Eds.) FAO, Rome, 286 p.

68) **Lavenu F., Bellan M.F., Fontes J., 1987,**
Carte de la végétation de l'Afrique au 1:5.000.000, FAO 1987.

69) **Le Houerou H.N., Hoste C.N., 1977,**
Rangeland production and annual rainfall relations in the mediterranean basin and african sahelo-soudanian zone, *Journal of Range Management*, **30** (3) : 181-189.

70) **Lieth H., Whittaker R.H., 1975,**
Primary productivity of the biosphere, *Ecological studies 14*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York : 339p.

71) **Lémée G., 1978,**
Précis d'écologie végétale. editeur Masson (Paris) : 285 p.

72) **London J., Bojkov R.D., Oltsmans S., Kelley J.I., 1976,**
Atlas of the global distribution of total ozone july 1957-June 1967, NCAR/TN : 113 p + STR.

73) **Long S.P., Garcia Moya E., Imbamba S.K., Kamnalrut A., Piepade M.T.F., Scurlock J.M.O., Shen Y.K., Hall D.O., 1989,**
Primary productivity of natural grass ecosystems of the tropics : A reappraisal, *Plant and Soil*, **115** : 155-166.

74) **Loomis R.S., Williams W.A., 1963,**
Maximum crop productivity : an estimate. *Crop Sci.*, **3** : 67-72.

75) **Massoud Z., 1992,**
Terre vivante, (Eds.) Odile Jacob, 342 p.

76) **McCree K.J., 1972,**
Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric. Meteorol.*, **10** : 443-453.

77) **McCree K.J., Troughton J.H., 1966,**
Prediction of growth rate at different light levels from measured photosynthesis and respiration rates. *Plant. Physiol.*, **41** (4) : 559-566.

78) **Mc Cree K.J., Silsbury J.H., 1978,**
Growth and maintenance requirements of subterranean clover. *Crop Sci.*, **18** : 13-18.

79) **Meek D.W., Hatfield J.L., Howell T.A., Idso S.B., Reginato R.J., 1984,**
A generalized relationship between photosynthetically active radiation and solar radiation. *Agronomy Journal*, **76** : 939-945.

80) **Menaut J.C., 1979,**
Primary production. *in* : Tropical grazing land ecosystems. A state of knowledge (Unesco/Unep/Fao). *Natural resources*, **16**, (Eds.) Unesco, Paris : 122-145.

81) **Menaut J.C., 1983,**
The vegetation of African savannas, *In*: Tropical savannas, Ed. F. Bourlière, Elsevier, Amsterdam : 109-149.

82) **Menaut J.C., Abbadie L., Lavenu F., Loudjani P., Podaire A., 1991**
Biomass burning in West African Savannas. *in* : Global biomass burning, Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications, (Eds.) Levine J.S., MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, **16** : 133-142.

83) **Monod T;, 1957,**
Les grandes divisions chorologiques de l'Afrique, C.S.A.C.C.T.A. publ., **24** : 147 p.

84) **Monsi M., Saeki T., 1953,**
Uber den Lichtfactor in den pflanzengesellschaft und seine bedeutung fur die stoffproduktion, *Jap J.Bot.*, **14** (22).

85) **Monteith, J.L., 1972,**
Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, **9** : 747-766.

86) **Monteith J.L., 1977,**
Climate and the efficiency of crop production in Britain, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, B, **281** : 277-294.

87) **Monteith J.L., Szeicz G., Yabuki K., 1964,**
J.Appl.Ecol., **1** : 321-337.

88) **Müller D., Nielson J., 1965,**
Production brute, pertes par respiration et production nette dans la forêt ombrophile tropicale, *Forstlige Forsogsvaesen Danmark*, **29** : 60-160.

89) **Nègre T., 1988,**
Sahel : la saison des pluies 1987 vue par les outils satellitaires d'AGRHYMET, *Veille Climatique Satellitaire*, **23** (aout) : 29-36.

90) **Oort A.H., 1983,**
Global atmospheric circulation statistics : 1958-1973, NOAA Professional papers, **14**, Rockville, MD.

91) **Paltridge G.W., Mitchell R.M., 1990,**
Atmospheric and viewing angle correction of vegetation indices and grassland moisture content derived from NOAA/AVHRR, *Remote Sens. Environ.*, **31** : 121-135.

92) **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.

93) **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 29*, Pudoc Wageningen : 271p.

94) **Peron Y., *et al.*, 1975,**
Atlas jeune Afrique, Haute-Volta, (Eds.) Jeune Afrique, Paris : 47 p.

95) **Perraud A., 1971,**
Les sols, *in* : Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM, **n°50** : 265-391.

96) **Perrier A., Itier B., Jaussely B., 19,**
Etude de la photosynthèse en plein champ, *In* : Les proceccus de la production végétale primaire, Les travaux français du programme biologique international sur la photosynthèse, Gauthier-Villars (Eds.) : 113-136;

97) **Price J.C., 1987,**
Radiometric calibration of satellite sensors in the visible and near IR : history and outlook. *Remote Sensing of Environment*, **22** : 3-9.

98) **Prince S.D., 1991,**
Satellite remote sensing of primary production : comparison of results for sahelian grasslands 1981-1988, *Int. J. Remote Sens.*, **12** (6) : 1301-1310.

99) **Raich J.W., Rastetter E.B., Melillo J.M., Kicklighter D.W., Steudleur P.A., Peterson B.J., Grace A.L., Moore B., Vorosmartry C.J., 1991,**
Potential Net Primary Productivity in South America : application od a global model, *Ecological applications*, **1** (4) : 399-429.

100) **Rahman H., Dedieu G., 1993,**
SMAC : A simplified method for atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum, *Remote Sensing of Environment.* (à paraître).

101) **Richardson A.M., Wiegand C.L., 1977,**
Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogr. Eng. R. S.*, **43** : 1541-1552.

102) **Rietvild M.R., 1978,**
A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. *Agric. Meteorol.*, **19** : 243-252.

103) **Rouse J.W., Haas R.H., Schelle J.A., Deering D.W., Harlan J.C., 1974,**
Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation , *NASA/GSFC, Type III, Final report*, Greenbelt : 371p.

104) **Ruimy A., 1991,**
Estimation de la production primaire nette continentale à partir de mesures satellitaires, D.E.A. Ecophysiologie, Paris XI : 28 p.

105) **Sanford W.W., 1982,**
Savanna : a general review. *in* : Nigerian savannas, (Eds.) Sanford et al., New Bussea, Kaïji Lake Research Institute, Nigeria : 3-23.

106) **Saugier B., 1986,**
Productivité des écosystèmes naturels. *Biomasse Actualités*, **n° spécial 9**, juillet : 42-49.

107) **Sceicz G., 1974,**
Solar radiation for plant growth. *J.Appl.Ecol.*, **11** (2) : 617-636.

108) **Seguin B., Itier B., 1983,**
Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data, *Int. J. Remote Sensing*, **4** (2) : 371-383.

109) **Sellers P.J., 1985,**
Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *Int. J. Remote Sensing*, **6** : 1335-1372.

110) Sellers P.J., 1987,
Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration.II : The role of biophysics in the linearity of their interdependence, *Remote Sensing of Environment*, **21** : 143-183.

111) Siddique K.H.M., Beldford R.K., Perry M.W., Tennant D., 1989.
Growth, development and light interception of old and modern Wheat cultivars in a mediterranean-type environment. *Aust. J. Agric. Res.*, **40** : 473-487.

112) Schnell R., 1976,
Flore et végétation de l'Afrique tropicale, tome 1,Ed. Gauthier-Villars : 468 p.

113) Staub B., Rosenweig C., 1987,
Global digital datasets of soil type, soil texture, surface slope and other properties : documentation of archived data. NASA Technical Memorandum # 100685.

114) Stigter C.J., Musabilha V.M.M., 1982,
The conservative ratio of photosynthetically active to total radiation in the tropics. *J. Appl. Ecol.*, **19** : 853-858.

115) Stephens W., Othieno C.O., Carr M.K.V., 1992,
Climate and weather variability at the Tea Research Fondation of Kenya, *Agricultural and Forest Meteorology*, **61** : 219-235.

116) Stunhill G., Fuchs M., 1977,
The relative flux density of photosynthetically active radiation. *J.Appl.Ecol.*, **14** : 317-322.

117) Teillet P.M., Slater P.N., Ding Y., Santer R.P., Jackson R.D., Moran M.S., 1990,
Three methods for the absolute calibration of the NOAA AVHRR Sensors In-Flight, *Remote Sens. Environ.*, **31** : 105-120.

118) Teillet P.M., Holben B., 1992,
Draft AVHRR calibration coefficient spreadsheet.

119) Terjung W.H., Louie S.S.F., O'rourke P.A., 1976,
Toward an energy budget model of photosynthesis predicting world productivity. *Vegetatio*, **32** (1) : 31-53.

120) Thekaekara M.P., 1976,
Solar radiation measurement: techniques and instrumentation. *Sol. Energy*, **18** : 309-325.

121) Thornley J.H.M., 1970,
Respiration, growth and maintenance in plants, *Nature*, **227** : 304-305.

122) Tucker, C.J., 1980,
A critical review of remote sensing and other methods for non-destructive estimation of standing crop biomass, *Grass and Forest Science*, **35** : 177-182.

123) Tucker C.J., 1979,

Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.*, **16** : 127-150.

124) Tucker C.J., Holben B.N., Elgin J.H., McMutrey III J.E., 1981,

Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat, *Remote Sensing of Environment*, **11** : 171-189.

125) Tucker C.J., Vanpraet C.L., Sharman M.J., Van Itterstum G., 1985,

Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the senegalese sahel : 1980-1984, *Remote Sensing of Environment*, **17** : 233-249.

126) Van Keulen H., Wolf J., 1986,

Modelling of agricultural production : weather, soils and crops, *Simulation Monographs*, Pudoc Wageningen : 479p.

127) Varlet-Grancher C., Bonhomme R., 1979,

Application aux couverts végétaux des lois de rayonnement du milieu diffusant. *Ann. Agron.*, **30** (1) : 1-26.

128) Varlet-Grancher C., Chartier M., Gosse G., Bonhomme R., 1981,

Rayonnement utile pour la photosynthèse des végétaux en conditions naturelles : caractérisation et variations. *OEcologia Plant.*, **2** (16) : 189-202.

129) Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Chartier M., Artis P., 1982,

Efficience de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal. *Acta OEologica OEcol. Plant.*, **3** (17) : 3-26.

130) Varlet-Grancher C., Gosse G., Chartier M., Sinoquet H., Bonhomme R., Allirand J.M., 1989,

Mise au point: rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, **9** : 419-439.

131) Vennetier P., *et al.*, 1978,

Atlas de la Côte d'Ivoire, (Eds.) Jeune Afrique, Paris : 72 p.

132) Verhoef W., 1984,

Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling : the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, **16** : 125-141

133) Vidal A., Perrier A., 1989,

Analysis of a simplified relation for estimating daily evapotranspiration from satellite thermal IR data, *Int. J. Remote Sensing*, **10** (8) : 1327-1337.

134) Viovy N., 1990,

Etude spatiale de la biosphère terrestre : Intégration de modèles écologiques et de mesures de télédétection, These, I.N.P. Toulouse : 213 p.

135) **Viovy N., Arino O., Beldward A.S., 1992,**
The Best Index Slope Extraction (BISE): A method for reducing noise in NDVI time-series, *Int. J. Remote Sensing*, **13** (8) : 1585-1590.

136) **Walter H., 1964,**
Productivity of vegetation in arid countries. The savanna problem and bush encroachment after overgrazing. *in* : L'écologie de l'homme dans le milieu tropical, IUCN Publication, **4** : 355 p.

137) **Warren Wilson J., 1960,**
Inclined point quadrat. *New Phytol.*, **58** : 92-101.

138) **White F., 1983,**
The vegetation of Africa, A descriptive memoir to accompany the UNESCO/AETFAT/UNSO vegetation map of Africa, Ed. UNESCO : 356 p.

139) **Wiegand C.L., Richardson A.J., 1984,**
Leaf area, lignt interception, and yield estimates from spectral components analasys. *Agron. J.*, **76** : 543-548.

140) **Wylie B.K., Harrington J.A., Prince S.D., Denda I.,**
Satellite and ground-based pasture production assessment in Niger : 1986-1988, *Int. J. Remote Sens.*, **12** (6) : 1281-1300.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DES FIGURES ET TABLEAUX

1) **Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E.T., Hatfield, J.L., 1984,**
Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf arear index from spectral reflectance in Wheat, *Agronomy Journal*, **76** : pp 302, 304

2) **Baret, F., Olioso, A., 1989,**
Estimation à partir de mesures de réflectance spectrale du rayonnement photosynthétiquement absorbé par une culture de blé, *Agronomie*, **9** : pp 891.

3) **Dedieu, G., Deschamps, P.Y. 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*, **26** (1) : pp 82.

4) **Fournier, A., 1987,**
Cycle saisonnier de la phytomasse et de la production herbacée dansles savanes soudaniennes de Nazinga (Burkina Faso). Comparaison avec d'autres savanes ouest-africaines., *Bull. Ecol.*, **18** (4) : pp 419, 424.

5) **Goward, S.N., Markham, B., Dye, D.G., Dulaney, W. Jingli, Y., 1991,**
Normalized Difference Vegetation Index measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer, *Remote Sens. Environ.*, **35** : pp 271.

6) **Guyot, G., 1984,**
Cractéristiques spectrales des couverts végétaux, application à la télédétection. *Bull. Soc. Franc. Photogram. et Télédétection*, **95** (3) : pp 8.

7) **Guyot, G., 1983,**
Relations entre l'évolution biologique des couverts végétaux et leurs caractéristiques spectrales. Conséquences pour l'interprétation des données de télédétection. 1er séminaire international ONU-OMM-ESA-FAO de formation aux applications de la télédétection à l'agro-météorologie opérationnelle dans les pays semi-arides. Niamey (Niger), 11-12/07/1983 : pp 1, 2.

8) **Heller, R., Esnault, R., Lance, C., 1989,**
Physiologie végétale, 1 : nutrition. (Eds.) Masson, Paris, Milan, Barcelone, Mexico, pp 1, 165 et 168.

9) **Hipps, L.E., Asrar, G., Kanemasu, E.T., 1983,**
Assessing the interception of photosynthetically active radiation in winter wheat, *Agricultural Meteorology*, **28** : pp 258.

10) **Holben, B.N., 1986,**
Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *Int. J; Remote Sensing*, **7** (11) : pp 1422, 1423, 1424.

11) **Holben, B.N., Kaufman, Y.J., Kendall, J.D., 1990,**
NOAA-11 AVHRR visible and near-IR inflight calibration, *Int.J.Remote Sensing*, **11** (8) : pp 1515, 1517.

12) **Huete, A., 1988,**
A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, **25** : pp 300.

13) **Huete, A., 1987,**
Soil and sun angle interactions on partial canopy spectra. *Int. J; Remote Sensing*, **8** : pp 1311, 1312

14) **Keay, R.W.J., 1959,**
Vegetation map of Africa. Oxford University Press, Oxford : pp 24.

15) **Lieth, H., Whittaker, R.H., 1975,**
Primary productivity of the biosphere, *Ecological studies 14*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York : 339p.

16) **Menaut, J.C., César, J., 1979,**
Structure and primary productivity of Lamto savannas, Ivory Coast, Ecology, 60 (6) : pp 1198.

17) **Monod, T., 1957,**
Les grandes divisions chorologiques de l'Afrique. *C.S.A. C.C.T.A. Publ.*, **24** : pp 147.

18) **Monteith, J.L., 1972,**
Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, **9** : pp 749.

19) **Nègre, T., 1988,**
Sahel : la saison des pluies 1987 vue par les outils satellitaires d'AGRHYMET, *Veille Climatique Satellitaire*, **23** (aout) : 29-36.

20) **Saugier, B., 1986,**
Productivité des écosystèmes naturels. *Biomasse Actualités*, **n° spécial 9**, juillet : pp 47.

21) **Scanvic, J.Y., 1983.**
Utilisation de la télédétection dans les sciences de la terre. Coll. Manuels et méthodes, Eds. BRGM, 7 : 159 p.

22) **Somerville, C.R., Somerville, S.C., 1984,**
Les photosythèses des plantes. *La Recherche*, 15 (154) : pp 499.

23) **Teillet, P.M., Holben, B., 1992,**
Draft AVHRR calibration coefficient spreadsheet.

24) **Troupin, G., 1966,**
Etude phytocénologique du parc national de l'Akagera et du Rwanda oriental. *Inst. Natl. Rech. Sci. Butare*, **2** : pp 293.

25) **Van Keulen, H., Wolf, J., 1986,**
Modelling of agricultural production : weather, soils and crops, *Simulation Monographs*, Pudoc Wageningen.

26) **Vilain, M., 1987,**
La production végétale, Volume 1 : Les composantes de la production. (Coll.) Agriculture d'Aujourd'hui : Sciences, Techniques, Applications, (Eds.) Lavoisier Paris, pp 276.

27) **White, F., 1971,**
The taxonomic and ecological basis of chorology. *Mitt. Bot. Staatsamml.*, München, **10.**

28) **Wickens, G.E., 1976,**
The flora of Jebel Marra (Sudan Republic) and its geographical affinities. *Kew Bull. Add. Ser.*, **5.**

ANNEXE A

-

LISTE DES SIGLES UTILISES

-

LISTE DES FIGURES

-

LISTE DES TABLEAUX

ANNEXE A

Généralités concernant la télédétection

Le terme de **télédétection** désigne les méthodes de mesures d'informations à distance par l'intermédiaire du rayonnement électromagnétique émis, réfléchi ou diffracté par les objets observés. En effet, tout corps porté à une température supérieure à 0 Kelvin rayonne une énergie qui se propage sous forme d'ondes électromagnétiques. Ce rayonnement se déplace à une vitesse constante (c) qui est dépendante du milieu considéré (dans le vide 300 000 Km/s). Il est caractérisé par une amplitude de vibration périodique et orthogonale à la direction de propagation. On définit sa **longueur d'onde** $\lambda = c/N$ ou N est la fréquence (fig. A.1).

On distingue successivement, en partant des longueurs d'onde inférieures :
le rayonnement γ, les rayons X, les rayonnements ultraviolets (UV), le rayonnement visible (0.4 à 0.7 μm), l'infrarouge (IR), les micro-ondes (domaine radar), les ondes métriques (télévision), les ondes radioélectriques (10 m à quelques kilomètres) (fig. A.2).

Le rayonnement ne se manifeste que par ses interactions avec la matière. Cette dernière peut, en fonction de son état et de sa nature, produire un rayonnement électromagnétique (émission propre) et/ou diffracter et/ou absorber le rayonnement qui l'atteint. Comme nous le verrons plus tard, ce sont ces propriétés d'absorption, d'émission et de réflexion qui sont à la base de l'interprétation des données enregistrées par les satellites. Par contre, ce sont ces mêmes phénomènes qui occasionnent une perturbation du rayonnement enregistré par le satellite, en provenance de l'objet visé, lors de la traversée de l'atmosphère.

Toute onde électromagnétique véhicule de l'énergie. Les échanges d'énergie entre le rayonnement et la matière se font par l'intermédiaire de photons. La **quantité d'énergie (E)** transportée par une longueur d'onde (λ) est fonction de la fréquence (f) et se note :

$E = h * f$ où h = constante de Planck ($6.625 * 10^{-34}$ J.s)

Cette quantité est exprimée en Joule.

C'est sur le principe de la mesure de la quantité d'énergie atteignant la surface d'un capteur que fonctionne la télédétection. Le rayonnement électromagnétique est produit par une charge en accélération. Cette accélération peut être produite naturellement (agitation thermique induite par le soleil) ou artificiellement à l'aide d'instruments (antenne radar, projecteur électrique lumineux). Selon le type de rayonnement, on distinguera la **télédétection passive** (enregistrement du rayonnement naturel), de la **télédétection active** (production artificielle d'un rayonnement et enregistrement du signal réfléchi par la surface visée).

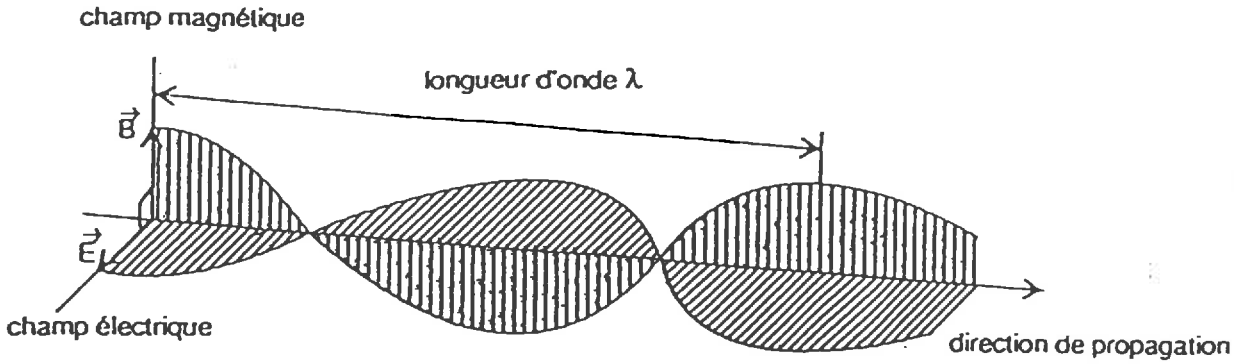


Figure A.1 : Représentation schématique d'une onde électromagnétique.

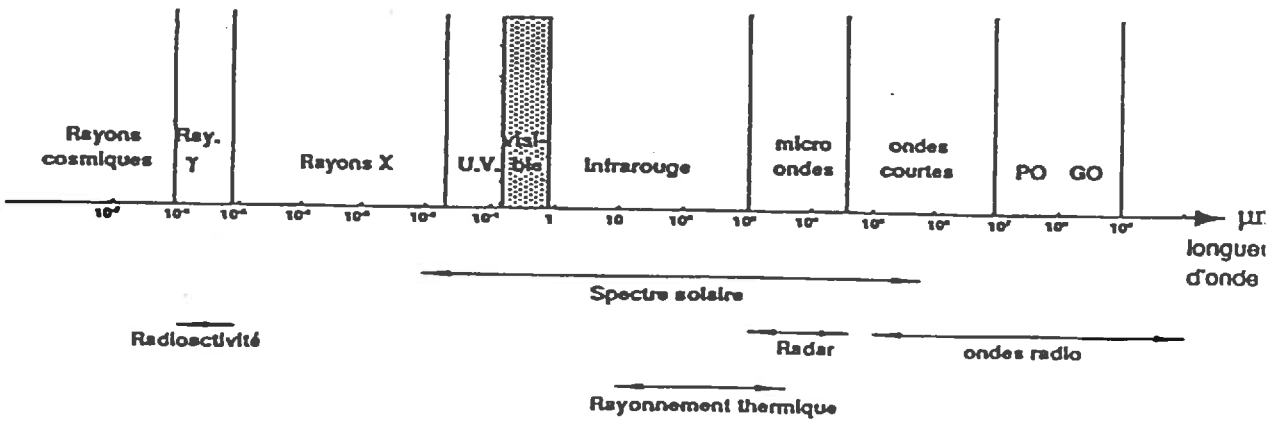


Figure A.2 : Les ondes électromagnétiques et les phénomènes qui sont à l'origine de leur production.

A.1) Définitions utilisées en télédétection

A.11) Puissance = flux = W (en $J.s^{-1}$ ou Watt)

C'est la quantité d'énergie Q émise par une source par unité de temps dans toutes les directions.

$$W = dQ/dt$$

A.12) Irradiance = éclairement = densité de flux = E (en $W.m^{-2}$)

C'est la quantité de flux interceptée par une unité de surface plane (S)

$$E = W/S$$

A.13) Intensité = I (en $W.sr^{-1}$)

C'est la puissance émise par une source dans un angle solide (et donc dans une direction donnée) (fig. A.3).

$$I = dW/d\Omega$$

A.14) Luminance = L (en $W.m^{-2}.sr^{-1}$)

C'est la puissance émise (dW) par unité d'angle solide ($d\Omega$) et par unité de surface apparente (ds) d'une source étendue dans une direction donnée (θ) (fig. A.4).

$$L = d^2W/(d\Omega.ds.\cos\theta)$$

Cette notion est très importante, car l'énergie mesurée au niveau du capteur est proportionnelle à la luminance de la source observée (surface terrestre).

A.15) Emission

Toute matière dont la température est supérieure au 0 absolu émet un rayonnement électromagnétique qui lui est propre du fait de l'agitation thermique de ses particules. Le spectre d'émission d'un corps est donc fonction de sa température.

Cas particulier : la notion de **corps noir.**

Il correspond à un émetteur thermique idéal, parfaitement émissif et parfaitement absorbant. La luminance d'un corps noir pour une longueur d'onde donnée est définie par Planck comme :

$$L_\lambda = c_1.\lambda^{-5}/(e^{(c2/\lambda T)}-1) \quad \text{en } W.m^{-2}.sr^{-1}$$

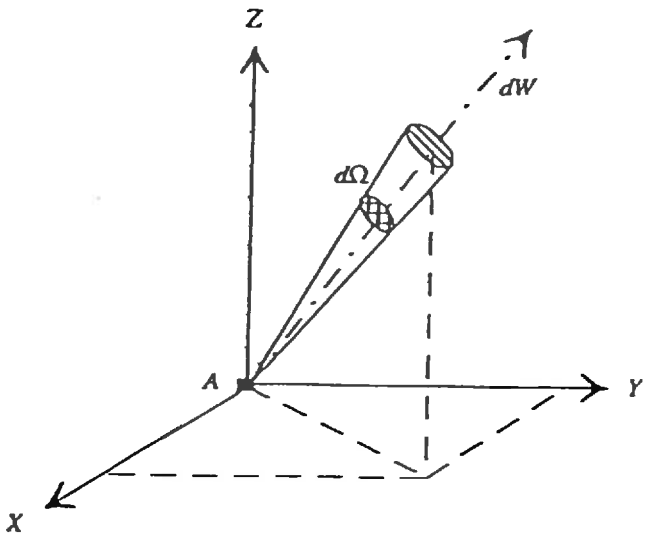


Figure A.3 : Intensité d'une source ponctuelle A.

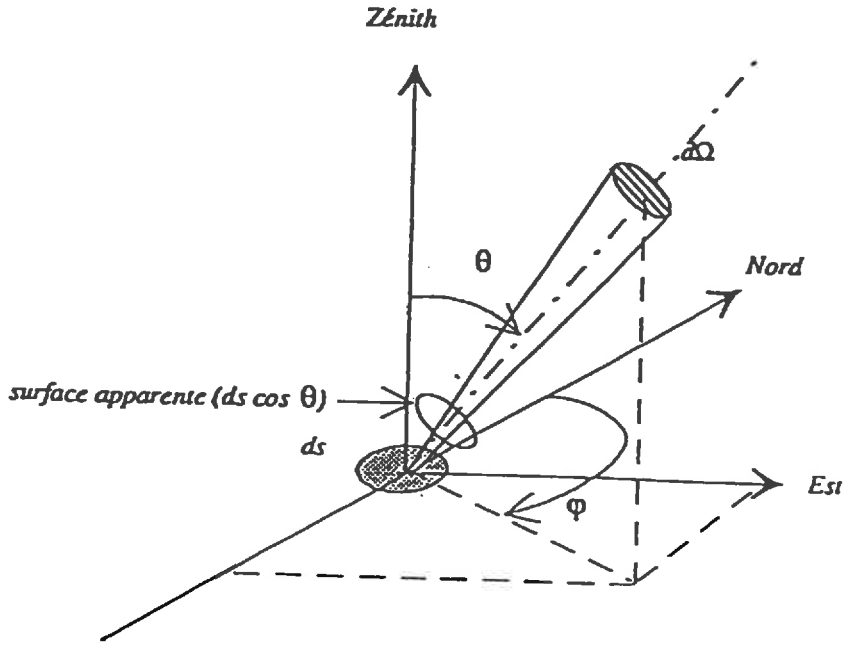


Figure A.4 : Luminance d'une source étendue ds.

avec :

c_1 : 3.74 . 10-16 $W.m^{-2}$,

c_2 : 1.44 . 10-2 m.°K,

λ : longueur d'onde m,

T : température en °K.

A.16) Emissivité spectrale (ε)

C'est le rapport pour une longueur d'onde donnée, entre la luminance d'un corps et la luminance d'un corps noir, pour la même température.

$$\varepsilon(\lambda) = L_\lambda \text{ corps } (T°)/L_\lambda \text{ corps noir } (T°)$$

A.17) Réflectance (r)

C'est le rapport entre la quantité d'énergie réfléchie dans une direction donnée par une surface (luminance) et la quantité d'énergie reçue par cette même surface (irradiance) pour une longueur donnée.

$$r = \pi L/E$$

Parmi toutes ces définitions, c'est surtout cette notion de réflectance qui doit être retenue car c'est cette mesure qui va être à la base des données utilisées dans notre étude.

Cette même valeur, intégrée sur l'ensemble de l'hémisphère est appelée **albédo spectral**; intégrée sur l'ensemble des longueurs d'onde on aboutit à la notion d'**albédo** au sens strict.

A.2) Facteurs de variation du rayonnement

L'angle d'incidence des rayons solaires affecte la quantité d'énergie perçue par la surface du globe. Cet angle va dépendre de la localisation géographique du point considéré, de la saison, de l'heure du jour. Parallèlement à cela, des grandeurs telles que la réflectance, seront conditionnées par les propriétés morphologiques, physiques et chimiques des objets observés.

A.21) Réflexion

Elle se manifeste à l'interface séparant 2 milieux où les vitesses de propagation sont différentes. Si la surface est plane par rapport à la longueur d'onde considérée, la réflexion est dite **spéculaire** (angle de réflexion = angle d'incidence). Si la surface est rugueuse par rapport à la longueur d'onde, la réflexion est dite **diffuse** et l'énergie incidente peut être rediffusée dans toutes les directions de l'hémisphère.

A.22) Diffusion

Ce mécanisme repose sur le fait que les particules constituant un milieu et soumises à un rayonnement peuvent jouer le rôle d'une source secondaire de rayonnement, susceptible de réémettre dans toutes les directions. Ce phénomène physique a déjà été décrit dans le chapitre II (§ 2.31b).

On peut noter que du point de vue de l'observation spatiale, le résultat de la diffusion aboutit à une fuite d'une partie de l'énergie émise par l'objet visé hors du champ de vue du capteur. A l'opposé, un rayonnement issu d'une cible voisine du champs de vue du capteur peut atteindre ce dernier par suite de phénomènes de diffusion.

On peut souligner ici que lorsque sont effectuées des corrections sur les données enregistrées, seules sont prises en compte les diffusions élastiques car l'influence de l'effet Compton est négligeable dans les longueurs d'ondes utilisées (spectre visible).

A.23) Absorption

Un rayonnement électromagnétique pénétrant dans un milieu communique de l'énergie aux particules le constituant. Il s'ensuit une absorption d'énergie. Plus la fréquence de vibration des particules exposées sera proche de la fréquence du rayonnement incident, plus l'absorption sera élevée (mécanisme de résonance).

En télédétection, le rayonnement mesuré contiendra des proportions différentes d'énergie due à la réflexion, à l'émission et à la diffusion selon la longueur d'onde considérée. Ainsi, pour les longueurs d'onde inférieures à 2 µm (notamment le visible), l'essentiel du rayonnement mesuré correspond à la réflexion du rayonnement solaire. Pour les longueurs d'onde comprise entre 8 et 20 µm (rayonnement thermique), l'émission propre est prépondérante. Entre les deux domaines, la proportion entre émission et réflexion est environ égale.

A.3) Atmosphère et rayonnement

Un capteur embarqué à bord d'un satellite enregistre un signal électromagnétique après que celui-ci ait traversé l'atmosphère. Il faut donc prendre en compte dans les mesures, l'interaction rayonnement-atmosphère.

Les basses couches de l'atmosphère (troposphère), grâce au brassage des masses d'air, possèdent une remarquable constance dans leur composition gazeuse (azote 78.1%, oxygène 20.9%, argon 0.9%). A ces gaz s'en ajoutent d'autres dont la concentration, nettement plus faible, varie avec l'altitude. Ce sont principalement l'ozone, le dioxyde de carbone, le dioxyde d'azote et l'eau qui peut représenter jusqu'à 3-4% du volume d'air. En plus de ces molécules, il faut prendre en considération les aérosols (poussières, grains de sable) qui jouent un rôle important dans les processus de condensation de la vapeur d'eau et de diffusion du rayonnement.

En dehors de la météorologie, où elle est l'objet d'étude, l'atmosphère constitue toujours une source de bruit pour les enregistrements en télédétection. En fonction de la longueur d'onde considérée et de la composition de l'atmosphère, l'influence sera plus ou moins élevée. Aux très faibles longueurs d'onde (≤0.3 µm, = UV), le rayonnement est fortement absorbé par l'ozone. Dans le visible, intervient surtout le phénomène de diffusion alors que dans l'infrarouge moyen intervient l'absorption. Des zones d'opacités se forment donc dans certaines zones du spectre solaire qui sont entrecoupées par des zones appelées **fenêtres de l'atmosphère.**

Ce sont à l'intérieur de ces fenêtres que devront être fait les choix des longueurs d'onde à utiliser en télédétection en tenant compte, bien sur, des caractéristiques spectrales des objets étudiés.

A.4) Acquisition des données

L'acquisition des données va dépendre du capteur (appareil de mesure) et du vecteur (véhicule sur lequel le capteur est embarqué). Il faut souligner que la présentation des différents types de capteurs et de vecteurs qui va être effectuée, sera surtout faite en fonction des satellites utilisés dans ce travail et qu'elle ne sera en rien exhaustive.

A.41) Les vecteurs

Du vecteur vont dépendre les conditions de géométrie de l'observation (éloignement par rapport à l'objet visé, angles de visée, ...) ainsi que les conditions de temps (moments et fréquences de passage). Parmi les plus utilisés on peut citer les ballons, les avions et, ce qui nous intéresse plus particulièrement, les satellites. Les satellites ont des orbites régulières. Pour l'observation de la terre on choisit généralement une orbite circulaire ce qui permet de conserver une résolution au sol quasi constante. L'altitude orbitale est choisie en fonction des caractéristiques des capteurs, de l'échelle recherchée.

Au cours d'une **période** T, temps que met le satellite pour repasser au même point de sa trajectoire, la terre tourne sur son axe. La **trace** du satellite (projection sur la terre de la trajectoire de celui-ci) représentera une courbe sans fin s'enroulant autour de la terre. Dans ce cas de figure, le satellite est appelé **satellite à défilement.** Pour que les données soient le plus possible uniformes pour ce qui concerne les conditions d'éclairement, il faut choisir une orbite qui permette de suivre le mouvement apparent du soleil. Ces satellites, dits **héliosynchrones,** passent toujours aux mêmes latitudes à la même heure. C'est le cas des satellites américains **NOAA/AVHRR** (dont les données sont utilisées dans ce travail). Par exemple, les heures de passage à l'équateur sont de 02h30min en trace descendante et 14h30min en phase ascendante pour les satellites NOAA 9 et 11.

Certains satellites ont une combinaison de leur mouvement avec celui de la terre qui les fait apparaître comme immobile par rapport au sol. Cette caractéristique est obtenue pour une altitude orbitale d'environ 36000 Km et les satellites sont dits **géostationnaires.** C'est le cas du

satellite européen **METEOSAT**, dont les données sont également utilisées dans ce travail, et qui est sensiblement centré au point 0° de latitude et 0° de longitude.

A.42) les capteurs

Ce sont eux qui permettent de détecter et de mesurer le rayonnement électromagnétique émis par la terre et l'atmosphère. Trois paramètres caractérisent les capteurs.

- l'ouverture angulaire, qui définit la taille du territoire que l'appareil observe (taille de la scène);
- la résolution spatiale, qui définit la **dimension minimale des objets visés** que l'appareil puisse appréhender (taille du **pixel**);
- la résolution spectrale, qui résulte du choix des longueurs d'onde ainsi que de la largeur des bandes spectrales. Compte tenu des fenêtres atmosphériques, les longueurs d'onde généralement utilisées sont les domaines visibles (0.4 à 0.7 µm), proche infrarouge (0.7 à 1.1 µm), moyen infrarouge (1.5 à 5.5 µm), infrarouge thermique (8 à 14 µm) et enfin les micro-ondes (quelques µm à quelques mètres).

On peut distinguer 2 types de capteurs :

- les **capteurs dits passifs**, qui enregistrent le rayonnement naturel des objets visés. Parmi ceux-ci, on peut discerner :
  - des capteurs permettant une acquisition quasi instantanée de l'ensemble de la scène (caméras électroniques à balayage, appareils photographiques dont le pixel correspond à la taille du grain);
  - des capteurs réalisant une observation séquentielle des éléments d'image et construisant ligne par ligne l'ensemble de la scène (**radiomètres à balayage**). Généralement, le système procède par rotation, perpendiculairement au sens de déplacement du satellite, d'un miroir qui envoie le rayonnement incident vers les détecteurs. Le déplacement du satellite conduit à la formation de l'image par juxtaposition des lignes successivement balayées. C'est ce dernier type de capteur qui est le plus utilisé dans les satellites de télédétection civils (NOAA/AVHRR, METEOSAT). Les capteurs AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) des satellites de la NOAA sont caractérisés par un champs de vue instantané (pixel) de 1.1 km au nadir (point situé à la verticale sous le satellite), un champ de prise de vue de ± 55° de part et d'autre du nadir soit un champ de vue au sol d'environ 2700 km.
- les **capteurs dits actifs**, qui enregistrent le rayonnement rétrodiffusé d'un faisceau d'onde émis par eux-mêmes (radars).

A.5) Caractéristiques générales des satellites NOAA/AVHRR, Landsat, SPOT et Météosat.

A.51) NOAA/AVHRR (satellite météorologique)

Capteur intéressant pour l'étude de la végétation :	Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)
Type :	héliosynchrone
Dernier satellite lancé :	NOAA-11 (24/10/88)
	NB: NOAA-12 (14:25:81) mais passage de nuit
Altitude :	≅ 850 km
Période :	102 mn
Cycle :	12 heures (passage exact tous les 9.2 jours)
Passage à l'équateur :	2h30 (descendant); 14h30 (ascendant) (heure solaire)
Ouverture :	±55.4°
Taille du pixel au nadir :	1.1 km
Taille d'une scène :	≅ 2400 x 2400 km
Canaux :	canal 1 (0.58-0.68 µm) "visible"
	canal 2 (0.725-1.10 µm) proche infrarouge
	canal 3 (3.55-3.93 µm) moyen infrarouge
	canal 4 (10.5-11.3 µm) infrarouge thermique
	canal 5 (11.5-12.5 µm) infrarouge thermique

A.52) Landsat

Capteur intéressant pour l'étude de la végétation :	Thematic Mapper
Type :	héliosynchrone
Dernier satellite lancé :	Landsat 5 (01 mars 1984)
Altitude :	≅ 705 km
Période :	103 mn
Cycle :	16 jours
Passage à l'équateur :	9h45 (heure solaire)
Ouverture :	± 7.4°
Taille du pixel au nadir :	30 x 30 m; 120 m (thermique)
Taille d'une scène :	≅ 185 x 185 km
Canaux :	canal 1 (0.45-0.52 µm) bleu
	canal 2 (0.52-0.60 µm) vert
	canal 3 (0.63-0.69 µm) orangé-rouge

canal 4 (0.78-0.91 µm) proche infrarouge
canal 5 (1.57-1.78 µm) moyen infrarouge
canal 6 (10.42-11.66 µm) thermique
canal 7 (2.08-2.35 µm) moyen infrarouge

A.53) Spot

Capteur intéressant pour l'étude de la végétation :	Haute Résolution Visible (HRV)
Type :	héliosynchrone
Dernier satellite lancé :	Spot II (janvier 1989)
Altitude :	≅ 820 km
Période :	103 mn
Cycle :	26 jours (possibilité de dépointage)
Passage à l'équateur :	10h30 (heure solaire)
Ouverture :	± 2.5° à ± 27° (dépointage maximum)
Taille du pixel au nadir :	20 x 20 m (XS); 10 x 10 m (panchromatique)
Taille d'une scène :	≅ 60 x 60 km à 80 x 80 km (dépointage maximum)
Canaux :	mode multispectral (XS)
	canal 1 (0.50-0.59 µm) bleu-vert
	canal 2 (0.62-0.66 µm) orangé-rouge
	canal 3 (0.77-0.87 µm) proche infrarouge
	mode panchromatique noir et blanc
	(0.51-0.73 µm)

A.54) futur instrument VEGETATION embarqué sur Spot IV

Ce capteur présentera l'avantage, entre autre, d'être complémentaire avec le capteur HRV de Spot IV. Ils auront 3 bandes spectrales en commun. Les acquisitions HRV seront simultanées à une acquisition VMI. De plus, contrairement aux capteurs AVHRR, il existera un système de calibration embarqué à bord du satellite.

Capteur intéressant pour l'étude de la végétation :	Vegetation Monitoring Instrument (VMI)
Type :	héliosynchrone
Date de lancement théorique :	Spot IV (fin 1997)
Altitude :	≅ 820 km
Période :	103 mn
Cycle :	12 heures
Passage à l'équateur :	Milieu de matinée (faible occurence nuageuse)

Ouverture :	± 50.5°
Taille du pixel au nadir :	1.1 x 1.1 km
Taille d'une scène :	≅ 2200 x 2200 km
Canaux :	canal B_1 (0.43-0.47 µm) activité chlorophyllienne (bleu)
	canal B_2 (0.50-0.59 µm) activité chlorophyllienne (rouge)
	canal B_3 (0.61-0.68 µm) vegetation (proche infrarouge)
	canal B_4 (0.78-0.79 µm) vegetation, correction atmosphériques.
	MIR (1.58-1.75 µm) vegetation, correction atmosphériques

A.55) Météosat (satellite météorologique)

Satellite utilisé dans cette étude pour l'estimation du rayonnement global.

Type :	géostationnaire
Dernier satellite lancé :	Météosat 5 (02 mars 1991)
Altitude :	≅ 36000 km
Cycle :	stationnaire
Acquisition :	toutes les 30 mn
Taille du pixel au nadir :	5 x 2.5 km (2.5 x 2.5 km quand le canal 2 est non utilisé)
Canaux :	canal 1 (0.4-1.1 µm) "visible"
	canal 2 (5.7-7.1 µm) "vapeur d'eau"
	canal 3 (10.5-12.5 µm) "thermique"

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS CITES

A.E.T.F.A.T.	Association pour l'Etude Taxonomique de la Flore de l'Afrique Tropicale
A.S.E.C.N.A.	Agence pour la Securité Aérienne en Afrique et à Madagascar
A.V.H.R.R.	Advanced Very High Resolution Radiometer
B.I.S.E.	Best Index Slope Extraction
ε_b	Efficience biologique ou efficience photochimique
ε_c	Efficience climatique (proportion du RPA dans le rayonnement global)
ε_i	Efficience d'interception du rayonnement (global ou photosynthétiquement actif) incident
F.A.O.	Food and Agriculture Organization
F.I.T.	Front InterTropical = Z.C.I.T.
G.A.C.	Global Area Coverage (AVHRR)
G.C.T.E.	Global Change and Terrestrial Ecosystems
G.V.I	Global Vegetation Index (AVHRR)
I.G.B.P.	International Geosphere and Biosphere Programme
L.A.C.	Local Area Coverage (AVHRR)
L.A.I.	Leaf Area Index
M.S.	Matière Sèche
M.V.C.	Maximum Value Composite
N.D.V.I.	Normalized Difference Vegetation Index
N.O.A.A.	National Oceanic and Atmospheric Administration
P.B.I.	Programme Biologique International

P.P.B.	Production Primaire Brute
P.P.N.	Production Primaire Nette
P.V.I.	Perpendicular Vegetation Index
Rg	Rayonnement global
R.P.A. (a ou i)	Rayonnement Photosynthétiquement Actif (absorbé ou intercepté)
S.A.L.T.	Savane A Long Terme
S.A.V.I.	Soil Adjusted Vegetation Index
S.P.O.T.	Satellite Probatoire d'Observation de la Terre
T.S.A.V.I.	Transfomed Soil Adjusted Vegetation Index
U.N.E.P.	United Nations Environment Programme
U.N.E.S.C.O.	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
U.N.S.O.	United Nations Sudano-Sahelian Office
V.M.I.	Vegetation Monitoring Instrument
Z.C.I.T.	Zone de Convergence InterTropicale = F.I.T.

LISTE DES FIGURES

1.1a Evolution des propriétés optiques d'une feuille de blé en fonction de la longueur d'onde spectrale

1.1b Spectres d'absorption des chlorophylles a et b

1.2 Schémas d'une cellule végétale et d'un chloroplaste

1.3 Présentation schématique des réactions de la phase claire de la photosynthèse

1.4 Présentation schématique des cycles de carboxylation en C3 et C4

1.5 Coupes transversales d'une feuille de plante en C3 et d'une feuille de plante en C4 montrant les différences de structures anatomiques conduisant à des systèmes différents d'assimilation du CO_2.

1.6 Caractéristiques d'assimilation nette du CO_2 par des feuilles de plantes en C3 et C4

2.1 Réponses photosynthétiques à l'éclairement d'une feuille et d'une culture de *Dactylis glomerata*

2.2 Spectre du rayonnement solaire

2.3 Fenêtres de transmission-absorption de l'atmosphère

2.4 Variation annuelle du facteur de transmission atmosphérique à sumaru (Nigeria), Kinshasa (Zaïre) et Mugugu (Kenya)

2.5 Bilan radiatif d'un couvert végétal

2.6 Interception du rayonnement photosynthétiquement actif en fonction du Leaf Area Index pendant la phase de croissance et la phase de sénescence d'un couvert de blé d'hiver

3.1 Spectre de réflectance de feuilles de coton

3.2 Evolutions des spectres de réflectance de feuilles de Blé au cours de la sénescence

3.3 Influence de la teneur en eau des sols sur leur réponse spectrale

3.4 Simulation de la variation du NDVI en fonction du contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère pour trois angles de visée et pour un couvert dense au solstice d'été

3.5 Simulation de la variation du NDVI en fonction de l'épaisseur optique des aérosols pour trois angles de visée et pour un couvert dense au solstice d'été

3.6 Variation journalière de l'angle zénithal de visée pour le satellite NOAA-9 à 0°, 30°, 45° et 60° de latitude nord.

3.7 Réflectances dans le rouge et le proche infrarouge d'un couvert de coton dont le taux de recouvrement est de 40%, en fonction de la réflectance de différents sols nus pour deux angles de visée différents

3.8 Valeurs de luminance dans le rouge et le proche infrarouge d'un couvert de coton dont le taux de recouvrement est de 40%, en fonction de la réflectance du sol nu pour différentes conditions atmosphériques

3.9 Relation entre différents indices de végétation (NDVI, SAVI, PVI) et le Leaf Area Index d'une culture de coton

3.10 Constitution des données Global Vegetation Index (GVI)

3.11 Simulation de la relation entre le NDVI et le pourcentage d'interception du Rayonnement Photosynthétiquement Actif pour différentes distributions d'angles foliaires d'un couvert de Blé

3.12 Relation entre le NDVI et le pourcentage d'interception du RPA : valeurs mesurées pour plusieurs types de couverts de Blé de printemps

3.13 Comparaison entre des mesures horaires (11:00 à 13:00 TU) estimées à l'aide de pyranomètres et les estimations du rayonnement solaire à l'aide de données satellitaires

4.1a Coupe shématique de la troposphère ouest africaine en août le long du méridien 0°

4.1b Positions moyennes mensuelles des zones climatiques et succession moyenne des types de temps associés

4.2 Les unités phytochorologiques de l'Afrique.

4.3 Les principaux types de végétation de l'Afrique tropicale

4.4 Distribution des principaux types de savanes le long d'une catena schématique en zone guinéenne

5.1 Gains utilisés pour étalonner les valeurs de rélectances des canaux 1 (visible) et 2 (proche infrarouge) du satellite NOAA-9 AVHRR

5.2 Gains utilisés pour étalonner les valeurs de rélectances des canaux 1 (visible) et 2 (proche infrarouge) du satellite NOAA-11 AVHRR

5.3 Simulation du NDVI dans les conditions de visée et d'éclairement correspondant au capteur AVHRR des satellites NOAA 7 et 9 pour différents types de couverts au solstice d'hiver

5.4 Exemples de profils de NDVI obtenus à l'aide de la méthode BISE en utilisant deux longueurs de fenêtre glissante différentes (10 et 30 jours)

5.5 Variation du GVI moyen hebdomadaire observée sur une zone de désert (24° N-16°N; 14° O-13°E) au cours des années 1986 à 1991 (Données non corrigées)

5.6 Evolutions annuelles de l'Indice Global de Végétation et de l'angle zénithal solaire pour un pixel situé à 4.5° longitude est et 17° latitude nord.

5.7 Evolutions annuelles de l'Indice Global de Végétation et de l'angle zénithal solaire pour un pixel situé à 1.3° longitude ouest et 16.3° latitude nord.

5.8 Variation du rapport entre GVI moyen hebdomadaire observé entre 1986 et 1991 et le GVI moyen hebdomadaire observé à la même date en 1986. Observation sur une zone de désert (24° N-16°N; 14° O-13°E) (Données non corrigées)

5.9 Variation du rapport entre GVI moyen hebdomadaire observé entre 1986 et 1991 et le GVI moyen hebdomadaire observé à la même date en 1986. Observation sur une zone de désert (24° N-16°N; 14° O-13°E) (Données corrigées)

5.10 Variation de la réflectance moyenne hebdomadaire observée sur une zone de désert (24° N-16°N; 14° O-13°E) au cours des années 1986 à 1991 mettant en évidence une anomalie dans les données satellitaires en 1988. (canal visible) (Données corrigées)

5.11 Variation de la température moyenne hebdomadaire observée sur une zone de désert (24° N-16°N; 14° O-13°E) au cours des années 1986 à 1991 mettant en évidence une anomalie dans les données satellitaires en 1988. (canal infrarouge thermique n° 4) (Données corrigées)

5.12 Différences, en pourcentage, entre les valeurs moyennes de NDVI non corrigées et les valeurs moyennes de NDVI obtenues après correction

5.13 Pourcentage de semaines éliminées par le filtrage à l'aide des canaux visible, proche infrarouge et thermiques NOAA/AVHRR

5.14 Variation du rapport entre GVI moyen hebdomadaire observé entre 1986 et 1991 et le GVI moyen hebdomadaire observé à la même date en 1986. Observation sur une zone de désert (24° N-16°N; 14° O-13°E) (Données filtrées)

6.1 Carte numérisée de la végétation de l'Afrique de l'ouest établie à partir de la carte de la végétation AETFAT/UNESCO/UNSO

6.2 Influence depressive des ligneux sur la phytomasse herbacée. Valeurs théoriques estimées à partir de données bibliographiques. Adaptation effectuée en fonction des classes de végétation de la carte de l'AETFAT

6.3 Influence depressive des ligneux sur la phytomasse herbacée. Valeurs théoriques estimées à partir de données bibliographiques. Adaptation effectuée en fonction des valeurs d'indices de végétation moyens annuels

6.4 Méthode de détermination des valeurs de recouvrement arboré et d'effet dépresseur en fonction des valeurs de GVI moyen annuel

6.5 Evolution de l'indice de végétation mesuré au sol pour quatre types de couvert de blé

7.1 Exemple de cycles de végétation déterminés à partir de l'évolution annuelle du NDVI pour des données corrigées et des données filtrées.

7.2 Modification de l'évolution annuelle du NDVI, obtenue après filtrage des données corrigées, pour un pixel correspondant à une zone de forêt dense

7.3 Exemple de cycle de végétation déterminé à partir de l'évolution annuelle du NDVI et mettant en évidence le nombre de valeurs de NDVI rejetées lors du filtrage

7.4 Longueurs des cycles de végétation déterminées à partir de l'évolution temporelle du NDVI (année 1986)

7.5 Exemple de profil de NDVI observé pour un pixel situé en Côte d'Ivoire et montrant la suppression de points entraînée par le filtrage

7.6 Exemple de profil de NDVI observé pour un pixel situé dans le Delta du Nil et montrant la suppression du double cycle de végétation existant dans cette région

7.7 Modification de l'évolution annuelle du NDVI obtenue après utilisation d'une fenêtre adaptative en fonction de la fréquence d'occurrence des nuages. Exemple donné pour un pixel localisé dans le Delta du Nil

7.8 Modification de l'évolution annuelle du NDVI obtenue après utilisation d'une fenêtre adaptative en fonction de la fréquence d'occurrence des nuages. Exemple donné pour un pixel correspondant à une zone de forêt dense (Libéria)

7.9 Longueurs des cycles de végétation déterminées à partir de l'évolution temporelle du NDVI (année 1986). Lors du filtrage à l'aide de la méthode "bise", la fenêtre gllissante a été adaptée en fonction de la fréquence d'occurrence des nuages

7.10 Hausse, en pourcentage, des valeurs de PPN obtenues à l'aide des données NOAA/AVHRR corrigées filtrées par rapport aux valeurs de PPN obtenues avec les données corrigées non filtrées

7.11 Baisse, en pourcentage, observées sur les valeurs de PPN après application des longueurs de cycle de végétation déterminées sur les courbes annuelles d'évolution du NDVI

7.12 Exemple de problème de détermination de cycle subsitant après filtrage des données corrigées

7.13 Valeurs de PPN aériennes estimées à l'aide du modèle satellitaire pour les années 1986, 1987, 1989, 1990 et 1991. (Données satellitaires étalonnées, corrigées de l'atmosphère, filtrées).

7.14a Comparaisons des estimations de la production primaire nette obtenue à partir
7.14b des données satellitaires avec les données obtenues à l'aide de la formulation de Lieth (1975). Comparaisons effectuées pour l'ensemble de l'Afrique de l'ouest

7.15 Relation entre la pluviométrie annuelle et la production primaire déterminée dans le modèle de Miami

7.16a Comparaisons des estimations de la production primaire nette obtenue à partir
7.16b des données satellitaires avec les données obtenues à l'aide de la formulation de Lieth (1975). Comparaisons effectuées pour la classe des savanes guinéennes de la carte de l'AETFAT

7.17a Comparaisons des estimations de la production primaire nette obtenue à partir
7.17b des données satellitaires avec les données obtenues à l'aide de la formulation de Lieth (1975). Comparaisons effectuées pour la classe de forêts claires indifférenciées de la carte de l'AETFAT

7.18 Evolution des valeurs de production primaire nette en fonction du traitement effectué afin de distinguer la végétation arborée de la végétation herbacée

7.19 Pluviométrie annuelle dérivée des données fournies par l'ASECNA et le Réseau Agrhymet

7.20 Evolutions longitudinales de la PPN estimée par le modèle de Lieth and Whittaker et le modèle satellitaire. Les courbes sont tracées pour la latitude 13.5° nord. (années 1986 et 1987)

7.21 Evolutions longitudinales de la différence normalisée (1986-1987) de la PPN estimée par le modèle de Lieth and Whittaker et le modèle satellitaire. Les courbes sont tracées pour la latitude 13.5° nord

7.22 Evolution de la biomasse végétale observée par satellite (NOAA/AVHRR). Situation au 20septembre 1987. Comparaison avec l'évolution observée en 1986

7.23 Evolutions longitudinales des différences normalisées de la PPN estimée par le modèle de Lieth and Whittaker et le modèle satellitaire. Les courbes sont tracées pour la latitude 08.2° nord et pour les années 1986, 1987

7.24a Evolutions longitudinales des différences normalisées de la PPN estimée par le
7.24b modèle de Lieth and Whittaker et le modèle satellitaire. Les courbes sont tracées pour la latitude 11° nord. Les années 1986, 1987 et 1989 sont comparées entre elles
a) les valeurs de PPN ont été calculées sans considérer de cycle de végétation
b) les valeurs de PPN ont été calculées en considérant un cycle de végétation

7.25 Evolution de la PPN hebdomadaire estimée en 1986 pour un pixel localisé à 13° de latitude nord et 10.5° de longitude ouest. Les données satellitaires ont été étalonnées et corrigées de l'influence de l'atmosphère. Les données de GVI ont été filtrées

A.1 Représentation schématique d'une onde éléctromagnétique

A.2 Les ondes éléctromagnétiques et les phénomènes qui sont à l'origine de leur production

A.3 Intensité d'une source pontuelle A

A.4 Luminance d'une source étendue ds

LISTE DES TABLEAUX

1.1 Valeurs de la production primaire annuelle de divers sites de savane brûlée en zone guinéenne, soudano-guinéenne et soudanienne

2.1 Pentes des ajustements linéaires matière sèche/rayonnment intercepté ou absorbé (εb). Résultats bibliographiques

6.1 Valeurs de rayonnement global mensuel moyen pour quatre stations de Côte d'Ivoire (années 1980 à 1987)

6.2 Influence dépressive du couvert ligneux sur la phytomasse maximale, exemple d'une toposéquence à Nazinga en zone soudanienne

6.3 Valeurs de GVI min, GVI max et relations εi = f (GVI) déterminées, pour les 5 années d'études, à partir des données NOAA/AVHRR étalonnées, corrigées et filtrées.

6.4 Caractéristiques statistiques des paramètres du modèle de production

6.5 Variations de la PPN moyenne hebdomadaire dues à chacun des paramètres du modèle de production

7.1 Superficies des forêts tropicales humides en 1980 et déforestation annuelle (1976-1980) pour quelques pays d'Afrique de l'ouest

TABLE

DES

MATIERES

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION 1

CHAPITRE I - PHOTOSYNTHESE ET PRODUCTION PRIMAIRE 5

1.1 Mécanismes de la photosynthèse 5
1.11 Définition 5
1.12 Les pigments assimilateurs et leur localisation 5
1.13 Les réactions lumineuses ou phase claire 8
1.14 Les réactions obscures ou phase sombre 8
1.15 La photorespiration 9

1.2 Les différents mécanismes photosynthétiques 9
1.21 Les plantes en C3 9
1.22 Les plantes en C4 9
1.23 Les plantes CAM 10

1.3 La respiration 10
1.31 Mécanismes et localisation 10
1.32 Les differentes respiration 11
1.33 Facteurs de variation de la respiration 12

1.4 Production primaire brute, production primaire nette et biomasse 13

1.5 Facteurs de variation de la production primaire 13
1.51 Facteurs abiotiques 14

1.6 Méthodes d'estimation de la production primaire 17
1.61 Estimations à l'aide de méthodes de mesure 17
1.62 Estimations à l'aide de modèles 20

CHAPITRE II - ESTIMATION DE LA PRODUCTION PRIMAIRE - APPROCHE PAR LE MODELE DE MONTEITH 23

2.1 Description générale 24

2.2 Discussion - simplification du modèle 25

2.3 Détermination des paramètres du modèle simplifié 27
2.31 Le rayonnement global 27
2.32 L'efficience climatique 29
2.33 L'efficience d'interception 30
2.34 L'efficience de conversion 32

2.4 Validité du modèle de Monteith 35

CHAPITRE III - L'APPORT DES DONNEES SATELLITAIRES 37

3.1 Caractéristiques spectrales des sols et de la végétation 37
3.11 Cas de la végétation 37
3.12 Cas des sols 39

3.2 L'indice normalisé de végétation 39
3.21 Prétraitements des données radiométriques 40
3.22 Les perturbations d'origine atmosphérique 41
3.23 La géométrie de la mesure 41
3.24 La présence de nuages 42
3.25 L'influence du sol 42
3.26 Création d'indices globaux de végétation 44

3.3 Données satellitaires utilisables dans le modèle de Monteith 45
3.31 Estimation du RPAi et du RPAa 46
3.32 Détermination de la végétation 46
3.33 Estimation du rayonnement global 47

CHAPITRE IV - DESCRIPTION DE MILIEU D'ETUDE 49

4.1 Choix du milieu d'étude 49

4.2 Déterminisme du climat 49

4.3 Les grands types de climats 49

4.4 Les sols 50

4.5 Les grands types de formations végétales 52
4.51 Le domaine guinéen 52
4.52 Le domaine soudanais 53
4.53 Le domaine sahélien 54

4.6 Facteurs de variation de la production en Afrique de l'ouest 55
4.61 L'énergie incidente 55
4.62 La température 55
4.63 La pluviométrie 55
4.64 L'évapotranspiration 56
4.65 Facteurs édaphiques 56
4.66 L'action anthropique 56

CHAPITRE V - PRETRAITEMENT DES DONNEES NOAA/AVHRR 58

5.1 Type de données 58

5.2 Etalonnage des données 58

5.3 Estimation des réflectances à la surface du sol 60

5.4 Filtrage des données 61

5.5 Résultats des prétraitements des données NOAA/AVHRR 63
5.51 Etalonnage des données - corrections atmosphériques 65
5.52 Filtrage des données 67

CHAPITRE VI - MISE EN OEUVRE DU MODELE 69

6.1 Adaptation des différents paramètres à notre cas d'étude 69
6.11 Adaptation des valeurs de rayonnement global 71
6.12 Adaptation de la valeur d'efficience climatique 72

6.13 Adaptation des valeurs d'efficience de conversion 73
6.14 Adaptation des valeurs d'efficience d'interception 79
6.15 Estimation de la longueur du cycle végétatif 82
6.16 Etude de sensibilité 83

CHAPITRE VII - RESULTATS - DISCUSSION 85

7.1 Détermination de la longueur des cycles de végétation 85

7.2 Estimation de la PPN à l'aide du modèle satellitaire 89
7.21 Apport des données filtrées 91
7.22 Apport des cycles de végétation estimés 91
7.23 Estimations des valeurs de PPN aériennes 92
7.24 Comparaison avec le modèle de Lieth and Whittaker 93
7.25 Erreurs de précision du modèle satellitaire 104
7.26 Perspectives d'extension à l'échelle globale 109

CONCLUSION GENERALE 112

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 116

ANNEXE A - LISTE DES SIGLES UTILISES - LISTE DES FIGURES - LISTE DES TABLEAUX 131

TABLE DES MATIERES 148

Thèse de Doctorat de l'Université d'Orsay - Paris Sud
Spécialité : Ecologie Végétale
26 mars 1993 (151 pages)

LOUDJANI Philippe

SUJET

APPORT DES DONNEES SATELLITAIRES EN VUE DE L'ESTIMATION DE LA PRODUCTION PRIMAIRE NETTE A L'ECHELLE REGIONALE CAS DE L'AFRIQUE DE L'OUEST

RESUME

Le but de ce travail est d'évaluer l'apport des données satellitaires pour l'estimation de la production primaire nette (PPN) à l'échelle régionale. Cette estimation est effectuée au moyen d'un modèle semi-empirique (Monteith; 1972) mettant en relation la PPN avec la quantité de rayonnement solaire intercepté par le couvert végétal. Le rayonnement global incident est dérivé de données provenant d'un satellite météorologique (Météosat). Le rayonnement intercepté est quant à lui estimé à partir de mesures de réflectance dans le rouge et le proche infrarouge effectuées par des satellites à haute résolution temporelle (NOAA/AVHRR). La méthodologie proposée présente l'avantage d'être reproductible sur plusieurs années sans nécessiter d'étape de réétalonnage de la formulation. Elle permet de bien restituer les variations spatiales et interannuelles de la PPN. Ce travail a montrer l'importance des corrections à apporter aux données satellitaires utilisées afin de permettre des comparaisons interannuelles. Malgré les résultats très positifs du point de vue qualitatif, nous avons observé une très forte incertitude sur les valeurs estimées. Ce fait peut être expliqué par une méconnaissance encore importante de la physique des mesures satellitaires, le manque crucial de données permettant de calibrer certains paramètres du modèle et en particulier l'efficience photochimique (εb).

Mots-clé : Télédétection, NDVI, PPN, Modélisation, Savane

Thesis - Orsay University (Paris sud) France
26 march 1993 (151 pages)

Philippe LOUDJANI

TITLE

ESTIMATION OF REGIONAL NET PRIMARY PRODUCTION USING COARSE RESOLUTION SATELLITE DATA A CASE OF STUDY : WEST AFRICA

SUMMARY

The purpose of this thesis was to evaluate the possibility of using satellite data to estimate Net Primary Production (NPP) at a regional scale. The estimation of NPP is derived from a semi-empirical model developed by Monteith (1972). It relates the amount of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (APAR) to NPP. Incident global solar radiation is derived from meteorological satellite data (Météosat). Intercepted radiation depends on a linear relationship between APAR and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

The proposed method allows to evaluate NPP in regions where some climatic and ground-based data are not available ; il can be yearly reproduced without re-calibration step, contrary to statistical models ; it allows to reproduce spatail and temporal variations better than statistical model as the one of Lieth and Whittaker (1975).

In spite of encouraging qualitative results, a strong uncertainty was observed dor estimated NPP values. This uncertainty can be partly explained by a lack of knowledge concerning the physic of remote sensing measurements. Th other source of errors is the lack of biological data useful to calibrate some model parameters and principaly the photochemical efficiency (εb dry-matter yield of solar energy).

Key-words : NDVI, Net Primary Production, Remote sensing, Model, Savanna