

MODÉLISATION DU FONCTIONNEMENT ET OBSERVATION SATELLITAIRE DE LA VÉGÉTATION HERBACÉE SAHÉLIENNE

**D. LO SEEN¹, E. MOUGIN², A. CHEHBOUNI^{3*}, B. MONTENY³, Y. KERR⁴, T. LEBEL³,
P. BESSEMOULIN⁵**

RÉSUMÉ

Un modèle de fonctionnement développé pour la végétation herbacée sahélienne simule de façon réaliste l'évolution saisonnière de la biomasse épigée. Il nécessite en entrée, principalement des mesures météorologiques standards, et en particulier la pluviométrie au pas journalier. Une première validation a été effectuée sur deux régions test au Sahel (le Ferlo au Sénégal et le Gourma au Mali).

L'objectif de cette étude est premièrement, de vérifier la validité du modèle sur la végétation herbacée de la région où s'est déroulée l'expérience Hapex-Sahel au Niger, et ensuite d'étudier la possibilité d'utiliser l'information satellitaire (NOAA/AVHRR) pour contrôler les simulations du modèle. Pour un site test, les mesures météorologiques et la pluviométrie recueillies pendant la saison 1992 sont utilisées par le modèle de fonctionnement pour simuler l'évolution de la biomasse. La comparaison de ces simulations aux mesures de biomasse effectuées au courant de cette saison confirme la validité du modèle.

Ensuite, une modélisation de la réflectance du paysage sahélien utilisant en entrée une description de la végétation fournie par le modèle de fonctionnement est utilisée pour simuler l'évolution sur la saison des réflectances dans les canaux visibles et proche infrarouge du capteur AVHRR de NOAA. Les réflectances observées sont comparées aux réflectances simulées, et les différences sont interprétées.

¹Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, USA.

²CESR (CNRS-UPS), Toulouse, France.

³Orstom, Montpellier, France.

⁴LERTS (CNES-CNRS), Toulouse, France.

⁵Météo France, Toulouse, France.

INTRODUCTION

L'observation satellitaire est aujourd'hui considérée comme un outil indispensable pour le suivi de la végétation à l'échelle régionale, permettant une vue régulière et globale de zones étendues. Une application intéressante et prometteuse de cet outil a été proposée il y a plus de dix ans par TUCKER *et al.* (1983), où la sommation temporelle d'un indice de végétation, le NDVI (la différence normalisée des réflectances acquises dans les canaux visible et proche infrarouge du capteur AVHRR à bord des satellites météorologiques de la NOAA), a pu être reliée à la biomasse épigée herbacée produite au cours d'une saison de croissance. Cependant, une relation linéaire entre la biomasse produite et le NDVI intégré sur la saison ne se justifie que pour les couverts homogènes tels que les cultures, pour lesquels il existe une relation quasi-linéaire entre le NDVI et l'efficacité d'interception du rayonnement solaire photosynthétiquement actif (KUMAR et MONTEITH, 1982).

Appliquée à la végétation herbacée sahéenne, la relation proposée par Tucker a donné des résultats plus ou moins satisfaisants à l'échelle de la saison de croissance (JUSTICE et HIERNAUX, 1991 ; DIALLO *et al.*, 1991 ; PRINCE, 1991), mais d'une manière générale, elle n'est pas utilisable au pas mensuel ou décadaire. De plus, une relation obtenue pour un site et une saison donnée peut difficilement être généralisée à d'autres sites ou d'une année à l'autre.

Une approche alternative qui se précise depuis quelques années repose sur la modélisation du fonctionnement de la végétation, où les données satellitaires interviennent pour contrôler les simulations du modèle. Cette approche met en relation les modèles physiques de réflectivité et les modèles décrivant le fonctionnement de la végétation, et évolue graduellement vers l'assimilation de données satellitaires dans la modélisation des processus.

Une première application de cette approche a été effectuée sur la végétation herbacée sahéenne en utilisant les données visibles et proches infrarouge du capteur NOAA/AVHRR. Comme étapes importantes de l'application :

- un modèle qui simule de façon réaliste l'évolution saisonnière de la biomasse épigée a été développé ;
- le modèle a été validé sur deux régions test au Sahel (le Ferlo au Sénégal et le Gourma au Mali) ;
- une modélisation des réflectances utilisant en entrée une description de la végétation fournie par le modèle de fonctionnement a été proposée pour simuler l'évolution sur la saison des réflectances dans les canaux visibles et proches infrarouge du capteur NOAA/AVHRR.

L'objectif de la présente étude est de vérifier l'applicabilité du modèle de fonctionnement à un site provenant d'une région autre que celles pour lesquelles le modèle a été validé. Ensuite il s'agira d'étudier la possibilité d'utiliser l'information satellitaire pour contrôler les simulations du modèle. Dans ce but, une modélisation de la réflectance du paysage sahéen avec en entrée une

description de la végétation fournie par le modèle de fonctionnement est utilisée pour simuler l'évolution sur la saison des réflectances dans les canaux visibles et proche infrarouge du capteur AVHRR de NOAA. Les réflectances observées sont alors comparées aux réflectances simulées et les différences interprétées.

Cette étude s'appuie sur des données (météorologiques, pluviométrie, mesures de biomasse et télédétection) acquises sur un site choisi (13°34'N, 2°41'E) au Niger, pendant l'expérience Hapex-Sahel en 1992.

LE MODÈLE DE FONCTIONNEMENT DE LA VÉGÉTATION HERBACÉE SAHÉLIENNE

Le modèle de fonctionnement de la végétation herbacée sahélienne baptisé STEP (Sahelian Transpiration Evaporation and Productivity model) s'inspire d'un modèle développé pour une steppe sud tunisienne (RAMBAL, 1980), et a été adapté pour une utilisation à l'échelle régionale sur l'écosystème sahélien (MOUGIN *et al.*, 1994). La modélisation de l'écosystème ne prend en compte que la couche de végétation prédominante, celle des herbacées, pour laquelle la croissance et la mortalité de la végétation sont avant tout contrôlées par la disponibilité en eau. Les processus modélisés les plus importants sont :

- les flux d'eau dans le sol ;
- l'évaporation du sol nu ;
- la transpiration ;
- la photosynthèse ;
- la respiration et la sénescence.

Parallèlement, les paramètres caractérisant la structure de la végétation (LAI, f_v , e_p , hauteur) sont simulés pour pouvoir être utilisés comme paramètres d'entrée dans des modèles physiques de réflectivité. Le modèle fonctionne à un pas de temps journalier. Toutes les variables simulées sont donc des moyennes journalières et représentatives d'une surface à l'échelle régionale (ce qui peut conduire à considérer des grandeurs qui ont un sens physique inhabituel *i.e.* le potentiel hydrique moyen journalier d'un couvert).

La modélisation se présente en deux parties distinctes mais totalement interactives : la modélisation de la croissance végétale et le bilan hydrique. La biomasse totale herbacée épigée est divisée en trois compartiments : la fraction verte, la fraction sèche et la litière. Jour après jour, l'importance de chaque compartiment est calculée en résolvant une équation différentielle obtenue en faisant le bilan des apports et des pertes. Ainsi, la variation de la biomasse verte, par exemple, est le résultat du bilan de la photosynthèse brute moins la respiration et la sénescence. La photosynthèse est calculée de façon à prendre en compte les effets de l'alimentation hydrique, de la température, du rayonnement global, de la capacité qu'a la végétation à capter ce rayonnement, et d'une certaine façon,

de la richesse du milieu en ressources minérales. Dans l'utilisation du modèle, ce dernier effet est considéré comme caractéristique du milieu et est pris constant pendant plusieurs années pour tous les sites d'une même région.

L'effet de l'alimentation hydrique sur la photosynthèse se traduit par une fermeture des stomates qui à la fois limitent les pertes en eau par transpiration et l'assimilation du gaz carbonique. Dans ce modèle, la fermeture des stomates est directement contrôlée par le potentiel hydrique foliaire Ψ_f . L'extraction de l'eau du sol à travers les racines dépend de la différence entre Ψ_f et Ψ_s le potentiel hydrique du sol. Ψ_f est calculé de façon itérative, en exprimant l'hypothèse que la plante régule sa transpiration en compensant par l'eau qu'elle peut extraire du sol à travers ses racines. L'évaporation et la transpiration réelles sont calculées à partir de l'évapotranspiration potentielle en utilisant le concept de résistance du sol et du couvert végétal. La résistance du sol à l'évaporation dépend de l'humidité dans les premiers centimètres du sol, et la résistance du couvert à la transpiration dépend de son potentiel hydrique.

Le sol est divisé en plusieurs couches (ou horizons). La courbe caractéristique du potentiel hydrique en fonction de l'humidité de chaque couche de sol est paramétrée à partir de la texture. L'eau transite d'un horizon à l'autre en remplissant les horizons successifs jusqu'à la capacité au champ. Chaque horizon perd une partie de son eau par extraction racinaire et aussi par évaporation selon une méthode proposée par VAN KEULEN (1975) pour simuler la migration de l'eau vers la couche de surface où l'évaporation a réellement lieu.

Les paramètres de structure du couvert (LAI, f_v , ε_p , hauteur) sont tous estimés à partir de la biomasse épigée, cette dernière étant la seule variable mesurée à l'échelle régionale. Parmi eux, le taux de recouvrement f_v représente le paramètre central intervenant à la fois dans le bilan hydrique et le modèle de croissance, et semble bien indiqué pour être accessible par télédétection.

La validation du modèle a été effectuée en utilisant des mesures de biomasses réalisées sur sol sableux pendant plusieurs années dans le Ferlo au Sénégal (1975-1987) et le Gourma au Mali (1986-1992). Des données météorologiques et des relevés pluviométriques correspondant à ces périodes ont aussi été réunies pour alimenter le modèle. Comme la pluie représente le facteur prépondérant, il est souhaitable d'utiliser la pluie journalière, mais une pluie décadaire peut encore donner une estimation acceptable. Une description plus détaillée du modèle et de sa validation sont données dans MOUGIN *et al.* (1994).

APPLICATION À UN SITE DE HAPEX-SAHEL ET COMPARAISON AUX MESURES DE BIOMASSE

Lors de la campagne intensive Hapex-Sahel au Niger pendant la saison de croissance de 1992, un important dispositif de mesures a été déployé au sol, et a fourni parmi d'autres, les données utilisées dans la présente étude. Le jeu de données utilisé comprend des mesures météorologiques (température, humidité,

vitesse du vent, rayonnement incident) moyennées sur des périodes de 20 minutes, des relevés pluviométriques journaliers et des mesures de biomasse qui suivent l'évolution de la végétation herbacée. Le site pour lequel les mesures ont été recueillies présente peu ou pas de relief, et accueille principalement une strate herbacée composée d'annuelles. Le recouvrement de la strate ligneuse, quoique faible, peut atteindre 15 %.

Comme le modèle STEP fonctionne avec un pas journalier, les valeurs journalières de la température de l'air, du rayonnement global et de l'évapotranspiration potentielle sont déduites des mesures météorologiques. La figure 1 montre la distribution de pluie utilisée en entrée du modèle. La saison de pluie s'étale de la mi-juin à la mi-septembre avec un total de 410 mm bien réparti sur les trois mois. Le sol est paramétré comme un sol sableux avec un faible pourcentage d'argile. La première couche dans laquelle puise les trois-quarts du système racinaire a une épaisseur égale à 30 cm. La figure 2 montre l'évolution du contenu en eau dans cette couche pendant la saison. On remarque qu'à partir du démarrage de la végétation (voir figure 3) au mois de juillet, l'humidité de cette couche ne descend pas en deçà du point de flétrissement, indiquant que la distribution de la pluie a été plutôt favorable. L'évolution de la biomasse épigée verte, sèche, totale (verte + sèche), ainsi que celle de la litière produite durant la saison sont montrées dans la figure 3. Les biomasses mesurées sont indiquées par des croix. Bien que les différences entre les biomasses mesurées et simulées peuvent atteindre 200 kg MS/ha, l'évolution de la biomasse sur la saison est simulée de façon satisfaisante, et en particulier, il n'y a pas de déphasage entre l'évolution observée et simulée.

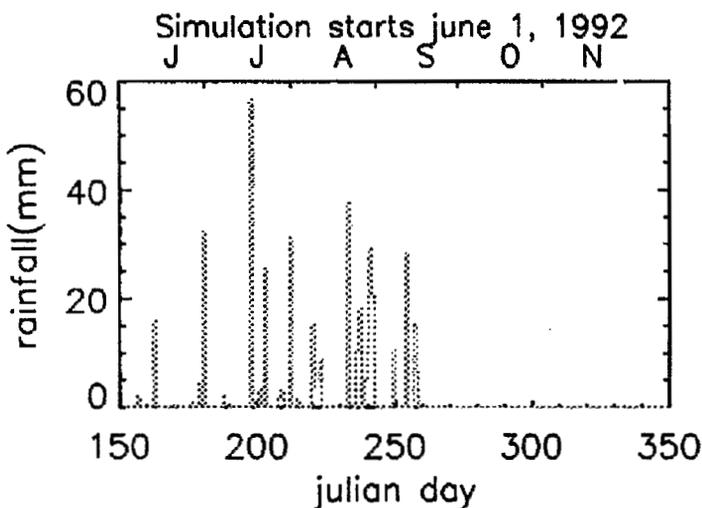


Figure 1 :
Histogramme de la saison 1992.

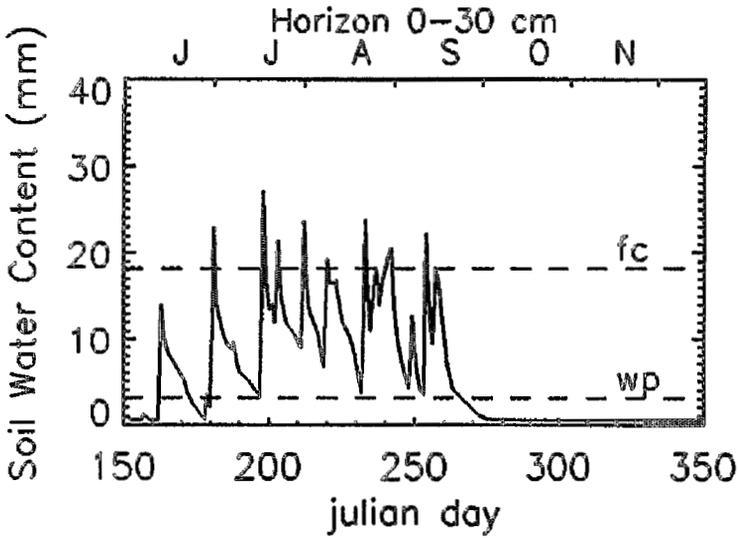


Figure 2 :

Évolution de la biomasse épigée verte, sèche, totale et litière.
Valeurs mesurées (croix).

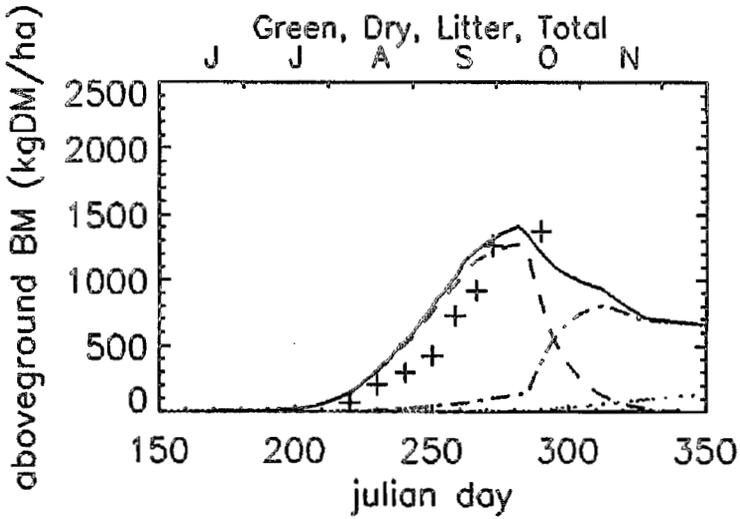


Figure 3 :

Évolution du contenu en eau de la première couche de sol (0-30cm).

MODÉLISATION DE LA RÉFLECTANCE

La modélisation de la réflectance du paysage sahélien proposée est basée sur des modèles existants de la réflectance du sol et de la végétation. Seule la strate herbacée est modélisée, car à l'échelle régionale sur le Sahel sablonneux, l'influence des arbustes peut en général être négligée. Par contre, la végétation n'est jamais totalement couvrante, de sorte que le sol a toujours une influence importante sur le signal satellitaire. La méthode couramment utilisée pour calculer la réflectance d'un paysage composé de plusieurs ensembles homogènes ayant des propriétés optiques différentes est d'effectuer une moyenne des réflectances des différentes composantes du paysage, pondérées par leurs surfaces respectives. Dans le cas du Sahel, les composantes considérées sont, la végétation verte, sèche, et le sol nu. L'influence de la litière n'est pas prise en compte directement, mais intégrée dans celle du sol.

La réflectance bidirectionnelle du sol est calculée à l'aide d'un modèle dérivé de celui de Hapke (HAPKE, 1981 ; PINTY *et al.*, 1989), et validé sur des sols différents (JACQUEMOUD *et al.*, 1992). L'un des paramètres importants en entrée, l'albédo de simple diffusion est choisi pour faire coïncider le signal simulé au signal observé avant la saison de croissance, c'est-à-dire, en l'absence de végétation herbacée verte.

Le modèle retenu pour la simulation de la réflectance bidirectionnelle de la strate herbacée est le modèle SAIL (VERHOEF, 1984, 1985) qui a déjà servi dans de nombreuses études, et a été validé sur des cultures (GOEL et THOMPSON, 1984). Les paramètres décrivant la végétation sont : le LAI (exprimant la quantité de végétation présente), le LAD (exprimant la distribution verticale du feuillage dans le couvert), et les propriétés optiques des feuilles. Le modèle est utilisé séparément pour le compartiment vert et sec. L'évolution temporelle des paramètres du couvert, LAI et taux de recouvrement f_v , est fournie par le modèle STEP.

COMPARAISON DES RÉFLECTANCES SIMULÉES ET OBSERVÉES

Les données satellitaires utilisées dans cette étude sont extraites d'une base de données comprenant une série d'images acquises l'après-midi sur le degré carré d'Hapex-Sahel par le capteur AVHRR de NOAA 11 pendant une période couvrant toute la saison de croissance. Les images archivées ont déjà subi un traitement au préalable qui comprend des corrections géométriques (pour ramener les images dans un repère cartographique) et des corrections atmosphériques (diffusion par les molécules, absorption par l'ozone et la vapeur d'eau). À ce propos, il convient de préciser que les effets dus aux aérosols et à la vapeur d'eau sont très variables dans l'espace et dans le temps. Les aérosols ont dû être ignorés lors des corrections atmosphériques, tandis que la correction pour la vapeur d'eau a été faite en utilisant des simulations du Centre météorologique européen

(Reading, GB) sur une grille d'un demi degré carré de résolution. Le profil temporel du pixel correspondant au site où les simulations ont été faites est extrait de la base et subit encore deux traitements supplémentaires : les jours où le pixel est soit contaminé par les nuages (température de surface très basse) ou soit vu dans des configurations géométriques défavorables (angle zénithal solaire $> 60^\circ$ ou de visée $> 40^\circ$) sont supprimés du profil.

Comme il s'agit ici de comparer le profil temporel (des réflectances ou d'indice de végétation) observé par satellite à un profil simulé à l'aide des modèles décrits précédemment, la simulation des réflectances est effectuée avec les configurations de visée des jours retenus dans le profil. Les figures 4 et 5 montrent les profils d'indice de végétation et des réflectances, simulés (lignes tiretées) et observés (symboles). Sur le profil du NDVI, une assez bonne concordance est obtenue jusqu'aux environs du jour julien 250 qui correspond à peu près au pic du profil observé. Le pic du profil simulé intervient lui une vingtaine de jours après, et correspond plutôt au pic de biomasse simulé et mesuré. Il est clair qu'il y a ici un décalage entre le profil du NDVI observé et celui de la biomasse, et l'utilisation tel quel du profil observé peut amener à une sous-estimation importante de la biomasse produite pendant la saison.

En examinant directement les réflectances simulées et observées (figure 5), on peut relever quelques informations supplémentaires, utiles pour tenter d'expliquer les différences obtenues entre les profils NDVI. Par exemple, les différences obtenues pour les jours 233 et 234 dans les deux canaux vont dans le même sens, et pourraient être expliquées par la présence d'aérosols. Similairement, pour le jour 265, une plus grande différence dans le canal 2 par rapport au canal 1 pourrait être expliquée par une absorption plus importante dans le proche infrarouge que dans le visible. Par contre pour les jours 273 et 281, les simulations sous-estiment de manière importante les réflectances dans le visible, mais semblent convenir pour le proche infrarouge. Ces différences ne peuvent être attribuées uniquement aux aérosols ou/et à la vapeur d'eau compte tenu de leurs effets respectifs dans les deux canaux. On peut aussi noter que cette tendance est à l'origine du décalage important entre les profils de NDVI simulés et observés. Elle débute vers le jour 260 et s'accroît pendant les semaines qui suivent.

Une explication possible provient du fait qu'après le dernier jour de pluie (ici jour 258), la végétation très verdoyante perd graduellement de son éclat avant de commencer à jaunir. Cette senescence est simulée dans le modèle par le passage graduel de la biomasse d'un compartiment vert à un compartiment sec, les propriétés optiques de chaque compartiment étant fixes, alors que dans la réalité, lors du passage du vert au sec, ce sont les propriétés optiques de la végétation elles mêmes qui varient. Donc, dans l'exemple montré le contrôle des simulations du modèle de fonctionnement ne pourrait se faire en utilisant la partie descendante du profil de NDVI observé.

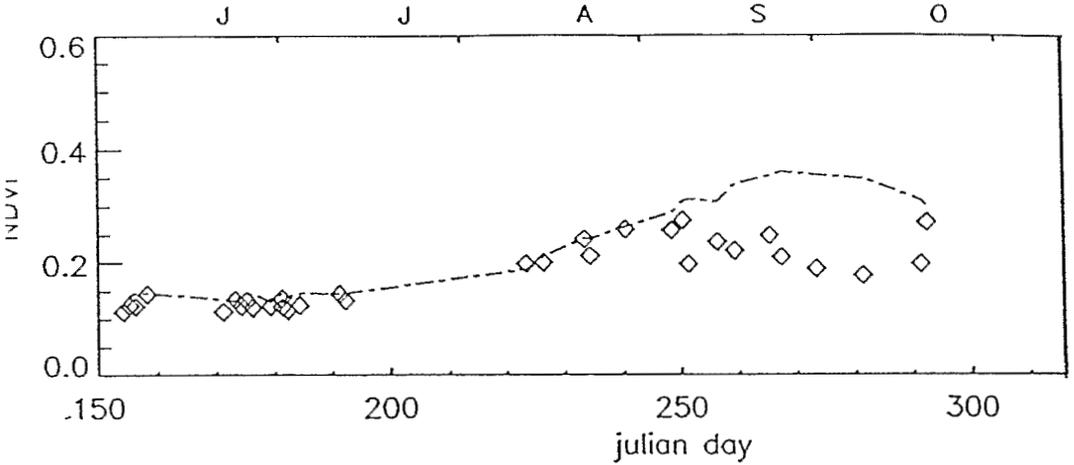


Figure 4 :
Profils temporels NDVI observé (symboles) et simulé (trait tireté).

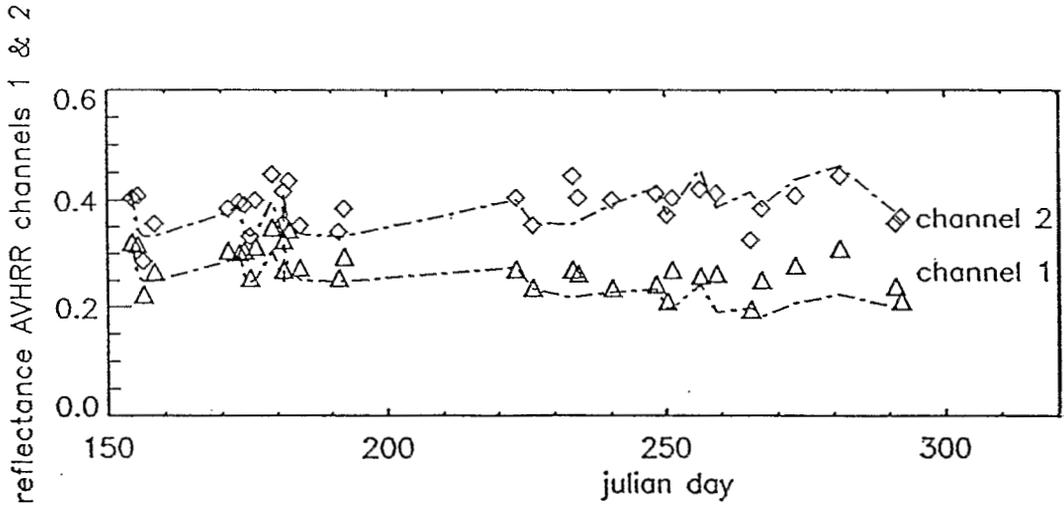


Figure 5 :
Profils temporels, réflectances VIS et PIR, observées (symboles) et simulées (traits tiretés).

CONCLUSION

Des mesures météorologiques, des relevés pluviométriques, des mesures de biomasses et des données satellitaires de la NOAA/AVHRR acquises de manière simultanée lors de l'expérience Hapex-Sahel ont constitué un jeu de données très intéressant pour étudier la possibilité d'utiliser l'information satellitaire pour contrôler les simulations d'un modèle de fonctionnement. Un modèle de réflectance adapté au paysage sahélien couplé au modèle de fonctionnement a permis de simuler pour un site choisi les profils temporels des réflectances et d'indice de végétation, pour être comparés à ceux observés par satellite. La comparaison a montré un décalage d'une vingtaine de jours entre le pic du profil NDVI observé et simulé. En examinant directement les réflectances observées et simulées, des explications possibles pour ces différences ont été proposées. En général, les différences obtenues sont probablement dues à plusieurs causes simultanées, liées à la fois aux corrections atmosphériques insuffisantes, et aux simplifications utilisées dans la modélisation qui s'avèrent parfois réductrices. Néanmoins, il est très important de pouvoir évaluer l'information utile contenue dans un produit satellitaire, et la modélisation du fonctionnement couplée aux modèles physiques peut fournir une base de réflexion assez objective.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au Jet Propulsion Laboratory sous contrat avec la National Aeronautics and Space Administration (Nasa). D. Lo Seen et A. Chehbouni ont bénéficié du support de la National Research Council.

BIBLIOGRAPHIE

- DIALLO O., DIOUF A., HANAN N.P., NDIAYE A. and PRÉVOST Y., 1991. AVHRR monitoring of savanna primary production in Senegal, West Africa : 1987-1988, *International Journal of Remote Sensing*, 12(6) : 1259-1279.
- GEL N.S., THOMPSON R.L., 1984. Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables IV : Total inversion of the SAIL model, *Remote Sensing of Environment*, 15 : 237-253.
- HAPKE B., 1981. Bidirectional reflectance spectroscopy. I. Theory, *Journal of Geophysical Research*, 86 : 3039-3054.
- JACQUEMOUD S., BARET F., HANOCQ J.F., 1992. Modeling spectral and bidirectional soil reflectance, *Remote Sensing of Environment*, 41 : 123-132.
- JUSTICE C.O., HIERNAX P.H.Y., 1991. Monitoring the grasslands of the Sahel using NOAA AVHRR data : Niger 1983, *International Journal of Remote Sensing*, 7(11) : 1475-1497.
- KUMAR M., MONTEITH J.L., 1982. Remote sensing of plant growth, in *Plants and the daylight spectrum*, Smith Ed., London Academic Press, 133-144.
- MOUGIN E., LO SEEN D., RAMBAL S., GASTON A., HIERNAX P., 1994. A regional sahelian grassland model to be coupled with satellite multispectral data. I. Validation. (submitted to *Remote Sensing of Environment*).
- PINTY B., VERSTRAETE M.M., DICKINSON R.E., 1989. A physical model for predicting bidirectional reflectances over bare soil, *Remote Sensing of Environment*, 27 : 273-288.
- PRINCE S.D., 1991. Satellite remote sensing of primary production : comparison of results for Sahelian grasslands 1981-1988, *International Journal of Remote Sensing*, 12(6) : 1313-1330.

- RAMBAL S., 1980. Modélisation de l'utilisation de l'eau et de la production végétale d'une steppe à *Rhanterium Suaveolens Desf.* de la zone aride sud Tunisienne, Thèse Docteur Ingénieur, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier.
- TUCKER C.J., VANPRAET C.L., BOERWINKEL E., GASTON A., 1983. Satellite remote sensing of total dry matter accumulation in the Senegalese Sahel, *Remote Sensing of Environment*, 13 : 461-474.
- VAN KEULEN H., 1975. Simulation of water use and herbage growth in arid regions. Simulation monographs, Wageningen, Pudoc, 176 p.
- VERHOEF W., 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modelling : the SAIL model, *Remote Sensing of Environment*, 16 : 125-141.
- VERHOEF W., 1985. Earth observation modelling based on layer scattering matrices, *Remote Sensing of Environment*, 17 : 165-178.