

Marie-Françoise COUREL**
François CUQ**
Ibtissem TOUNSI**

RESUME La télédétection satellitaire associée à la modélisation agrométéorologique fournit un bilan-état des pâturages naturels sahéliens à la fin de la saison des pluies afin d'en améliorer la gestion et l'exploitation.

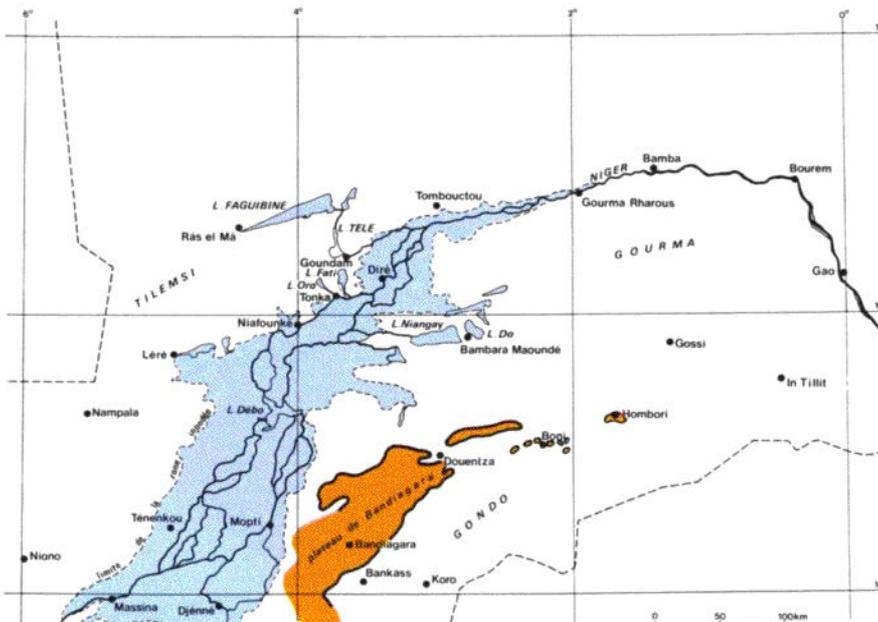
ABSTRACT Satellite remote sensing associated to agrometeorological modelling allows an evaluation of the natural Sahel pasture lands at the end of the rain season aiming at better management and utilization.

RESUMEN La teledetección satelitaria asociada con la modelización agrometeorológica proporciona un balance-estado de los pastos naturales del Sahel al final de la estación de la lluvias y permite mejorar su gestión y explotación.

• MODELISATION
• PATURAGE
• SAHEL
• TELEDETECTION

• MODELING
• PASTURE LAND
• REMOTE SENSING
• SAHEL

• MODELIZACION
• PASTO,
• SAHEL
• TELEDETECCION



L'élevage joue un rôle primordial dans l'économie des Etats sahéliens et subit depuis vingt années les conséquences d'une sécheresse caractérisée par l'extrême variabilité de la pluviométrie; ces variations s'expriment non seulement en terme de quantités d'abats pluviométriques au cours de la saison des pluies mais aussi en terme de distribution spatiale et temporelle. La répartition et la productivité des pâturages naturels dépendent en effet autant de la distribution temporelle des pluies que de leur abondance. Les pâturages sahéliens sont constitués par une steppe arbustive, le tapis herbacé étant composé en majeure partie par des graminées annuelles.

Compte tenu des conditions climatiques qui règnent dans la bande sahélienne, la production primaire au terme de la saison des pluies représente la quasi-totalité

1. Carte de localisation

* Ces travaux s'inscrivent dans le cadre d'une étude effectuée en collaboration avec le CILSS (Comité permanent Inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel)
** IMAGEO-C.N.R.S.



2a) image du 12 juillet



2b) image du 13 juillet



2c) image du 15 juillet



2d) image de synthèse

2. Synthèse des images acquises entre le 12 et le 15 juillet 1986

du stock fourrager disponible et susceptible d'être exploité tout au long de la saison sèche. Depuis 1968, les troupeaux de bovins ont été décimés à plusieurs reprises, en particulier lors des épisodes dramatiques de 1972-1973 et 1983-1984; les éleveurs furent contraints de se réfugier avec leur bêtes restantes dans les régions de savane plus au sud, afin d'en assurer la survie.

La crise climatique récente a affecté l'espace pastoral, désorganisé les activités liées à l'élevage et accéléré la sédentarisation des nomades. Ces nouvelles contraintes imposent aux services nationaux de l'élevage une gestion de l'espace pastoral. Ceux-ci ont besoin de connaître avec précision la localisation des pâturages disponibles en fin de saison des pluies.

On sait l'intérêt des images satellitaires pour l'observation de l'évolution du couvert végétal. Le traitement des données du capteur AVHRR des satellites de la série NOAA permet d'effectuer le suivi de l'évolution des pâturages durant la saison des pluies et de dresser le bilan global de leur répartition en précisant leur localisation en début de saison sèche. Ces informations peuvent apporter une aide aux responsables des services de l'élevage pour l'organisa-

tion des parcours des troupeaux, lorsque la situation l'impose, et améliorer ainsi la gestion de l'espace pastoral.

Les résultats présentés rendent compte de l'évolution du tapis végétal sur les grandes régions pastorales du Mali comprises entre 0° et 6° de longitude Ouest et 14° et 18° de latitude Nord. L'étude des pâturages sahéliens vise à fournir en fin de saison des pluies une cartographie à 1/500 000 des aires pastorales et de la production de biomasse végétale associée. Ces cartes seront réalisées à l'aide d'un modèle de localisation et d'estimation de biomasses fonctionnant à partir des images AVHRR, des précipitations journalières et d'un modèle numérique de terrain. La phase d'exploitation de l'étude prendra la forme d'une chaîne de traitement des données en temps réel reliée à la station de réception NOAA/AVHRR implantée au centre AGRHYMET de Niamey.

Le traitement des images AVHRR

Le suivi de l'évolution du couvert végétal sahélien nécessite le traitement de l'ensemble des images acquises par les satellites NOAA durant la saison des pluies, soit environ

une douzaine d'images par mois et par satellite. Les résultats du traitement de 33 images NOAA-09 acquises entre le 1^{er} juillet et le 30 septembre 1986 sont présentés ici. Les traitements comportent quatre étapes: la correction en éclairage, la rectification géométrique, la synthèse d'images et l'extraction des produits d'image.

La correction en éclairage

Après avoir calibré les valeurs de luminance à l'aide des paramètres fournis par la NOAA afin de compenser la dérive optique des capteurs, on estime la valeur de l'éclairage et la position du Soleil au moment de l'enregistrement; on corrige ensuite les données des variations de l'angle d'éclairage liées au balayage du miroir. La correction ne tient pas compte des effets d'ombre liés à la topographie; elle garantit cependant un étalonnage interne de l'image et la normalisation inter-image de l'éclairage.

La rectification géométrique

Une méthode de rectification par positionnement d'image a été préférée à une méthode polynomiale, car le couvert nuageux pendant la saison des pluies rend très difficile le repérage d'un nombre suffisant de points d'appui. En effet, pour utiliser un polynôme de degré 4, il faut disposer d'au moins 24 points de contrôle, ce qui est pratiquement impossible. La méthode de positionnement employée est fondée sur l'utilisation des caractéristiques orbitales des satellites NOAA et fournit une localisation de chaque pixel en coordonnées géographiques. Les paramètres de l'orbite NOAA utilisés pour la correction sont l'inclinaison, l'altitude et la vitesse de défilement. Les variables introduites pour chaque rectification sont l'heure et la longitude du noeud ascendant. On repère ensuite sur l'image un point de localisation connue pour estimer les variations d'altitude du satellite. L'influence de ces variations est ramenée au calcul d'une nouvelle inclinaison et d'une nouvelle altitude. Cette méthode fournit une rectification au pixel près.

La synthèse d'images

Afin d'obtenir une image dépourvue de nuages, on effectue une synthèse regroupant trois ou quatre jours d'acquisition successifs. Le principe utilisé est le suivant: pour chaque série d'images, on retient les valeurs de luminance des bandes AVHRR 1 et 2 repérées par le maximum local de température sur sol nu ou par le maximum de l'indice de végétation sur couvert végétal. Les résultats se présentent sous la forme d'images équivalentes-AVHRR pour la période considérée. La figure 2 montre la composition colorée des bandes 1 et 2 des résultats de la synthèse opérée sur les images des 12, 13 et 15 juillet 1986. La synthèse d'images permet de supprimer la majeure partie du couvert nuageux. Cependant, elle n'élimine pas les autres perturbations atmosphériques.

Le calcul des indices de végétation

On a calculé les indices de végétation des dix images de synthèse de la saison des pluies 1986. Ces indices fournissent une estimation de la densité du couvert végétal et de

son activité chlorophyllienne. La formule utilisée reprend celle du NDVI de C.J. Tucker ((AVHRR2-AVHRR1)/(AVHRR2+AVHRR1)).

Les images d'indice de végétation

Les images d'indice de végétation décrivent la localisation des pâturages et facilitent leur suivi. Ils fondent, en outre, l'estimation des stades phénologiques des formations végétales et permettent le calage des modèles agrométéorologiques. La figure 3 présente, en quatre classifications, l'évolution du couvert végétal et de son activité chlorophyllienne durant la saison des pluies 1986. La légende utilisée traduit, du vert clair au vert foncé, la densité et l'activité chlorophyllienne croissantes des formations végétales. Le dégradé de gris indique, du plus foncé au plus clair, la brillance des sols nus.

L'image du 5 juillet (fig. 3a)

La végétation active est limitée à la région du Gondo au sud du plateau de Bandiagara. L'extension de la surface couverte et la densité du tapis herbacé dans ce secteur pastoral sont liées à l'exceptionnelle abondance et à la bonne répartition des pluies durant le mois de juin. On peut noter aussi un début de recouvrement du secteur dunaire au nord de Hombori. Dans le haut de l'image, les taches de végétation correspondent aux cultures de décrues (mil, maïs) en pleine maturité en cette période de l'année. La pelouse à Cypéracées, les *Sesbania* et les *Cynodons* en particulier, végétation spontanée à recouvrement important, s'installent avec le retrait progressif des eaux à l'intérieur des cuvettes lacustres (Oro, Télé, Faguibine) et participent aussi à la réponse élevée dans ces secteurs. La végétation du lac Faguibine coïncide précisément avec la limite de l'inondation de 1985-1986.

L'image du 24 juillet (fig. 3b)

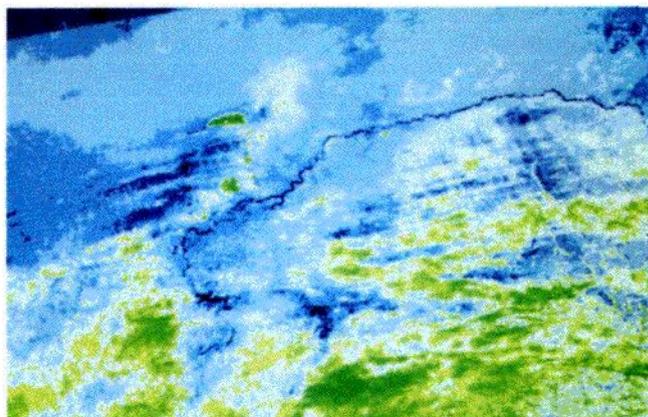
On note une extension des pâturages dans la région de Hombori tandis qu'apparaissent dans la région de Gossi et de Gao quelques taches de végétation. Les secteurs sableux de Léré sont partiellement couverts et on enregistre une bonne progression dans les régions de Niono, dans l'ouest du Macina et dans le Gondo. Les régions de Nampala, du Tilemsi, du lac Faguibine, de Tombouctou et toutes les zones pastorales de part et d'autre de la vallée du Niger sont toujours dépourvues de végétation à la fin du mois de juillet. Cette situation est déjà alarmante.

L'image du 11 août (fig. 3c)

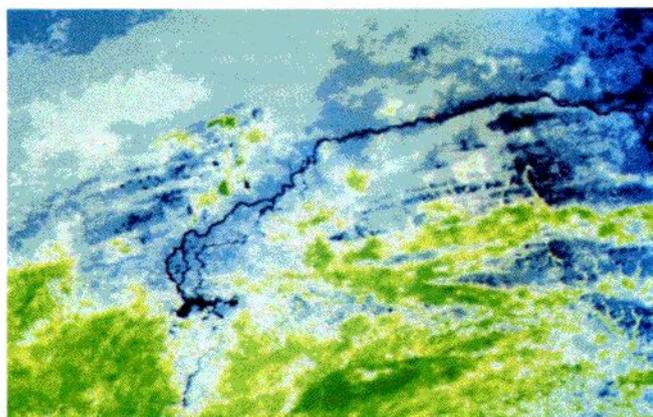
A la mi-août, si la situation générale des pâturages s'est largement améliorée au sud de la ligne joignant Gao à Léré, la situation apparaît catastrophique au nord. Seules quelques petites plages de végétation apparaissent vers Léré, Niafouké et Ràs-el-Mà. On note déjà une légère baisse des valeurs de l'indice de végétation dans la région de Gao et une absence totale de pâturages dans le Gourma et sur les bordures du fleuve Niger.



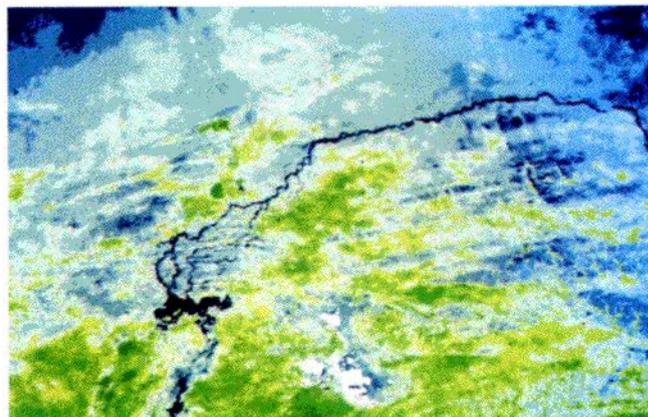
3a) indice de végétation du 5 juillet



3b) indice de végétation du 24 juillet



3c) indice de végétation du 11 août



3d) indice de végétation du 27 septembre

3. Evolution de la végétation au cours de la saison des pluies

L'image du 27 septembre (fig. 3d)

En fin de saison des pluies, il apparaît clairement que les régions de Gao, du Gourma central et septentrional, de Tombouctou et du lac Faguibine ne pourront assurer l'alimentation du bétail durant les mois de saison sèche, et qu'il faut s'attendre à des déplacements importants de troupeaux. On observe sur l'ensemble de l'image la diminution des valeurs de l'indice de végétation liée au début du dessèchement des pâturages, alors que dans les régions cultivées, il atteint les valeurs les plus élevées comme dans la région de Bankass. On note aussi sur cette image la progression de la crue du Niger: la région de Mopti est inondée et le lac Débo est plein. Les prairies du delta du Niger, tributaires de l'extension des surfaces inondées, ne se développeront qu'avec le retrait progressif des eaux. C'est la raison pour laquelle cette région apparaît toujours en gris sur l'image du 27 septembre.

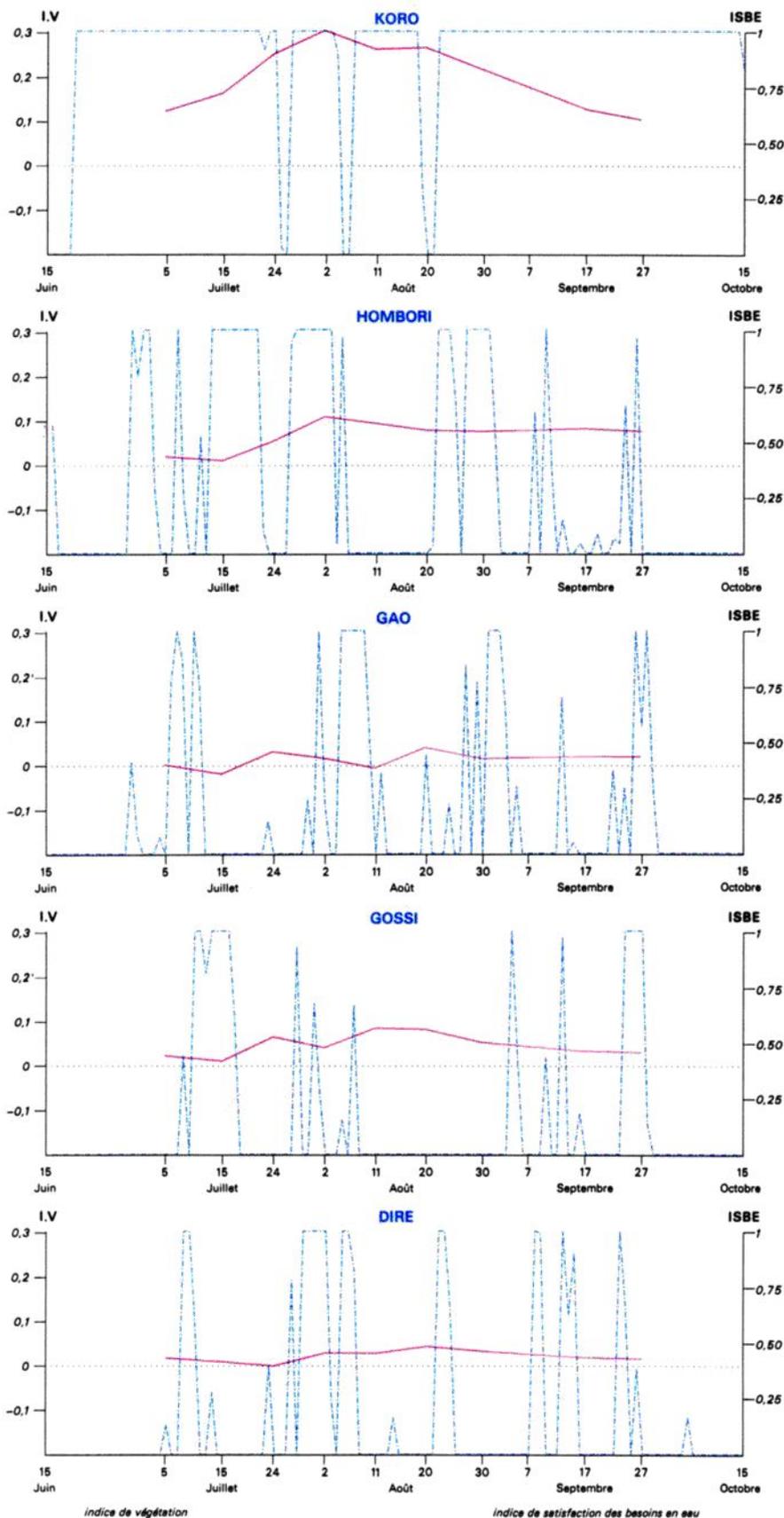
L'indice de végétation est d'un concours précieux pour préciser la localisation des pâturages et rendre compte très rapidement des problèmes liés à la répartition spatio-temporelle inégale des précipitations. Cependant, est-il possible, à l'aide de ces seules images, d'estimer la quantité de

biomasse végétale afin de gérer au mieux la répartition et les parcours des troupeaux? La réponse est négative. En effet, le satellite fournit une image du toit de la végétation, et non de son épaisseur. Tout au plus, peut-on tenter une estimation liée à la durée des phases de végétation active détectées par l'indice de végétation. Pour aller plus loin, il est nécessaire de tenir compte des précipitations quotidiennes relevées par les stations sahéliennes, et de tenter une simulation fondée sur la connaissance des conditions agrométéorologiques du milieu.

La modélisation agrométéorologique

Les modèles agrométéorologiques actuels sont développés pour prévoir le bilan des récoltes et offrir aux cultivateurs sahéliens un service d'«alerte aux semis». Ces modèles fonctionnent pour des conditions représentatives d'une parcelle cultivée. De Witt propose une formule générale qui résume l'ensemble des paramètres nécessaires à l'estimation de la biomasse: $P = M.W.Eo$ où

- P est la production totale de la biomasse en Kg de matière sèche,



indice de végétation

indice de satisfaction des besoins en eau

- M est le facteur représentant l'utilisation en eau des plantes,
- W représente la perte en eau des plantes en kg, soit l'évapotranspiration,
- Eo est la moyenne journalière de l'évaporation de l'eau libre.

Une première évaluation de la production d'une formation végétale consiste à estimer la satisfaction des besoins en eau (ISBE), l'eau étant le principal facteur limitant en zone sahélienne.

Nous souhaitons établir une méthode simple et précise visant à évaluer la satisfaction des besoins en eau d'une jachère d'herbe représentative des milieux pastoraux. Les étapes essentielles de cette détermination reposent sur les principes suivants: l'évaluation de l'eau utile (EU), l'évaluation de l'évapotranspiration réelle de la formation végétale (ETR), et l'évaluation de l'évapotranspiration maximale (ETM).

Evaluation de l'eau utile

L'évaluation de l'eau utile repose sur la connaissance des précipitations journalières, seule variable d'entrée du modèle. A partir des valeurs enregistrées par les stations, il faut tenir compte des caractéristiques du réservoir-sol. La majeure partie des pâturages étant sur substrat sableux, nous ne simulons, dans l'état actuel du modèle, que les mécanismes d'écoulement de l'eau en milieu dunaire. On peut donc distinguer, suivant la position topographique du point étudié, les phénomènes d'infiltration, de concentration ou de résurgence à mi-pente, qui permettent d'estimer la quantité d'eau disponible pour le système racinaire. Cette simulation repose sur l'utilisation d'un modèle numé-

4. Indice de végétation et indice de satisfaction des besoins en eau pour les secteurs de Koro, Hombori, Gao, Gossi et Dire

rique de terrain constitué à partir de la cartographie au 1/200 000 de l'I.G.N.

Evaluation de l'évapotranspiration réelle

L'évapotranspiration réelle représente l'ensemble de l'eau évaporée par la plante et le sol selon le stade phénologique. Les différents modèles agrométéorologiques calculent la valeur de l'évapotranspiration réelle à partir de l'évapotranspiration potentielle et de l'humidité relative du sol (HR), à l'aide de la relation empirique établie par Eaganman.

Evaluation de l'évapotranspiration maximale

L'évapotranspiration maximale est rapportée à l'évaporation de l'eau en bac normalisé "classe A" en utilisant un coefficient cultural (K'), indicateur du rapport de consommation en eau de la plante au cours du cycle de végétation. A partir de l'évaluation de ces paramètres, on peut déduire le rapport ETR/ETM qui représente un indice de satisfaction des besoins en eau de la plante (ISBE). Il est alors possible de comparer cet indice à l'indice de végétation pour étudier les relations entre la modélisation et les images satellitaires.

Relations entre l'indice de végétation et les besoins en eau

La figure 4 présente la relation entre l'indice de végétation (IV) calculé à partir des images NOAA et l'indice de satisfaction des besoins en eau (ISBE) d'une jachère d'herbe obtenu à l'aide du modèle. Les cas présentés concernent de petits secteurs proches des stations de Gossi, Hombori, Gao, Diré et Koro, pour lesquels on dispose de données pluviométriques journalières. On constate dans tous les cas, une relation étroite entre l'indice de végétation et l'indice

de satisfaction des besoins en eau. Pour Gao, Diré et Gossi, la satisfaction des besoins en eau n'est assurée que sur de très courtes périodes. L'indice de végétation réagit avec un décalage de quelques jours, nécessaires à l'établissement et à la croissance de la végétation. Il n'atteint jamais la valeur 0,1. Pour la station de Koro, les besoins en eau sont satisfaits sur l'ensemble de la saison des pluies. La valeur de l'indice de végétation, déjà élevée au début du mois de juillet en raison des fortes précipitations relevées en juin, augmente jusqu'à la fin juillet puis se maintient à un niveau élevé (0,3) pendant près de 30 jours. Après le 20 août, la décroissance de l'indice de végétation indique le début du dessèchement de la végétation herbacée. L'allure de la courbe rend compte des différents stades phénologiques du couvert herbacé: croissance, activité chlorophyllienne maximale et amorçe du dessèchement. Les autres stations présentent des situations caractéristiques du déficit quantitatif et de la mauvaise répartition spatiale et temporelle des pluies.

Conclusion

La méthode présentée associe télédétection satellitaire et modélisation du comportement de la couverture herbacée des milieux pastoraux sahéliens afin de localiser les aires pastorales et d'estimer sur l'ensemble d'une région la productivité de la biomasse. Celle-ci représente, en effet, le stock fourrager nécessaire à l'entretien des troupeaux durant la saison sèche. La combinaison des méthodes renseigne sur l'extension du tapis végétal et, grâce au repérage des grandes phases phénologiques, sur la production végétale. Le suivi de l'évolution des pâturages effectué en temps réel durant la saison des pluies et l'établissement d'une cartographie au 1/500 000 fourniront les éléments nécessaires à la gestion des espaces pastoraux sahéliens.

Références bibliographiques

- ASEM A., 1986, *Etude des données satellitaires multispectrales multisources: application au bilan énergétique*, Paris, Thèse de doctorat d'Etat, Université Paris Sud, Centre Scientifique IBM-France.
- BRUNEL P. et MARSOUIN A., 1986, *Positionnement géographique des images AVHRR des satellites NOAA-SATMOS*, Lannion, Centre de Météorologie Spatiale.
- COUREL M.F., 1985, *Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites*, Paris, Thèse de doctorat d'Etat, Université Paris I, publié par le Centre Scientifique IBM-France, 407 p..
- EAGLEMAN J.R., 1971, «An experimentally derived model for actual evapotranspiration» *Agric. Meteorology*, 8, pp. 4-5.
- FOREST F., 1984, *Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales*, Montpellier, CIRAD.
- TANRE D., DEROO C., DUHAUT P., HERMAN M., MORCLETTE J.J., PERBOS J., et DESCHAMPS P.Y., 1986, *Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (5S)*, Lille, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Université des Sciences et Techniques.
- TUCKER C.J., 1982, «Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation», *Remote Sens. of Env.*, 8, New-York, pp. 127-150.
- WITT C.T. de, 1982, «Simulation of living system», in *Simulation of plant growth and crop production*, par F.W.T. PENNING DE VRIES and H. H. VAN LAAR, Wageningen, PUDOC.