

Relations indices de végétation–pluie au Burkina Faso: cas du bassin versant du Nakambé

PIERRE DIELO¹, GIL MAHE²,
JEAN-EMMANUEL PATUREL², ALAIN DEZETTER²,
FRANÇOIS DELCLAUX², ERIC SERVAT² &
FREDERIC OUATTARA³

¹ Institut de Recherche pour le Développement, 01 BP 182, Ouagadougou 01, Burkina Faso
bonadiel@yahoo.com

² Hydrosiences Montpellier, case MSE, Université de Montpellier 2,
F-34095 Montpellier Cedex 5, France

³ Directeur de la Météorologie Nationale, 01 BP 576 Ouagadougou, Burkina Faso

Résumé Ce travail s'inscrit dans la problématique de l'utilisation des données issues de la télédétection (NDVI/NOAA-AVHRR) pour le suivi de la variabilité climatique des régions sahéliennes d'Afrique de l'Ouest. Les indices de végétation sont largement utilisés dans les recherches en hydrologie, en climatologie et sur les changements climatiques globaux. Les relations entre les NDVI et les paramètres climatiques ne sont pas encore parfaitement établies et font l'objet de nombreuses études. Celle-ci s'intéresse à la relation entre les NDVI et la pluie au pas de temps décennaire sur le bassin versant du Nakambé au Burkina Faso en climat soudano-sahélien sur la période 1982–1999. Une forte corrélation dans l'évolution annuelle des deux variables a été mise en évidence. L'analyse statistique montre une liaison significative entre le NDVI et le cumul pluviométrique avec des coefficients de détermination supérieurs à 0.80. Ces valeurs vont de 0.91 à 0.96 lorsque les deux variables sont rapportées à l'échelle spatiale du demi-degré carré. On montre également que le NDVI est un bon indicateur pour la détermination des décades de début et de fin de la saison pluvieuse en comparaison avec les méthodes classiques de détermination couramment utilisées dans la zone d'étude.

Mots clefs Burkina Faso; indices de végétation; NDVI-AVHRR; pluie; saison des pluies; variabilité climatique

Relationship between rainfall and vegetation indexes in Burkina Faso: a case study of the Nakambé basin

Abstract This work deals with the problem of the use of remote sensing data derived from NOAA/AVHRR observations for monitoring the West African Sahel climatic variability. NDVI is widely used in hydrological and climatological research, and in the study of global climatic changes. The relationships between NDVI and climatic parameters are not well established yet and are the focus of many studies. The relationships between NDVI and rainfall were studied at a 10-day time step in the Nakambe River basin in Burkina Faso in the Sahelo-Sudanian area over the years 1982–1999. Good correlations were found in the annual evolution of these two variables. The statistical analysis shows a significant relationship between NDVI and the sum of the annual rainfall with determination coefficients greater than 0.80. At the spatial scale of $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, the determination coefficient ranges from 0.91 to 0.96. It was also found that the NDVI is a good indicator of the determination of the beginning and the end of the rainy season. It gives reasonably good results in comparison with the other methods commonly used in the study region.

Key words Burkina Faso; vegetation indices; NDVI-AVHRR; rainfall; rainy season; climatic variability

INTRODUCTION

La pluviométrie est le principal facteur limitant de l'écologie des milieux arides et semi-arides. En Afrique de l'Ouest, ces régions se caractérisent par une très grande

variabilité spatiale et temporelle des pluies et connaissent depuis les années 1970 une baisse importante des totaux pluviométriques annuels (Paturel *et al.*, 1998; Taupin *et al.*, 1998; Mahé *et al.*, 1999; Nicholson *et al.*, 1999; Ardoin *et al.*, 2003). La faiblesse des quantités précipitées annuellement et leur mauvaise répartition dans le temps et dans l'espace contribuent considérablement à la fragilisation de l'environnement de ces écosystèmes. Dans ces milieux, l'évolution de la végétation naturelle et les rendements des cultures sont fortement dépendants de la disponibilité en eau au cours de l'année. Le suivi régulier de la pluviométrie est donc indispensable pour la mise en place de dispositifs efficaces de prévision et de gestion des ressources en eau. Cependant, le caractère ponctuel des mesures aux postes pluviométriques, les nombreuses lacunes dans les séries d'observations et la faible densité des réseaux (de 1 à 5 postes pour 10 000 km²) ne permettent pas de caractériser avec précision les régimes pluviométriques ou d'obtenir des estimations fiables de la pluie moyenne sur des surfaces relativement grandes (Taupin, 2003). Une démarche vers la résolution de ces difficultés est le recours aux satellites d'observation de la terre. Ces derniers ne permettent pas une mesure directe la pluie (Guillot, 1995) mais ont l'avantage de pouvoir fournir des données continues dans l'espace, régulières dans le temps et aisément disponibles. Une hypothèse est que l'activité photosynthétique de la végétation pourrait contribuer à estimer les précipitations (Tucker & Choudhury, 1987). Or, les données d'indice de végétation, en particulier les NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), caractérisent bien cette activité au niveau des plantes et représentent de bons indicateurs pour le suivi de l'état du couvert végétal (Tucker & Gatlin, 1984; Justice *et al.*, 1986; Batista *et al.*, 1997; Schmidt & Karnieli, 2000; Maselli & Rembold, 2002; Weiss *et al.*, 2004). Ce type de données pourrait donc aider à l'amélioration de la connaissance des systèmes pluvieux, surtout dans les zones arides et semi-arides où la réponse de la végétation à la pluie est systématique (Scanlon *et al.*, 2002). Cette méthode indirecte d'estimation de la pluie à l'aide des données NDVI nécessite néanmoins de pouvoir expliciter les relations entre les deux paramètres. Ces dernières ne sont pas encore parfaitement établies et ont fait l'objet de nombreuses études (Hielkema *et al.*, 1986; Kerr *et al.*, 1989; Malo & Nicholson, 1989; Eklundh, 1998; Richard & Pocard, 1998; Wang *et al.*, 2001, 2003). Cette étude s'intéresse à la même problématique au pas de temps de la décade. De plus, elle explore l'adéquation entre l'information à caractère spatial qu'est le NDVI et celle à caractère ponctuel que représente la pluie. Les données d'indice de végétation sont ensuite utilisées pour déterminer les dates de début et de fin de saison pluvieuse dans la zone étudiée.

CADRE D'ETUDE

Le cadre géographique de l'étude est le bassin versant du fleuve Nakambé (Volta Blanche) au Burkina Faso. Sa superficie à sa sortie du Territoire Burkinabé est de 41 407 km² avec une altitude moyenne de 270 m (Fig. 1). Deux types de climats co-existent sur le bassin:

- un climat de type sahélien au nord avec des précipitations annuelles inférieures à 600 mm, réparties de juin à septembre. Les températures moyennes maximales journalières sont de 43°C en avril contre 14°C pour les minimales en janvier.

L'évaporation annuelle sur eau libre y est de 4800 mm.

- du centre au sud du bassin on trouve un climat de type soudano-sahélien avec des précipitations annuelles comprises entre 600 et 900 mm, de mai à septembre. Les températures moyennes maximales journalières sont supérieures à 30°C et les minimales inférieures à 15°C. L'évaporation annuelle est de 2600 mm sur eau libre.

Le couvert végétal dans le nord du bassin du Nakambé est dans un état de dégradation avancé. On observe sur le bassin un fort déséquilibre entre la capacité de charge des écosystèmes naturels et leur intensité d'utilisation (Hien *et al.*, 1996).

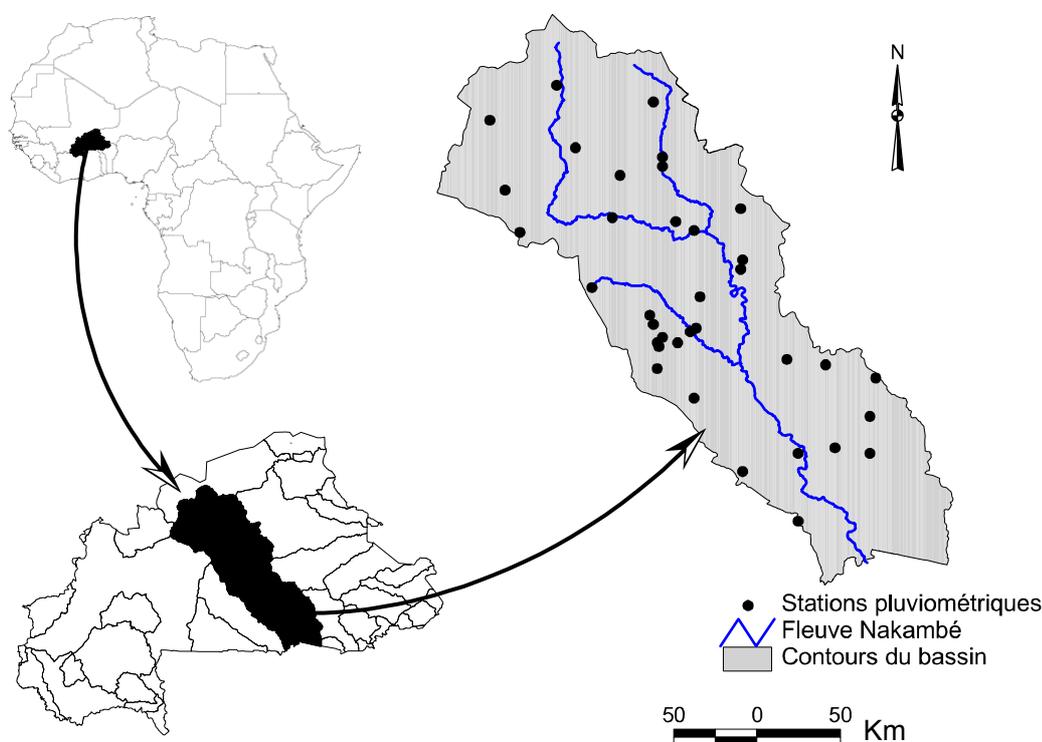


Fig. 1 Bassin versant du Nakambé.

LES DONNEES

Deux types de données ont été utilisés: les données pluie et les données NDVI. Les données pluie sont issues des 36 stations pluviométriques sélectionnées sur le bassin. Elles proviennent de la banque de données de la Météorologie Nationale du Burkina Faso et couvrent la période 1982–1999.

Les données NDVI, sont fournies par la NOAA et sont disponibles sur son site (<http://www.ngdc.noaa.gov>). Les données sont transmises en temps réel par le satellite NOAA au format HRPT (*High Resolution Picture Transmission*) via le capteur AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*). La chaîne de traitement pour produire les données NDVI est réalisée par l'outil Pathfinder développé par la NOAA et l'IGBP (*International Geosphere–Biosphere Programme*). Les indices de végétation sont calculés à partir des données GAC (*Global Area Coverage*) obtenues par ré-

échantillonnage des données transmises en temps réel et en pleine résolution par le satellite (taille du pixel au nadir: 1.1 km). Seulement une ligne de scan sur trois est utilisée et sur cette ligne les quatre premiers pixels de chaque groupe de cinq sont pris en compte pour le calcul d'une moyenne qui est ensuite attribuée à l'ensemble des 15 pixels. On recrée ainsi une image d'une résolution d'environ 4 km dont une partie de l'information (11 pixels sur 15) a disparu. Ces données GAC subissent par la suite un nouveau ré-échantillonnage dit temporel qui consiste à retenir la valeur maximale du NDVI pour chaque décade et sur chaque ensemble de quatre pixels GAC: c'est la technique du *Maximum Value Composite* (MVC). Un pixel NDVI correspond donc à une surface d'environ 64 km², à laquelle on affecte une valeur mesurée réellement sur une surface de 4 km² environ!

METHODOLOGIE

Organisation des données

Le problème de l'adéquation entre une information à caractère très localisé (la pluviométrie mesurée en un point) et une autre à caractère spatialisé (le NDVI mesuré sur une surface unitaire de 8 × 8 km²) nous a amenés à aborder le problème de deux façons différentes:

- (a) Nous avons considéré le fait que l'information pluviométrique n'a un caractère représentatif qu'autour du pluviomètre. Ainsi, des "aires d'influence" régulières carrées, de différentes dimensions—8 × 8 km², 16 × 16 km² et 24 × 24 km²—ont été définies autour de chaque station pluviométrique du bassin. A ces aires, sont attribuées, pour chaque décade, trois valeurs de NDVI: la valeur minimale, moyenne et maximale de l'ensemble des pixels qui y sont contenus totalement ou partiellement. Les pixels partiellement contenus dans une maille sont considérés comme faisant partie de la maille.
- (b) Le bassin a ensuite été découpé en mailles régulières de 0.5 degré carré, correspondant approximativement à une surface de 50 × 50 km² (Fig. 2). La pluie a été interpolée par krigeage sur chacune des mailles. De la même manière que précédemment, nous avons attribué à ces mailles les valeurs minimale, moyenne et maximale des pixels de NDVI qui y sont contenus totalement ou partiellement.

Des séries concomitantes de pluie et d'indice NDVI au pas de temps décadaire ont ainsi été réalisées.

Variations temporelles du NDVI et de la pluie

Une méthode graphique a été utilisée pour étudier les variations temporelles des indices de végétation et de la pluie sur le bassin. Pour chaque année de la série de données, nous reportons sur un même graphique, en abscisse les décades, en ordonnée les valeurs de pluie décadaire (ou cumulée), et en ordonnée secondaire les valeurs de NDVI (valeurs minimale, moyenne et maximale). Une telle représentation permet une étude comparative de l'évolution des deux paramètres aux échelles annuelle et inter-annuelle.

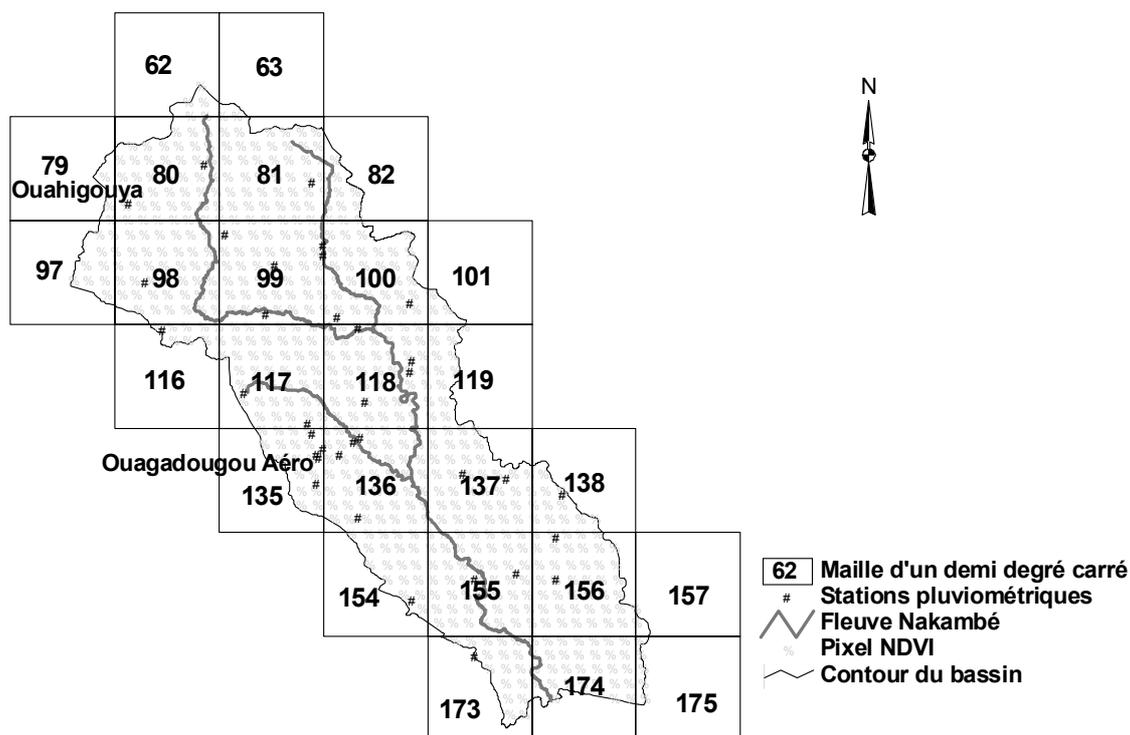


Fig. 2 Découpage du bassin du Nakambé en mailles d'un demi-degré carré et numéro des mailles.

Corrélation statistique entre le NDVI et la pluie

Seules les données pluie et NDVI des décades 12 à 30 (de mai à octobre) ont été prises en compte. Ce choix se justifie par le fait qu'avant la décade 12 de l'année, les rares pluies enregistrées sur la zone d'étude ne sont pas véritablement celles de la saison pluvieuse. Elles sont communément appelées "pluies des mangues" et ne permettent pas au couvert végétal de reverdir. A titre indicatif, sur la période d'étude, la moyenne du cumul pluviométrique des décades 1 à 11 est de 13 mm dans la partie nord du bassin (soit environ 1 mm par décade) et 32 mm au sud (soit 3 mm par décade).

Après la décade 30, il n'y a pratiquement plus de pluie sur le bassin (on enregistre en moyenne une hauteur totale de moins de 1 mm sur le bassin).

Cependant, le calcul des cumuls pluviométriques pour chaque année commence à partir de la décade 12 à laquelle on affecte le total pluviométrique enregistré depuis le début de l'année. On respecte ainsi la valeur du total annuel de pluie dans les calculs statistiques.

Les données des 36 stations pluviométriques du bassin ont été réparties en deux groupes selon leur appartenance à l'une des deux bandes climatiques de la région étudiée (13 stations en zone sahélienne et 23 en zone soudano-sahélienne). Les corrélations statistiques suivantes ont été étudiées séparément dans chaque région climatique:

- (a) corrélation entre les NDVI, mesurés sur les différentes aires d'influence des stations pluviométriques, et la pluie cumulée en ces stations pour une décade donnée; et

- (b) corrélation entre les NDVI, moyennés par demi-degré carré, et la pluie spatialisée à la même résolution.

Détermination des dates de début et de fin de saison pluvieuse à l'aide des données d'indice de végétation

Pour tenter de caractériser la saison des pluies à l'aide des données d'indices de végétation, nous faisons l'hypothèse que l'activité chlorophyllienne des plantes s'accroît pendant toute la durée de la saison, ce qui se traduit par une augmentation des valeurs d'indice de végétation. On a un maximum d'activité au cœur de la saison pluvieuse, puis, les valeurs d'indice de végétation diminuent progressivement dès la fin de l'hivernage, et sont de plus en plus faibles au fur et à mesure que la saison sèche s'installe. Ainsi, pour chaque station pluviométrique du bassin, on relève parallèlement sur les courbes d'évolution du NDVI et de la pluie cumulée:

- (a) la valeur d'indice de végétation à partir de laquelle on a une croissance continue du NDVI sur au moins trois décades successives ($NDVI_{seuil}$), la décade et le cumul de pluie qui correspondent à ce seuil (la décade correspondante au $NDVI_{seuil}$ est assimilée à la décade de début de la saison pluvieuse); et
- (b) le maximum de NDVI atteint ($NDVI_{max}$), la décade et le cumul pluviométrique correspondants (la décade correspondante au $NDVI_{max}$ est assimilée à la décade de fin de la saison pluvieuse).

Les décades du $NDVI_{seuil}$ et du $NDVI_{max}$ sont comparées aux décades de démarrage et de fin de la saison des pluies obtenues à partir de trois méthodes de détermination couramment utilisées au Sahel à savoir: la méthode graphique (Cres, 2003); les méthodes INERA-ICRISAT et ATLAS citées par Diallo (2001).

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Similitude d'évolution entre le NDVI et la pluie

L'examen général des courbes des Figs 3–6 montre qu'au cours de l'année, l'évolution du NDVI suit une courbe en cloche avec une variabilité plus ou moins marquée selon les années. Cette variabilité peut être liée:

- aux facteurs météorologiques et agropédologiques du milieu qui sont déterminants dans le cycle de croissance des plantes et donc de la variation de l'intensité de l'activité chlorophyllienne mesurée par le NDVI;
- au rythme et à la distribution des pluies au cours de l'année. En effet, en zone sahélienne et soudano-sahélienne, la pluie est le principal facteur limitant pour les plantes. La végétation reverdit systématiquement à chaque regain d'activité de la mousson avec des pluies à fort pouvoir d'humectation du sol. Inversement, l'état de la végétation se dégrade rapidement pendant les périodes sans pluies. Ce sont ces variations dans le régime des pluies qui sont reproduites par le NDVI. Plus le régime est irrégulier au cours de l'année, plus l'évolution des indices de végétation est irrégulière. C'est le cas des années 1983, 1987, 1991 et 1995 comparées à l'année 1996 (Figs 3 et 4).

NDVI-pluie décadaire station de Ouahigouya zone carrée de 24 km x 24 km période 1982-1999

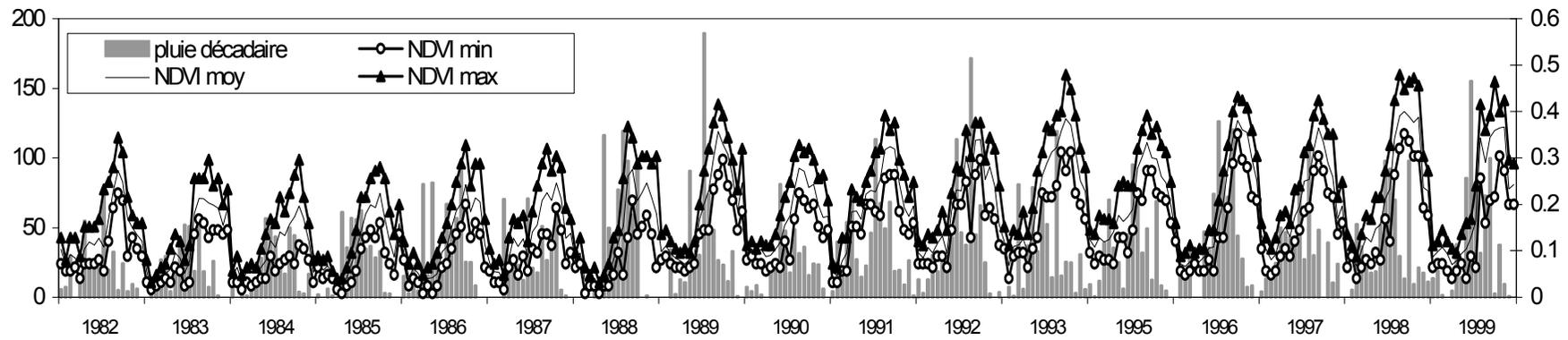


Fig. 3 Evolution interannuelle du NDVI et de la pluie décadaire pour la station de Ouahigouya.

NDVI-pluie cumulée Station de Ouahigouya Zone carrée de 24 km x 24 km période 1982-1999

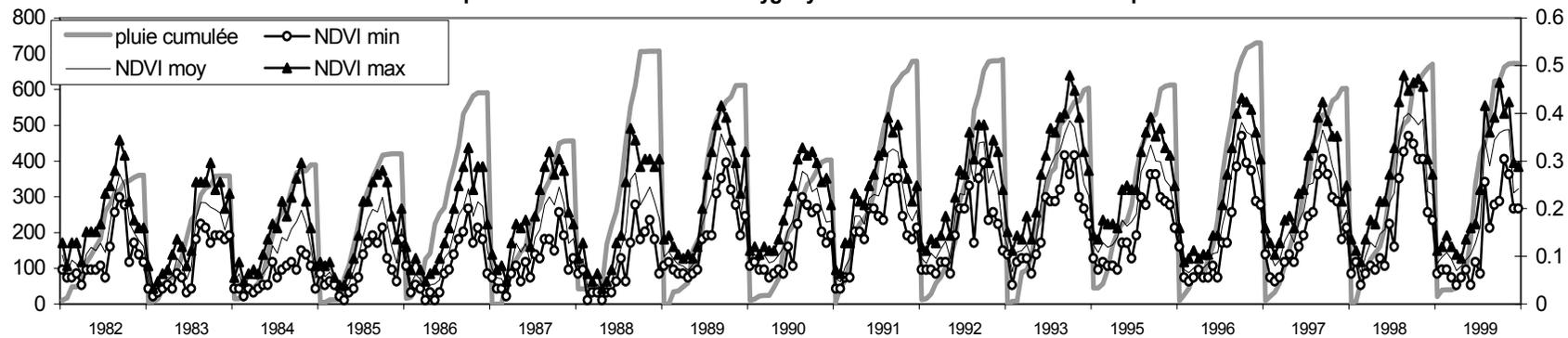


Fig. 4 Evolution interannuelle du NDVI et de la pluie cumulée pour la station de Ouahigouya.

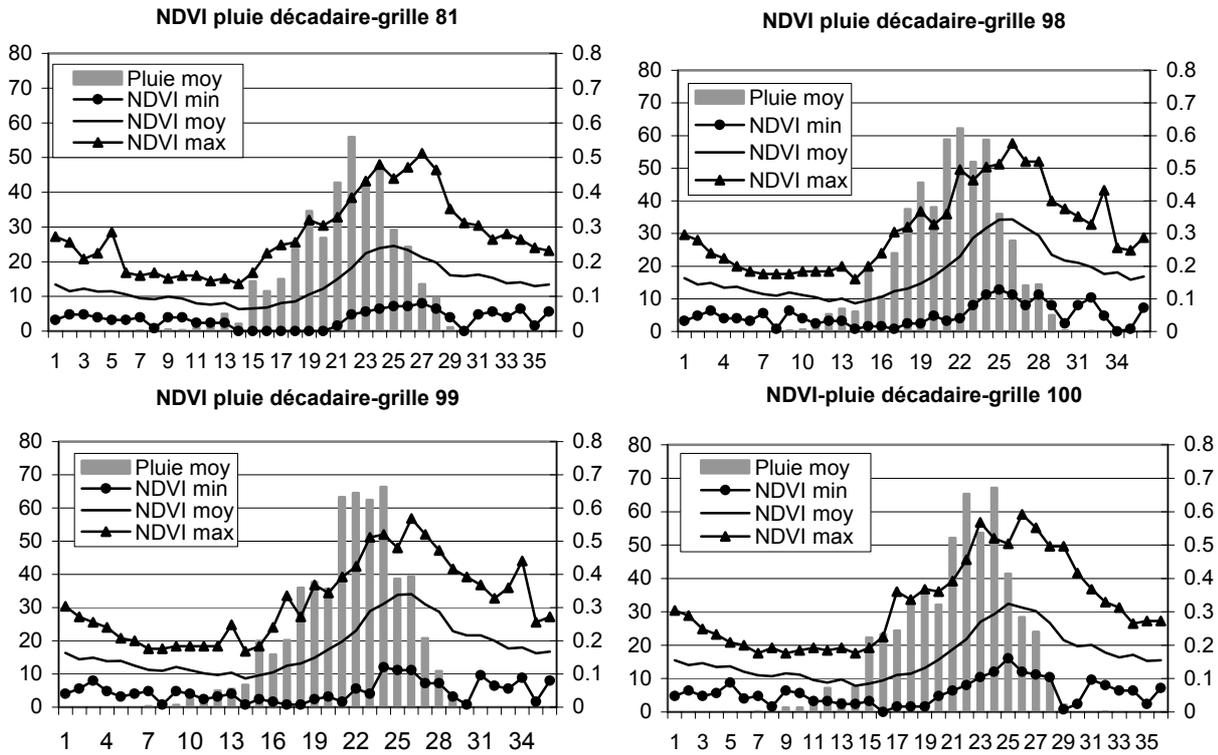


Fig. 5 Evolution moyenne inter-annuelle du NDVI et de la pluie spatialisée sur quatre mailles du secteur sahélien du bassin sur la période 1982-1999 (voir Fig. 2 pour les grilles).

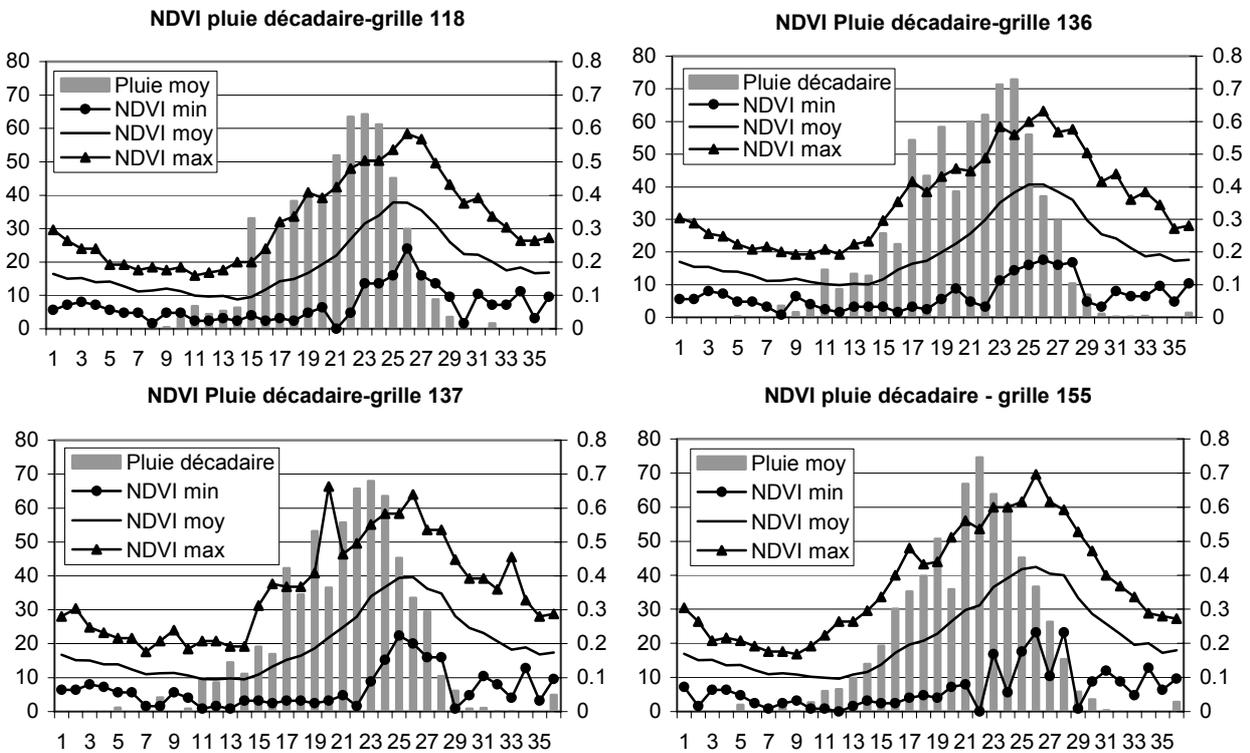


Fig. 6 Evolution moyenne inter-annuelle du NDVI et de la pluie spatialisée sur quatre mailles du secteur soudano-sahélien du bassin sur la période 1982-1999 (voir Fig. 2 pour les grilles).

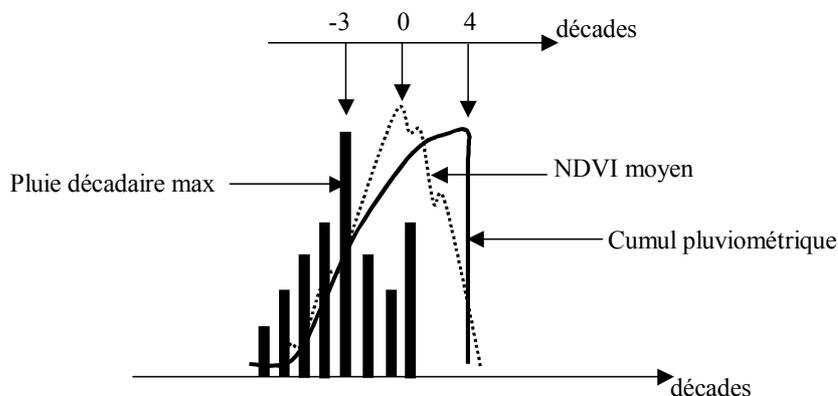


Fig. 7 Evolution comparée du NDVI et de la pluie à l'échelle annuelle.

On note également que les NDVI moyens ne dépassent jamais 0.5, traduisant la faible densité de la végétation sur le bassin.

L'étude comparative de l'évolution du NDVI et de la pluie montre une similitude marquée dans l'évolution annuelle des deux paramètres. Le NDVI moyen atteint son pic trois décades au plus après la décade du maximum de pluie décadaire et quatre décades au plus avant le cumul maximum de pluie (Fig. 7). Le premier décalage (trois décades) peut s'expliquer par le fait qu'après la décade du maximum de pluie décadaire, la Réserve Utile (RU) du sol est maximale ce qui assure des conditions d'humidité optimales pour les végétaux, d'où une intensification des phénomènes biochimiques d'assimilation, synonymes d'une forte activité chlorophyllienne. Cette activité de la chlorophylle des plantes est soutenue par les pluies enregistrées au cours des décades suivantes. Ainsi, au bout de quelques semaines l'indice foliaire du couvert végétal (m^2 de feuille par m^2 de sol) augmente considérablement et atteint son maximum. Cette biomasse verte qui s'est complètement établie durant cette période participe à la réponse du NDVI qui atteint un maximum.

Les décades qui suivent celle du maximum de NDVI sont en général moins pluvieuses et la fréquence des événements pluvieux est faible. L'activité chlorophyllienne baisse et le NDVI aussi. On tend alors vers la fin de la saison des pluies. Cette période s'étend sur quatre décades au maximum.

L'étude de la liaison statistique entre le NDVI et la pluie cumulée révèle que les deux paramètres s'ajustent mieux avec un polynôme de degré 3 qu'avec un polynôme de degré 1 (ajustement linéaire). L'ajustement par un polynôme de degré 3 des nuages de points formés par les deux paramètres montre les trois phases de l'évolution annuelle du NDVI en fonction de la pluie. Une phase de démarrage, caractérisée par une croissance lente des indices de végétation, correspond à la période d'installation de la saison humide. Une seconde phase de croissance survient après l'installation de la saison pluvieuse. Elle correspond à la période de forte activité photosynthétique des végétaux. Au cours de cette phase, la croissance du NDVI est rapide et linéaire si ne surviennent pas de longues périodes sèches au cœur de la saison des pluies. La troisième phase est celle du maximum-déclin où le NDVI atteint un maximum d'évolution puis décroît rapidement, marquant ainsi la fin de la saison pluvieuse. Cette évolution en trois phases est mise en évidence aux stations synoptiques de Ouahigouya (représentative de la zone sahélienne du bassin avec $R^2 = 0.94$; Fig. 8(a)) et de

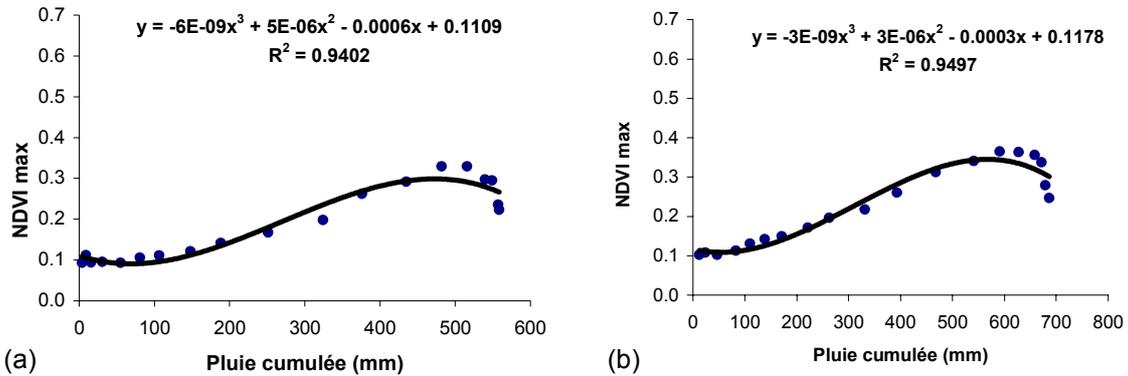


Fig. 8 NDVI–pluie cumulée: ajustement polynomial de degré 3. Cas des stations synoptique (a) de Ouahigouya, et (b) de Ouagadougou aéroport.

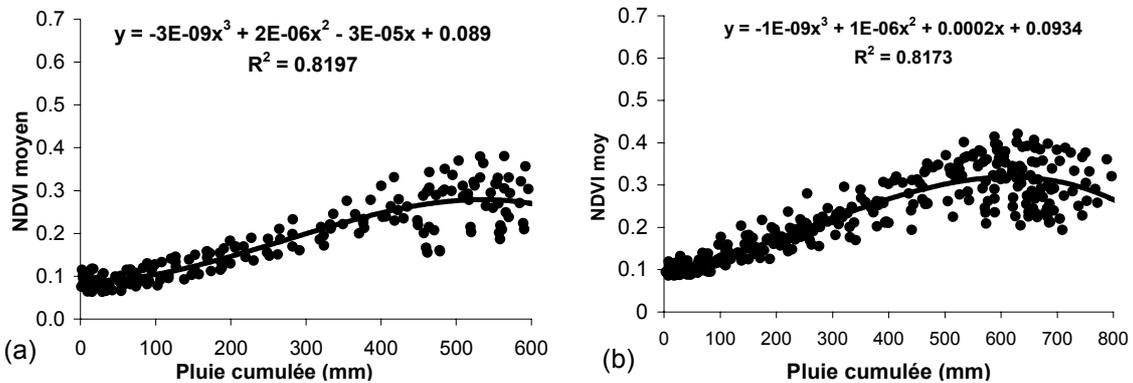


Fig. 9 NDVI–pluie cumulée: ajustement polynomial de degré 3 pour chaque zone climatique du bassin. (a) zone sahélienne, et (b) zone soudano-sahélienne.

Ouagadougou aéroport (représentative des conditions climatiques de la zone soudano-sahélienne avec $R^2 = 0.95$; Fig. 8(b)). La Fig. 9 donne une vue d'ensemble de l'évolution dans les deux bandes climatiques du bassin.

Liaison statistique entre le NDVI et la pluie mesurée aux postes pluviométriques

Le coefficient de détermination entre les indices de végétation et le cumul pluviométrique est en moyenne de 0.82 sur l'ensemble des deux zones étudiées (Tableau 1). Il n'y a pas de discrimination dans les valeurs de R^2 en fonction de la zone climatique considérée.

De même, les valeurs des coefficients ne varient pas de façon significative quand on augmente l'aire d'influence autour des pluviomètres. Ce dernier résultat traduit le fait que plus d'information NDVI n'améliore pas la relation NDVI–pluie. En effet, lorsque la surface définie autour des pluviomètres passe de $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ à $16 \text{ km} \times 16 \text{ km}$, puis à $24 \text{ km} \times 24 \text{ km}$, de plus en plus de pixels sont pris en compte dans la relation impliquant un apport plus important en information NDVI sans amélioration des coefficients de détermination. Deux hypothèses peuvent être émises:

Tableau 1 Coefficients de détermination entre NDVI mesurés dans les aires d'influence du poste pluviométrique et la pluie cumulée à ce poste.

		Aire d'influence autour des pluviomètres		
		8 km × 8 km	16 km × 16 km	24 km × 24 km
Zone sahélienne	NDVImoyen-pluie cumulée	$R_p^2 = 0.82$ $R_l^2 = 0.61$	$R_p^2 = 0.82$ $R_l^2 = 0.61$	$R_p^2 = 0.82$ $R_l^2 = 0.62$
	NDVImax-pluie cumulée	$R_p^2 = 0.81$ $R_l^2 = 0.61$	$R_p^2 = 0.82$ $R_l^2 = 0.61$	$R_p^2 = 0.82$ $R_l^2 = 0.61$
Zone soudano-sahélienne	NDVImoyen-pluie cumulée	$R_p^2 = 0.82$ $R_l^2 = 0.62$	$R_p^2 = 0.82$ $R_l^2 = 0.62$	$R_p^2 = 0.83$ $R_l^2 = 0.60$
	NDVImax-pluie cumulée	$R_p^2 = 0.84$ $R_l^2 = 0.60$	$R_p^2 = 0.83$ $R_l^2 = 0.62$	$R_p^2 = 0.82$ $R_l^2 = 0.60$

R_p^2 = coefficient de détermination polynomial.

R_l^2 = coefficient de détermination linéaire.

Premièrement, on considère que lorsque la saison pluvieuse est complètement installée, la taille des événements pluvieux est suffisamment grande et couvre entièrement les surfaces définies autour des pluviomètres. De ce fait, l'état du couvert végétal est quasiment le même sur toutes les surfaces, ce qui donne une réponse du NDVI sensiblement identique sur les différentes aires définies autour des pluviomètres.

La seconde hypothèse est de considérer que de façon intrinsèque, le NDVI ne peut expliquer qu'une certaine part de l'information pluviométrique, ce qui traduirait un phénomène de saturation du NDVI vis-à-vis de la pluie.

Liaison statistique entre le NDVI et la pluie spatialisée cumulée

Les valeurs de pluie considérées ici sont celles des pluies décadaires spatialisées au demi-degré carré. Comparativement aux résultats obtenus précédemment, on note une nette amélioration des différents coefficients de détermination pour chaque demi-degré carré (Fig. 10). Les coefficients de détermination sont compris entre 0.91 et 0.96 avec une moyenne de 0.93 pour l'ensemble du bassin. Les valeurs de R^2 sont sensiblement les mêmes quelle que soit la zone climatique considérée.

L'amélioration des résultats peut être liée au fait que pour chaque demi-degré carré, la pluie est définie à l'aide de l'information recueillie sur plusieurs postes (interpolation par krigeage). Cette contribution des différents pluviomètres apporte probablement une certaine amélioration dans l'estimation de la pluie. De même, sur le même demi-degré carré, l'indice de végétation est calculé avec un nombre plus important de pixels, ce qui affine l'information fournie par le NDVI sur le même demi-degré carré. On crée ainsi une certaine adéquation entre les deux sources d'informations qui améliore la relation entre le NDVI et la pluie.

Détermination de la décade de démarrage de la saison des pluies à l'aide des NDVI

Dans la zone sahélienne du bassin, le NDVI, le modèle graphique et le modèle ATLAS situent en moyenne le démarrage de la saison hivernale, à une décade près, en début

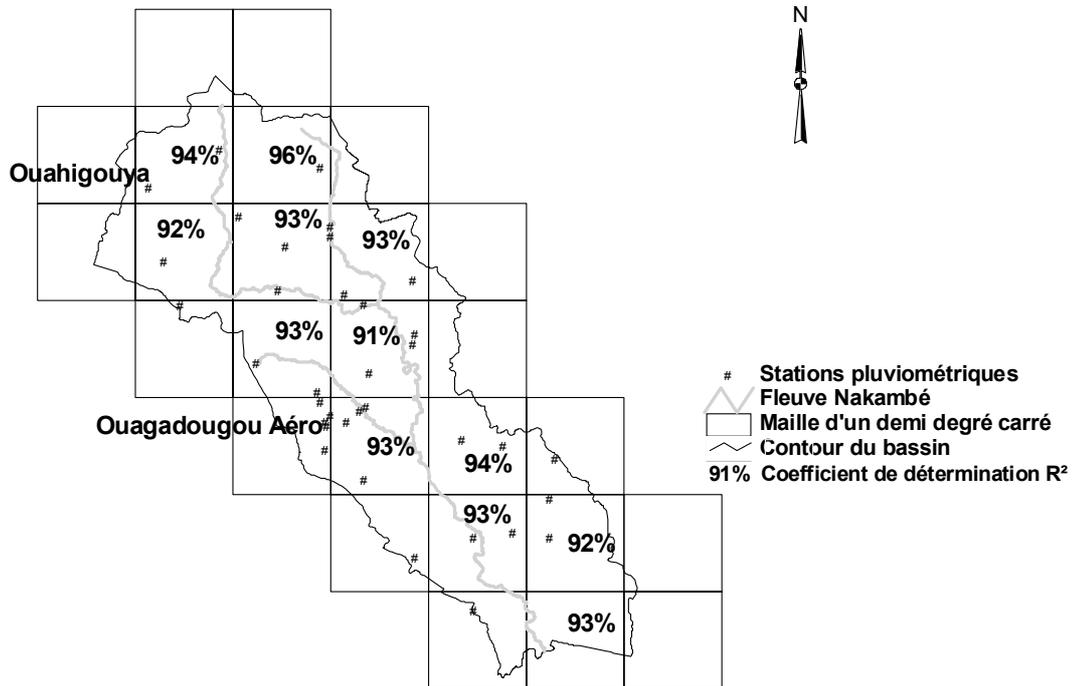


Fig. 10 Coefficients de détermination par maille d'un demi-degré carré pour les valeurs spatialisées de NDVI et de pluie.

Tableau 2 Décades moyennes de début de la saison des pluies selon différents modèles.

	Nombre de stations	Modèle NDVI	Modèle graphique	Modèle INERA-ICRISAT 1994	Modèle ATLAS (Morel, 1992)
Zone sahélienne	13	$m = 16$ $\sigma = 2$ $C_v = 12.5\%$	$m = 15$ $\sigma = 1$ $C_v = 6.7\%$	$m = 18$ $\sigma = 3$ $C_v = 16.7\%$	16–17
Zone soudano-sahélienne	23	$m = 15$ $\sigma = 2$ $C_v = 13.3\%$	$m = 15$ $\sigma = 1$ $C_v = 6.7\%$	$m = 17$ $\sigma = 3$ $C_v = 17.6\%$	15–16

m = décade moyenne; σ = écart type; C_v = coefficient de variation.

juin, et le modèle INERA-ICRISAT en fin juin (Tableau 2). Ces résultats, bien que très proches, ne doivent pas occulter les fortes dispersions observées autour des décades moyennes que donne individuellement chaque méthode (6.7% pour le modèle graphique, 12.5% pour le NDVI, 16.7% pour le modèle INERA-ICRISAT). Dans la zone soudano-sahélienne du bassin, hormis le modèle INERA-ICRISAT qui situe le démarrage de la saison des pluies en début juin, les trois autres méthodes donnent fin mai. Les dispersions autour de ces moyennes sont également fortes (modèle graphique: 6.7%, NDVI: 13.3%, modèle INERA-ICRISAT: 17.6%).

Les écarts entre les résultats sont à lier au fait que chaque méthode de détermination a ses propres critères pour la définition de la décade de démarrage (ou de fin) de la saison des pluies. La méthode NDVI par exemple, intègre en plus du paramètre pluie, d'autres facteurs comme la température, l'humidité, le vent, le type de sol, l'hydrographie, la géologie, la végétation, l'occupation des sols, les aménagements... Le modèle INERA-ICRISAT est basé sur des observations faites sur

la croissance du mil au centre sahélien de l'ICRISAT. Le mil et la végétation naturelle n'ont pas le même cycle de croissance dans le temps.

Quant aux fortes dispersions autour des décades moyennes, elles sont en accord avec le fait que l'installation de la saison des pluies dans la région est progressive et peut durer deux à trois mois selon les années.

Détermination de la décade de fin de saison pluvieuse à l'aide des NDVI

On observe avec le NDVI, que la fin de la saison des pluies dans la zone sahélienne du bassin survient en moyenne en mi-septembre (décade 26) avec une dispersion de 7.7% autour de cette valeur. Les trois autres méthodes de détermination la situent en fin septembre–début octobre (décades 27–28) avec des dispersions de 3.6% pour le modèle graphique, 7.1% pour le modèle INERA-ICRISAT (Tableau 3). Dans la zone soudano-sahélienne, les décades 28 et 29 marquent la fin de la saison des pluies pour les modèles NDVI, graphique et INERA-ICRISAT avec des dispersions de 7.1, 3.4 et 7.1% respectivement. Enfin, avec le modèle ATLAS, la saison des pluies prend fin entre fin octobre et début novembre (décades 30–31).

Contrairement aux résultats obtenus précédemment sur le début de la saison des pluies, les dispersions autour des décades moyennes de fin de saison pluvieuse sont relativement faibles, du fait que sur l'ensemble de la zone d'étude le passage de la saison des pluies à la saison sèche est rapide et dure généralement de 15 jours à un mois.

Tableau 3 Décades moyennes de fin de la saison des pluies selon différents modèles.

	Nombre de stations	Modèle NDVI	Modèle graphique	Modèle INERA-ICRISAT 1994	Modèle ATLAS (Morel, 1992)
Zone sahélienne	13	$m = 26$ $\sigma = 2$ $C_v = 7.7\%$	$m = 28$ $\sigma = 1$ $C_v = 3.6\%$	$m = 28$ $\sigma = 2$ $C_v = 7.1\%$	26–28
Zone soudano-sahélienne	23	$m = 28$ $\sigma = 2$ $C_v = 7.1\%$	$m = 29$ $\sigma = 1$ $C_v = 3.4\%$	$m = 28$ $\sigma = 2$ $C_v = 7.1\%$	29–31

m = décade moyenne; σ = écart type; C_v = coefficient de variation.

CONCLUSION

Une similitude marquée dans l'évolution annuelle du NDVI et de la pluie a bien été mise en évidence dans cette étude. Le NDVI s'est révélé être corrélé au cumul pluviométrique avec des coefficients de détermination compris entre 0.81 et 0.84. On obtient un meilleur ajustement lorsque la pluie et le NDVI sont spatialisés au demi-degré carré ($0.91 \leq R^2 \leq 0.96$), ce qui traduit une meilleure adéquation des deux paramètres lorsqu'ils sont rapportés à la même échelle spatiale. L'étude a montré que le NDVI est un bon indicateur de début et de fin de saison des pluies. Les résultats obtenus à l'aide des données d'indices de végétation sont en accord avec ceux obtenus par les méthodes classiques de détermination des décades de début et de fin de saison pluvieuse dans la zone étudiée.

Il convient cependant de noter que les données NDVI utilisées dans cette étude sont des données GAC sur lesquelles la technique du *Maximum Value Composite* (MVC) a été appliquée, ce qui rapporte les valeurs de NDVI à des surfaces de 8 km × 8 km. Cette résolution ne permet pas de prendre en compte certaines caractéristiques locales du milieu étudié qui pourraient être déterminantes dans la réponse du NDVI (Foody, 2003). Par ailleurs, l'activité photosynthétique des végétaux ne dépend pas uniquement de la pluie. D'autres paramètres climatologiques comme la température, le vent et l'humidité ou géographiques comme le sol, l'hydrographie, la géologie et les activités humaines interviennent dans la réponse du NDVI (Farrar *et al.*, 1994). La prise en compte de ces variables pourrait améliorer les résultats obtenus (Cihlar *et al.*, 1991; Narasimha Rao *et al.*, 1993; Nicholson & Farrar, 1994; Kumar *et al.*, 2002; Foody, 2003).

Les résultats de cette étude ouvrent la voie à des perspectives d'utilisation des données de pluie mensuelles obtenues à partir des NDVI sur le bassin versant du Nakambé pour la modélisation hydrologique mensuelle au pas d'espace du demi-degré carré.

Remerciements Nous remercions le SCAC (Service de Coopération et d'Action Culturelle) de l'ambassade de France à Ouagadougou, l'UNESCO dans le cadre du programme Friend-AOC, le laboratoire Hydrosiences de Montpellier (programme VAHYNE) pour le soutien financier qui a permis la réalisation de cette étude. Nos remerciements vont également à la Direction de la Météorologie Nationale du Burkina Faso pour les données pluie dont nous avons bénéficié pour les besoins de ce travail.

REFERENCES

- Ardoin, S., Lubès-Niel, H., Servat, E., Dezetter, A., Boyer, J. F., Mahé, G. & Paturel, J. E. (2003) Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest: caractérisation de la situation de la décennie 90. In: *Hydrology in the Mediterranean and Semiarid Regions* (ed. by E. Servat, W. Najem, C. Leduc & S. Ahmed) (Proc. Montpellier Conf., April 2003), 223–228. IAHS Publ. 278, IAHS Press, Wallingford, UK.
- Batista, G. T., Shimabukuro, Y. E. & Lawrence, W. T. (1997) The long-term monitoring of vegetation cover in the Amazonian region of northern Brazil using NOAA-AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.* **18**(15), 3195–3210.
- Cihlar, J., St-Laurent, L. & Dyer, J. A. (1991) Relationship between the Normalized Difference Vegetation Index and ecological variables. *Int. J. Remote Sens.* **35**, 279–298.
- Cres, A. (2003) Une méthode non paramétrique de détermination des dates de début et de fin de saison des pluies. Application à l'Afrique de l'Ouest et Centrale. Note interne IRD.
- Diallo, M. A. (2001) Paramètres agrométéorologiques de la saison agricole pluvieuse, Centre Régional AGRHYMET, Programme Majeur Information Alerte Précoce et Prévision des Productions Agricoles (AP3A).
- Eklundh, L. (1998) Estimating relations between AVHRR NDVI and rainfall in east Africa at 10-day and monthly time scale. *Int. J. Remote Sens.* **19**, 563–568.
- Farrar, T. J., Nicholson, S. E. & Lare, A. R. (1994) The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall and soil moisture in semiarid Botswana. II. NDVI response to soil moisture. *Remote Sens. Environ.* **50**(2), 121–133.
- Foody, G. M. (2003) Geographical weighting as a further refinement to regression modelling: an example focused on the NDVI–rainfall relationship. *Remote Sens. Environ.* **88**(3), 283–293.
- Guillot, B. (1995) Satellite et précipitations. Contraintes techniques et physiques, analyse de quelques méthodes, problèmes de recherche et de validation. *Veille Clim. Satell.* **55**, 27–58.
- Hielkema, J. U., Price, S. D. & Astel, W. L. (1986) Rainfall and vegetation monitoring in the Savannah Zone of Democratic Republic of Sudan using the NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer. *Int. J. Remote Sens.* **7**(11), 1499–1513.
- Hien, F., Compaore, J. A. & Coulibaly-Some, O. (1996) La dynamique de la dégradation des sols dans le bassin du Nakambé: une étude diachronique dans le secteur des forêts classées de Bissiga-Nakambé au Burkina Faso. In: *Surveillance des sols dans l'environnement par télédétection et Systèmes d'Informations Géographiques* (ed. par R. Escadafal, M. A. Mulders & L. Thiombiano) (Symp. Int. AISS), **9**, 523–530.
- Justice, C. O., Holben, B. N. & Gwynne, M. D. (1986) Monitoring East African vegetation using AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.* **7**(11), 1453–1474.

- Kerr, Y. H., Imbernon, J., Dedieu, G., Hautecoeur, O., Lagouarde, J. P. & Seguin, B. (1989) NOAA AVHRR and its uses for rainfall and evapotranspiration monitoring. *Int. J. Remote Sens.* **10**(4 & 5), 847–854.
- Kumar, L., Rietkerk, M., Van Langevelde, F., Van De Koppel, J., Van Andel, J., Hearne, J., De Ridder, N., Stroosnijder, L., Skidmore, A. K. & Prins, H. H. T. (2002) Relationship between vegetation growth rates at the onset of the wet season and soil type in the Sahel of Burkina Faso: implications for resource utilisation at large scales. *Ecol. Modelling* **149**(1–2), 143–152.
- Mahé, G., L'Hôte, Y., Olivry, J. C. & Wotling, G. (1999) Trends and discontinuities in regional rainfall of West and Central Africa: 1951–1989. *Hydrol. Sci. J.* **46**(2), 211–226.
- Malo, A. R. & Nicholson, S. E. (1989) A study of rainfall and vegetation dynamics in the African Sahel using NDVI. *J. Arid Environ.* **19**, 1–24.
- Maselli, F. & Rembold, F. (2002) Integration of LAC and GAC NDVI data to improve vegetation monitoring in semi-arid environments. *Int. J. Remote Sens.* **23**(12), 2475–2488.
- Morel, R. (1992) Atlas agrométéorologique des pays de la zone du CILSS. Programme AGHYMET. Imprimerie Ecole Issa Béri, Niamey.
- Narasimha Rao, P. V., Venkataratnam, L., Krishna Rao, P. V., Ramana, K. V. & Singarao, M. N. (1993) Relation between root zone soil moisture and normalized difference vegetation index. *Int. J. Remote Sens.* **14**(3), 441–449.
- Nicholson, S. E. & Farrar, T. J. (1994) The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall and soil moisture in semiarid Botswana. I. NDVI response to rainfall. *Remote Sens. Environ.* **50**(2), 107–120.
- Nicholson, S. E., Some, B. & Kone, B. (1999) An analysis of recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy seasons of the 1997 El Niño and the 1998 La Niña years. *J. Climate* **13**(14), 2628–2640.
- Paturel, J. E., Servat, E. & Delattre, M. O. (1998) Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrol. Sci. J.* **43**(6), 937–946.
- Richard, Y. & Pocard, I. (1998) A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa. *Int. J. Remote Sens.* **19**(15), 2907–2920.
- Scanlon, T. M., Albertson, J. D., Caylor, K. K. & Williams, C. A. (2002) Determining land surface fractional cover from NDVI and rainfall time series for a savannah ecosystem. *Remote Sensing of Environment* **82**(2/3), 376–388.
- Schmidt, H. & Karnieli, A. (2000) Remote sensing of the seasonal variability of vegetation in semi-arid environment. *J. Arid Environ.* **45**(1), 43–59.
- Taupin, J. D. (2003) Précision de l'estimation des précipitations au Sahel selon la densité du réseau d'observation pluviométrique. *C. R. Geosci.* **335**, 215–225.
- Taupin, J. D., Amani, A. & Lebel, T. (1998) Variabilité spatiale des pluies au Sahel: Une question d'échelles. 1. Approche expérimentale. In: *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century* (ed. by E. Servat, D. Hughes, J. M. Fritsch & M. Hulme) (Proc. Abidjan Conf., Côte d'Ivoire, novembre 1998), 143–151. IAHS Publ. 252, IAHS Press, Wallingford, UK.
- Tucker, C. J. & Choudhury, B. J. (1987) Satellite remote sensing of drought conditions. *Remote Sens. Environ.* **23**, 243–251.
- Tucker, C. J. & Gatlin, J. A. (1984) Monitoring vegetation in the Nile Delta with NOAA-6 and NOAA-7 AVHRR Imagery. *Photogramm. Engng Remote Sens.* **50**(1), 53–61.
- Wang, J., Price, K. P. & Rich, P. M. (2001) Spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in central great plains. *Int. J. Remote Sens.* **22**(18), 3827–3844.
- Wang, J., Rich, P. M. & Price, K. P. (2003) Temporal response of NDVI to precipitation and temperature in central Great Plains, USA. *Int. J. Remote Sens.* **24**(11), 2345–2364.
- Weiss, J. L., Gutzler, D. S., Coonrod, J. E. A. & Dahm, C. N. (2004) Long-term vegetation monitoring with NDVI in a diverse semi-arid setting, central New Mexico, USA. *J. Arid Environ.* **58**(2), 249–272.

Reçu le 23 juillet 2003; accepté le 7 décembre 2004