Télédétection, 2003, vol. 3, n° 2-3-4, p. 165–174
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2003 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*
Imprimé en France

ANALYSE DIACHRONIQUE DE L'EFFICACITÉ DES PLUIES POUR LA PRODUCTION VÉGÉTALE DANS LE BASSIN MÉDITERRANÉEN DE 1982 À 1996

LACAZE BERNARD*[1], SALIHA AÏT-BACHIR[1] et STEFAN SOMMER[2].

[1] *CNRS-UMR 5600 « Environnement-Ville-Société »*
18, rue Chevreul
69362 Lyon – Cedex 07, France.
[2] *Centre Commun de Recherches*
Institut des Applications Spatiales
21020 Ispra, Italie.
Courriel (1) : lacaze@univ-lyon3.fr

(soumis le 6 août 2002 ; révisé le 21 octobre 2002 ; accepté le 10 février 2003)

Le coefficient d'efficacité pluviale (CEP) a été défini en zone aride comme le rapport entre la production primaire et la pluviosité annuelle. Récemment, la cartographie de l'évolution du CEP en zone sahélienne a été proposée en utilisant un estimateur de production végétale annuelle mesuré par télédétection (indice de végétation NDVI cumulé). Une approche similaire a été appliquée ici à l'ensemble du Bassin méditerranéen à partir, d'une part, de données pluviométriques disponibles à l'échelle du globe et, d'autre part, des données AVHRR de NOAA archivées depuis 1982. La méthode utilisée pour estimer la production primaire annuelle est celle du calcul de la moyenne des valeurs mensuelles d'un indice de recouvrement de la végétation verte, obtenu par démixage de deux néocanaux (NDVI et température de surface), avec trois réponses spectrales de référence : eau, sol nu et végétation verte. Le CEP a ainsi été cartographié annuellement, de 1982 à 1996, de même que la variabilité observée sur cette période de 15 ans. Les résultats indiquent que, dans la majeure partie du Bassin méditerranéen, il n'y a pas eu d'évolution significative du CEP, ce qui rejoint les conclusions des études réalisées au Sahel. L'analyse des valeurs de CEP calculées pour des zones de pluviosité moyennes de 150 mm.an^{-1} à 600 mm.an^{-1} confirme que le CEP tend à être inversement lié à la pluviosité moyenne, toutes choses égales par ailleurs, et qu'il peut effectivement être considéré comme un indicateur de désertisation.

Mots-clefs : télédétection satellitaire; pluviométrie; production primaire ; Bassin méditerranéen ; coefficient d'efficacité pluviale ; désertisation.

MULTITEMPORAL ANALYSIS OF RAIN-USE EFFICIENCIES IN THE MEDITERRANEAN BASIN FROM 1982 TO 1996

Rain-Use Efficiency (RUE) has been defined by Le Houérou (1984) as the ratio of net primary production (NPP, expressed in kg dry matter.ha^{-1}.year^{-1}) to annual precipitation (expressed in mm). Recently, it has been proposed to derive RUE in the Sahelian region from remotely-sensed estimates of primary production, using the cumulated vegetation index NDVI as indicator. A similar approach has been applied here to the whole Mediterranean basin. Gridded rainfall data have been extracted from a global data base (spatial resolution 0.5° × 0.5°), and satellite data have been extracted from global NOAA-AVHHR archive available at 8km × 8km resolution since 1982. Our estimate of annual NPP is the mean of monthly values of the green vegetation fraction (GVF), obtained on a pixel-by-pixel basis from linear unmixing of two NOAA-AVHRR derived values (NDVI and surface temperature), considering three endmembers : water, green vegetation and bare soil. RUE has been mapped on an annual basis from 1982 to 1996 and the coefficient of variation during this period has been computed. Results suggest that no significant changes in RUE occured during this period, except a small but systematic increase in RUE for subsaharian areas (annual rainfall less than 300 mm. year^{-1}), confirming the results obtained in the Sahelian region. The analysis of RUE values computed from areas with similar mean annual rainfalls has shown that from 150 to 600 mm.year^{-1}, RUE appears to be inversely correlated with mean rainfall, and can be considered as a useful desertification indicator.

Keywords : satellite remote sensing ; rainfall ; primary production ; Mediterranean Basin ; rain-use efficiency ; desertification.

* Correspondant principal

1. INTRODUCTION

Le coefficient d'efficacité pluviale a été défini par Le Houérou (1984) comme le quotient de la production primaire (en kilogrammes de matière sèche par hectare et par an) par la pluviosité annuelle en millimètres. Il s'agit d'un paramètre synthétique, relativement indépendant des régimes pluviométriques et de la diversité végétale. Il traduit l'état dynamique de la végétation des zones arides et celui de la surface du sol, les deux étant liés et étant fortement influencés par les impacts anthropozoïques. A l'échelle mondiale, le CEP est en moyenne de $4{,}0 \pm 0{,}3$ kg MS.ha^{-1}.an^{-1}.mm^{-1} (Le Houérou, 1984 ; Le Houérou *et al.*, 1988) avec des valeurs extrêmes observées dans les zones désertisées ($0 < CEP < 1$) et dans les zones proches de l'équilibre édapho-climatique ($CEP > 10$). Entre les isohyètes 50 et 500 mm.an^{-1}, le CEP tend à être inversement proportionnel à la pluviosité moyenne, toutes choses égales par ailleurs, et peut être considéré comme un indicateur de désertisation (Le Houérou, 1987).

Les données expérimentales concernant le CEP étant peu nombreuses et ponctuelles, il apparaît donc intéressant de tenter de cartographier ce coefficient en utilisant des valeurs spatialisées de production végétale, obtenues par télédétection. En effet, dans les régions arides subsahariennes, l'indice de végétation NDVI cumulé a pu être relié linéairement à la production primaire (Prince, 1991; Prince et Goward, 1995). Ainsi Nicholson *et al.* (1998) et Prince *et al.* (1998) ont utilisé cette approche d'évaluation du CEP en région sahélienne pour les années 1982 à 1990 et ils concluent qu'il n'y a pas eu de baisse du CEP durant cette période. Ils notent même une légère augmentation moyenne, qu'ils attribuent à une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau, qui serait une conséquence des changements climatiques à l'échelle du globe.

Dans la présente étude, nous avons repris une approche similaire, que nous avons appliquée à la cartographie du CEP annuel de l'ensemble du Bassin méditerranéen pour une période de 15 ans (1982-1996).

2. DONNÉES ET MÉTHODES

Nous présentons ci-dessous les types de données utilisées pour cartographier les pluies et le recouvrement végétal avec un pas de temps mensuel, ainsi que la méthode d'estimation de la productivité primaire annuelle et de calcul du CEP.

2.1. Données pluviométriques

Les données utilisées sont les pluies mensuelles estimées par maille de $0{,}5° \times 0{,}5°$ (Legates et Willmott, 1990). Elles sont extraites de la base de données élaborée par le Centre de Recherches Climatiques de l'University of Delaware (2002), qui comprend notamment les précipitations mensuelles à l'échelle du globe depuis 1950. Les données extraites ont été ré-échantillonnées pour être superposables aux données AVHRR de NOAA à la résolution de 8 km × 8 km.

Nous avons exclu de l'étude les zones à pluviométrie moyenne inférieure à 150 mm ; en effet l'isohyète 150 mm semble correspondre à la limite du désert au Maghreb méditerranéen (Quézel, 2000). D'autres auteurs utilisent l'isohyète 200 mm pour étudier l'extension du Sahara (Tucker et Nicholson, 1999).

2.2. Données de télédétection

Les données utilisées sont celles du capteur AVHRR des satellites NOAA, plus précisément les données mensuelles qui ont été produites dans le cadre du projet *NOAA/NASA Pathfinder AVHRR Land (PAL) Program* (NASA/GFSC, 2002). Les données sont disponibles à la résolution d'environ 8 km, dans la projection du type *Goode Interrupted Homolosine*, depuis 1982. Une quantité plus limitée de données est disponible à la résolution spatiale de 1 km : périodes d'avril 1992 à septembre 1993 et février à novembre 1995 (USGS/LPDAAC, 2002).

Nous avons extrait les données concernant le bassin méditerranéen (15° Ouest à 45° Est, 27,5° Nord à 47,5° Nord).

2.3. Élaboration de l'indice de recouvrement végétal

L'indice retenu est la fraction végétation verte (FVV), c'est-à-dire la fraction du pixel occupée par un couvert végétal photosynthétiquement actif. La FVV a été estimée par la technique du démixage linéaire (Adams *et al.*, 1986 ; Smith *et al.*, 1990), qui se fonde sur l'hypothèse de linéarité de la combinaison des réponses spectrales des composantes de pixels mixtes. Cette approche a été appliquée avec succès pour évaluer le couvert végétal des régions arides et suivre les phénomènes de désertisation à partir de données satellitaires du type TM de Landsat (Hill *et al.*, 1996 ; Meliá, 1996 ; Haboudane *et al.*, 2000 ; Hill *et al.*, 2000). L'application de la technique est limitée par le nombre de canaux N_c du capteur utilisé qui détermine le nombre maximum N_m de composantes que l'on peut identifier dans un pixel mixte ($N_m = N_c + 1$). Dans la présente étude, il a été choisi de se limiter à une combinaison de trois composantes : eau, végétation verte et sol nu. Dès lors, deux canaux suffisent pour opérer le démixage. Plutôt que d'utiliser les canaux bruts, il a été jugé préférable d'employer deux néocanaux : l'indice de végétation NDVI et la température de surface Ts. En effet, il a été montré que la combinaison de ces deux canaux permet de caractériser l'état physiologique de la végétation, notamment le stress hydrique (Nemani et Running,

1989). Le choix des zones de référence pour les trois composantes a été fait de façon interactive, d'après l'analyse des composantes principales des séries temporelles de NDVI d'une part, de Ts d'autre part : on a pu ainsi identifier les zones les plus stables sur l'ensemble de la période.

Le traitement des données par démixage a été effectué pour l'ensemble des données mensuelles et le résultat a été fourni dans une projection Lambert azimutale conforme, afin de pouvoir être superposé aux autres données géocodées à l'échelle du Bassin méditerranéen.

Il faut noter que le résultat de l'algorithme de démixage peut fournir des valeurs qui sont en dehors de l'intervalle théorique pour FVV (0 à 1). En particulier, dans le cas des zones subdésertiques, on obtient pour la plupart des pixels des valeurs négatives de FVV, ce qui peut s'expliquer par la difficulté à reconstituer la réponse spectrale des surfaces minérales désertiques à partir d'une référence « sol nu » unique.

2.4. Calcul du coefficient d'efficacité pluviale

Après ré-échantillonnage des données de pluviosité, le CEP annuel est calculé pour chaque pixel en effectuant le calcul suivant :

$$CEP_{fvv} = (100 * FVV)/P$$

avec FVV = fraction végétation verte exprimée en % (moyenne des 12 valeurs mensuelles) et P = pluviosité annuelle en mm. On notera que les valeurs obtenues sont du même ordre de grandeur que celles définies par Le Houérou (1984), mais ne sont pas directement comparables, puisque nous n'avons pas établi de relation explicite entre FVV et la production primaire en kg MS.ha^{-1}.an^{-1}.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Nous présentons successivement les résultats obtenus concernant les valeurs moyennes pour la période de 1982 à 1986 et les variations inter-annuelles. Une analyse plus détaillée est ensuite proposée, en subdivisant le Bassin méditerranéen en six zones de pluviométries moyennes annuelles croissantes de 150 à 700 mm.

3.1. Valeurs moyennes pour la période 1982-1996

Sur la figure 1, nous montrons la cartographie des valeurs moyennes des 15 années étudiées, obtenues respectivement pour la pluviosité, la fraction végétation verte et le coefficient d'efficacité pluviale.

La cartographie de la fraction végétation verte FVV moyenne met bien en évidence le contraste entre le nord-ouest et le sud-est du bassin méditerranéen. Une comparaison de FVV avec l'indice NDVI, faite à partir des données AVHRR disponibles à la résolution spatiale de 1 km pour les périodes 1992-1993 et 1995 (26 mois au total), montre que les évolutions de ces deux indices sont comparables. Ainsi, pour une zone aride du sud de la Tunisie (région de Menzel el Habib, centrée sur 34,2° Nord et 9,6° Est) on obtient un coefficient de corrélation $r^2 = 0{,}53$ (figure 2). Malgré cette similarité, l'approche par démixage peut s'avérer plus efficace que le recours au NDVI pour le suivi des couverts végétaux épars des zones arides (Lacaze *et al.*, 1996 ; Hill *et al.*, 2000).

La cartographie du CEP moyen permet de souligner les faibles valeurs observées dans les régions subdésertiques et l'augmentation progressive pour les régions semi-arides jusqu'à des valeurs de pluviosité annuelle moyenne de 500 à 600 mm.

3.2. Variations inter-annuelles

Sur la figure 3, nous montrons les coefficients de variation des mêmes paramètres (pluviosité, FVV et CEP_{fvv}), calculés d'après les 15 valeurs annuelles observées. Nous remarquerons que, contrairement à ce qui a été observé à partir de mesures *in situ* (Le Houérou, 1987; Le Houérou, 1992), nous ne constatons pas une variabilité plus grande de la productivité végétale par rapport à celle de la pluviosité. Ceci peut provenir de la résolution spatiale grossière utilisée, qui tend à uniformiser les réponses spectrales et ne permet pas de déceler des couverts végétaux très localisés ou linéaires. D'autre part, les couverts végétaux pérennes, dont le rôle est important pour limiter les processus de désertisation, sont mal identifiés lorsqu'ils sont peu ou pas chlorophylliens. Malgré ces limites dans la détection de la production végétale, la variabilité temporelle observée pour le CEP est très significative : on retrouve ici le fait qu'une variabilité élevée est un facteur supplémentaire et aggravant de l'aridité induite par de faibles moyennes pluviométriques : les marges subdésertiques apparaissent clairement comme les zones avec la variabilité du CEP la plus élevée et le gradient de variabilité est nettement marqué pour les régions du Maghreb, du Proche Orient et de la Turquie.

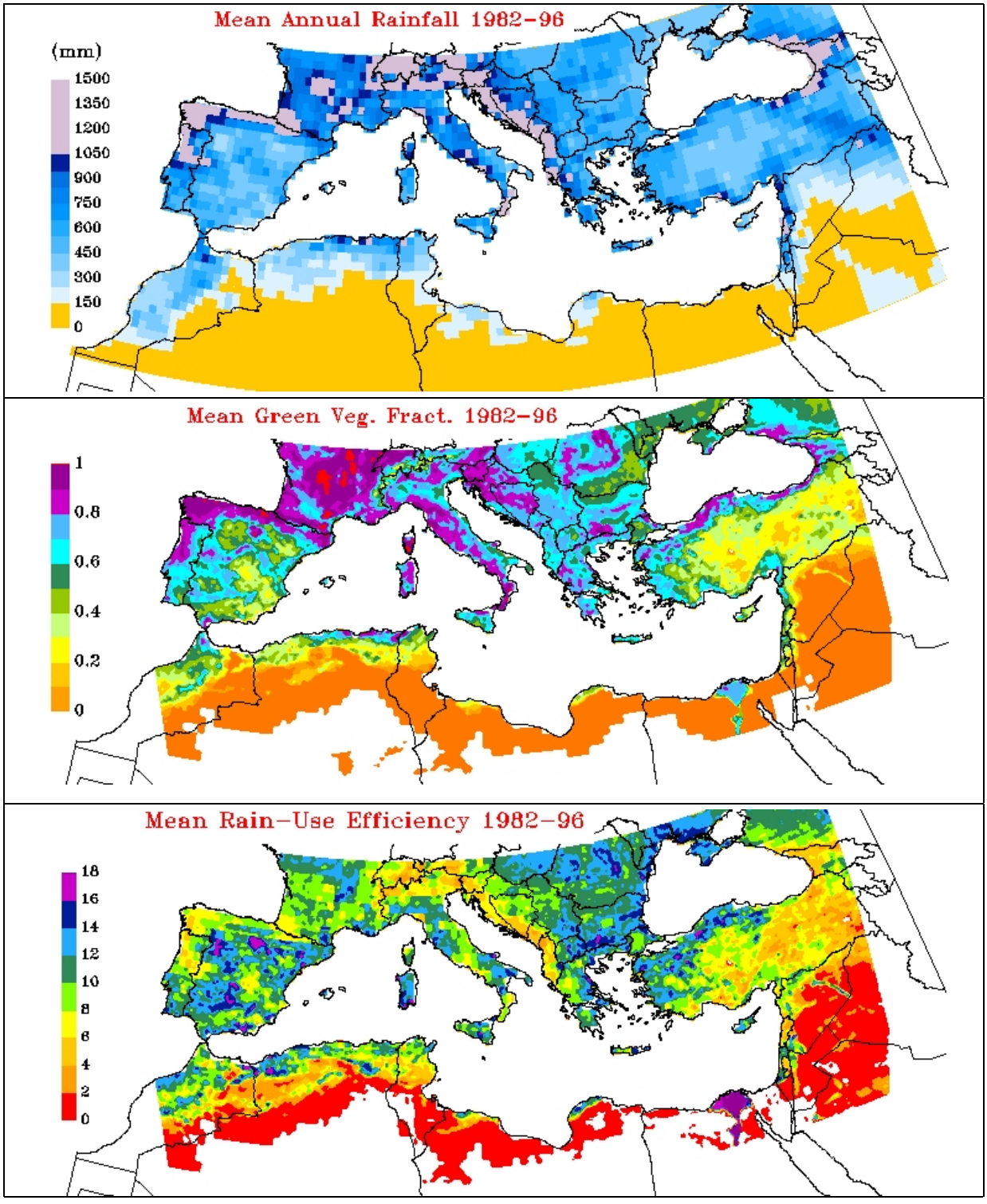


FIGURE 1 Cartes de la pluviosité annuelle, de la fraction végétation verte et du coefficient d'efficacité pluviale dans le bassin méditerranéen (moyennes des 15 années, de 1982 à 1996). *Maps of annual rainfall, green vegetation fraction and rain-use efficiency in the Mediterranean basin (mean of 15 annual values, 1982-1996).*

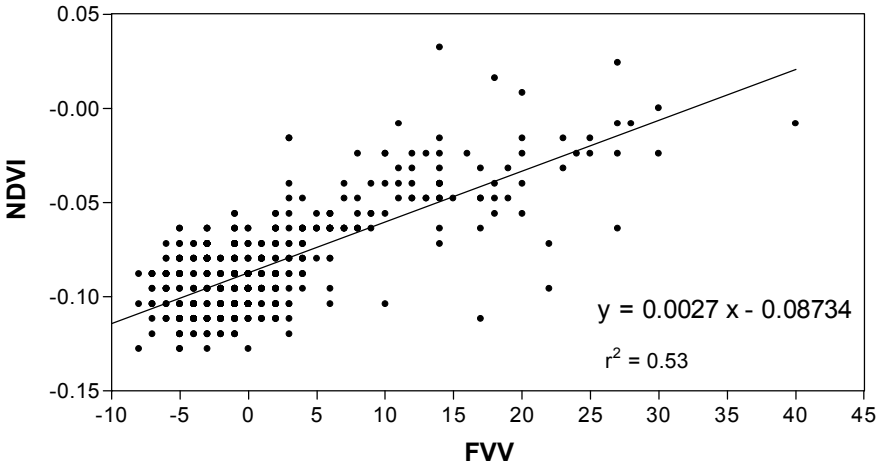


FIGURE 2 Relation entre indice de végétation NDVI et fraction végétale verte FVV pour la région de Menzel el Habib (Tunisie). *Relationship between NDVI and green vegetation fraction for Menzel el Habib (Tunisia) area.*

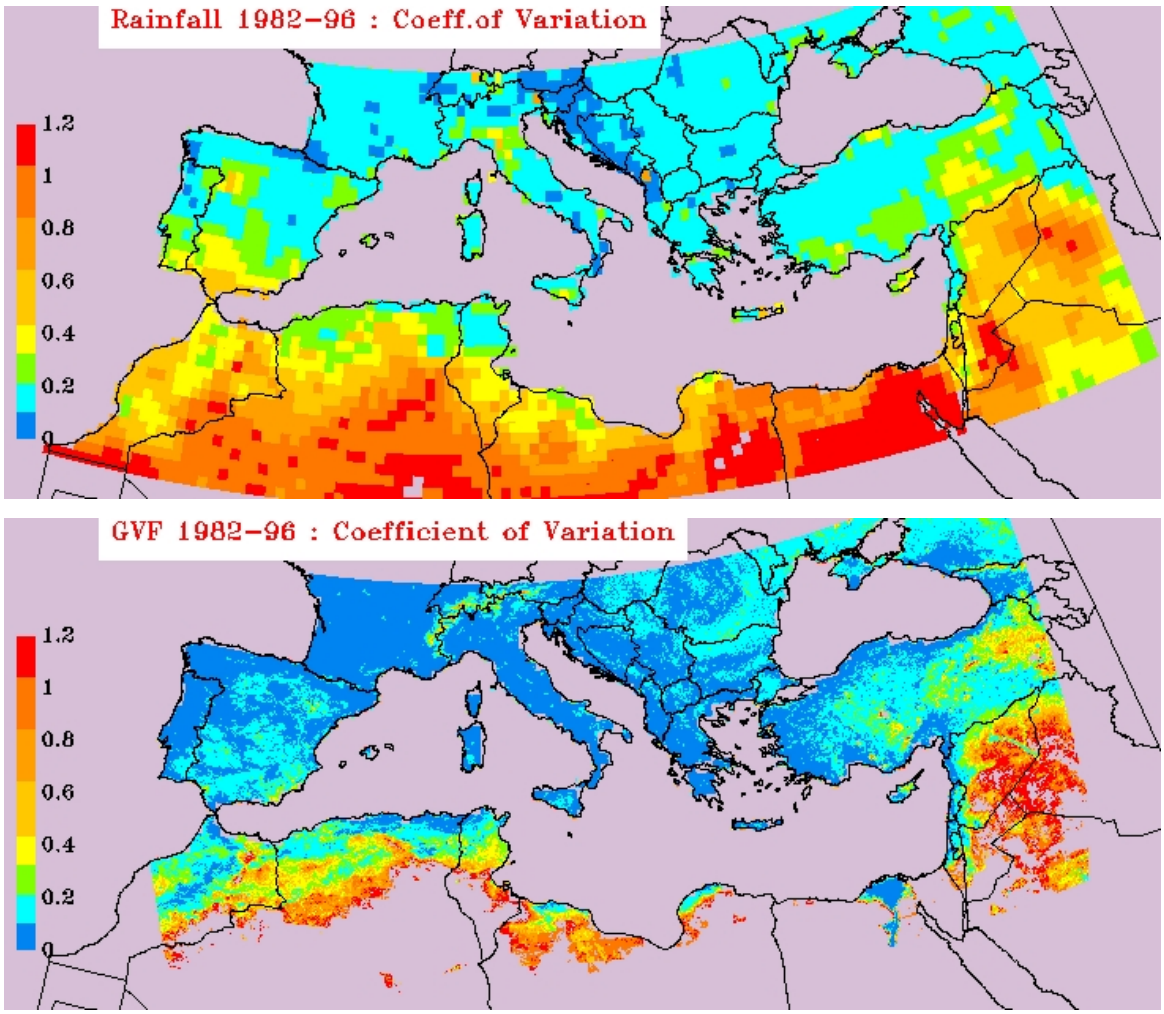


FIGURE 3 (*cf.* légende page suivante)

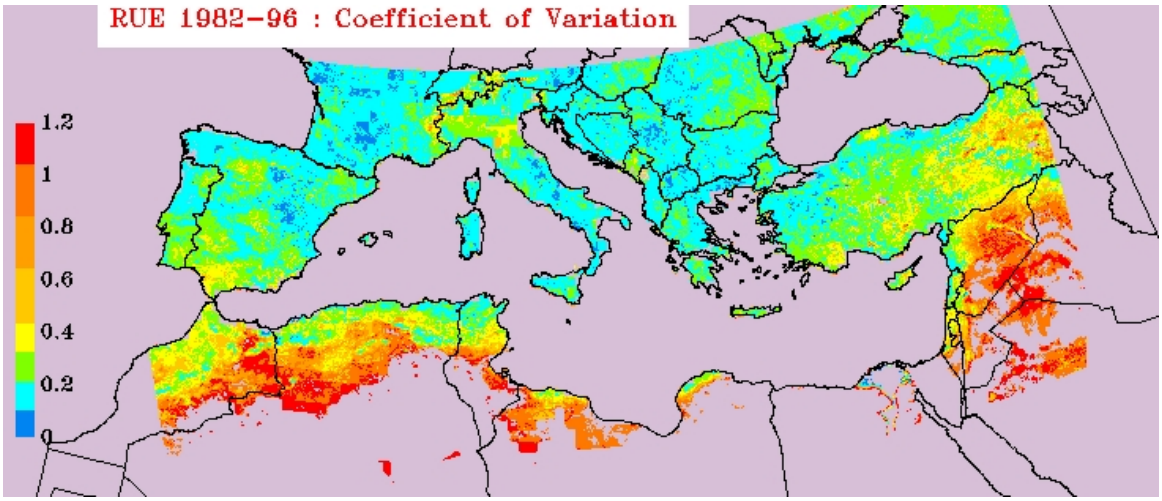


FIGURE 3 Carte des coefficients de variation de la pluviosité annuelle, de la fraction végétation verte et du coefficient d'efficacité pluviale dans le bassin méditerranéen pour la période de 1982 à 1996. *Maps of coefficients of variation of annual rainfall, green vegetation fraction and rain-use efficiency in the Mediterranean basin for the 1982-1985 period.*

3.3 Analyse du CEP par zones de pluviométries moyennes identiques

Nous avons utilisé la répartition des pluies moyennes sur la période 1982-1996 (voir figure 4) pour calculer ensuite les FVV et les CEP_{fvv} pour les tranches pluviométriques suivantes : 150-200, 200-300, 300-400, 400-500, 500-600, 600-700, 700-800 mm.an^{-1}. Les résultats concernant l'évolution de 1982 à 1996 sont illustrés sur la figure 5. On observe ici des valeurs négatives de FVV pour les zones arides et hyper-arides, valeurs fluctuant d'une année à l'autre. Ces fluctuations résultant de changements d'états de surface des roches et des sols nus, et la production primaire de ces zones étant très faible ou nulle, nous avons considéré comme égales à zéro toutes les valeurs négatives de FVV pour le calcul du CEP_{fvv}.

L'évolution des valeurs annuelles de CEP_{fvv} est indiquée à la figure 6. Les valeurs moyennes sur la période de 15 ans sont données sur le tableau 1, et les relations statistiques entre CEP_{fvv} et pluviosité sont illustrées sur la figure 7. Ces résultats indiquent une chute brutale des valeurs de CEP pour des pluviométries inférieures à 300 mm.an^{-1}, ce qui correspond bien aux résultats de CEP issus de mesures *in situ* de production primaire (Le Houérou, 1992).

4. CONCLUSIONS

La principale conclusion est donc la stabilité des valeurs moyennes de CEP sur la période de 15 ans considérée (figure 6), avec une légère augmentation pour les zones subdésertiques (150 à 300 mm.an^{-1}), ce qui rejoint les observations réalisées au Sahel (Prince *et al.*, 1998 ; Nicholson *et al.*, 1998). Toutefois, par rapport aux résultats obtenus au Sahel, ceux de la présente étude se distinguent par les points suivants :

– le CEP a été calculé sur l'ensemble de la zone d'étude, et non seulement à proximité de stations météorologiques ;

– le CEP donne des valeurs bien hiérarchisées, même pour les zones subdésertiques : nous n' avons exclu de la cartographie que les zones à pluviométrie inférieure à 150 mm.an^{-1}, alors que Prince *et al.* (1998) obtiennent des valeurs aberrantes de CEP pour les stations avec moins de 200 mm.an^{-1} et des valeurs peu fiables pour les zones de 200 à 400 mm.an^{-1} (pour 5 années sur 10, les valeurs de CEP de ces zones sont supérieures à celles des zones de 400 à 600 mm.an^{-1}).

L'approche visant à confronter pluviosité et estimations de la productivité végétale apparaît indispensable pour suivre à moyen ou long terme les processus de désertisation, en s'affranchissant de la variabilité inter-annuelle toujours importante dans les zones arides et sub-arides. Les améliorations possibles de la méthode résident dans l'estimation spatialisée des pluies avec une maille inférieure à 0,5° × 0,5°: ceci est envisageable à partir de données des capteurs de Météosat (Rosema and Roozekrans, 1996) ou de TRMM (*Tropical Rainfall Monitoring Mission*), lancé en novembre 1997. D'autre part, des données comme celles de VEGETATION de SPOT ou de MODIS et de MERIS d'ENVISAT devraient permettre d'affiner la technique de démixage et d'envisager une meilleure estimation des couverts végétaux pérennes faiblement chlorophylliens. Malgré tout, il demeure nécessaire de poursuivre les analyses des données AVHRR qui, seules, permettent d'utiliser une archive établie depuis 1982, dont on peut souhaiter qu'une version à la résolution nominale de 1 km soit complétée et accessible facilement dans le futur.

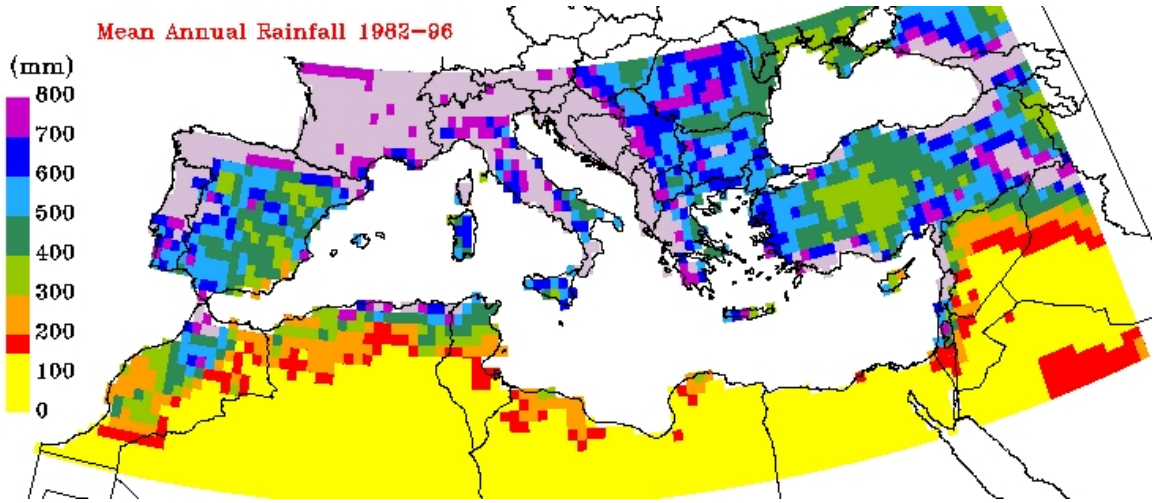


FIGURE 4 Répartition de la pluviosité annuelle moyenne (1982-1996) dans le bassin méditerranéen. *Spatial pattern of mean annual rainfall (1982-1996) in the Mediterranean basin.*

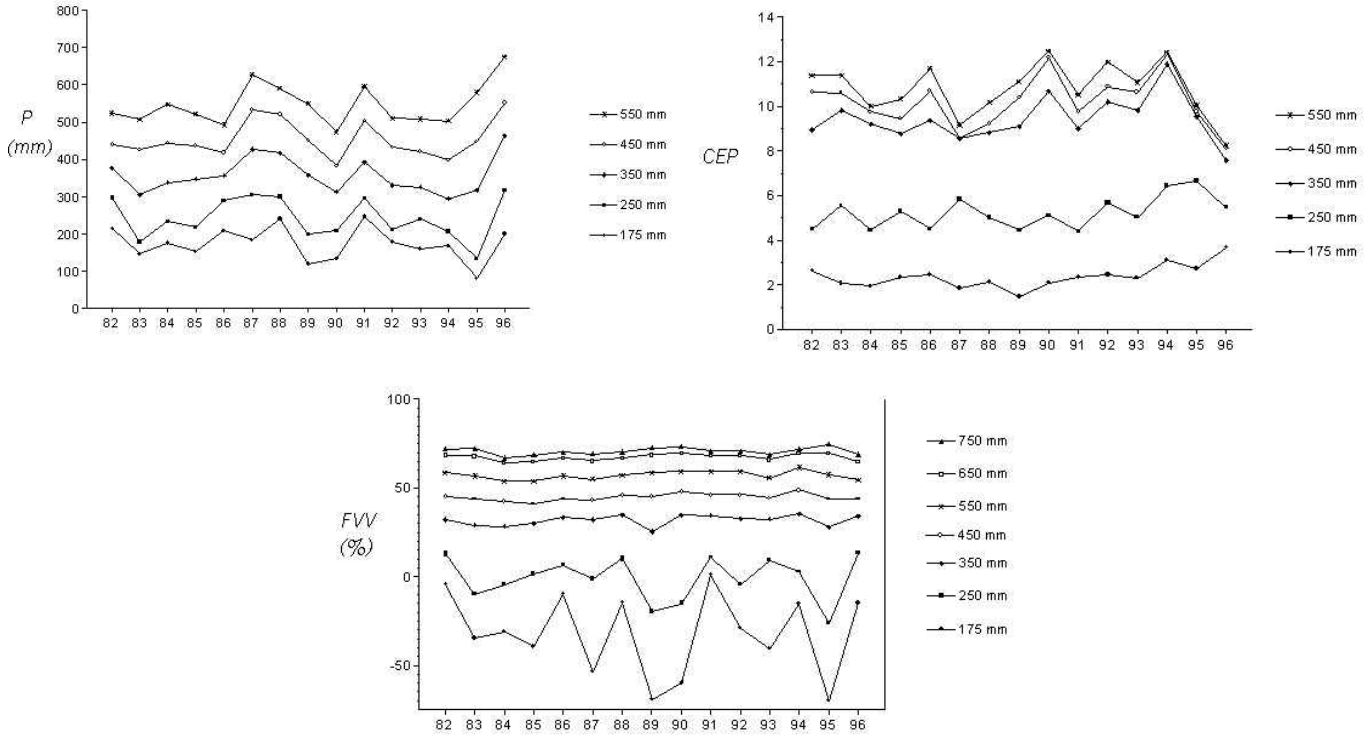


FIGURE 5 Valeurs annuelles moyennes de la pluviosité, de la fraction végétation verte et du coefficient d'efficacité pluviale obtenues d'après un zonage du Bassin méditerranéen selon des valeurs croissantes de pluviométrie annuelle moyenne (voir figure 4). *Mean annual values of rainfall, green vegetation fraction and rain-use efficiency according to a partition of Mediterranean basin into increasing annual rainfall values (see figure 4).*

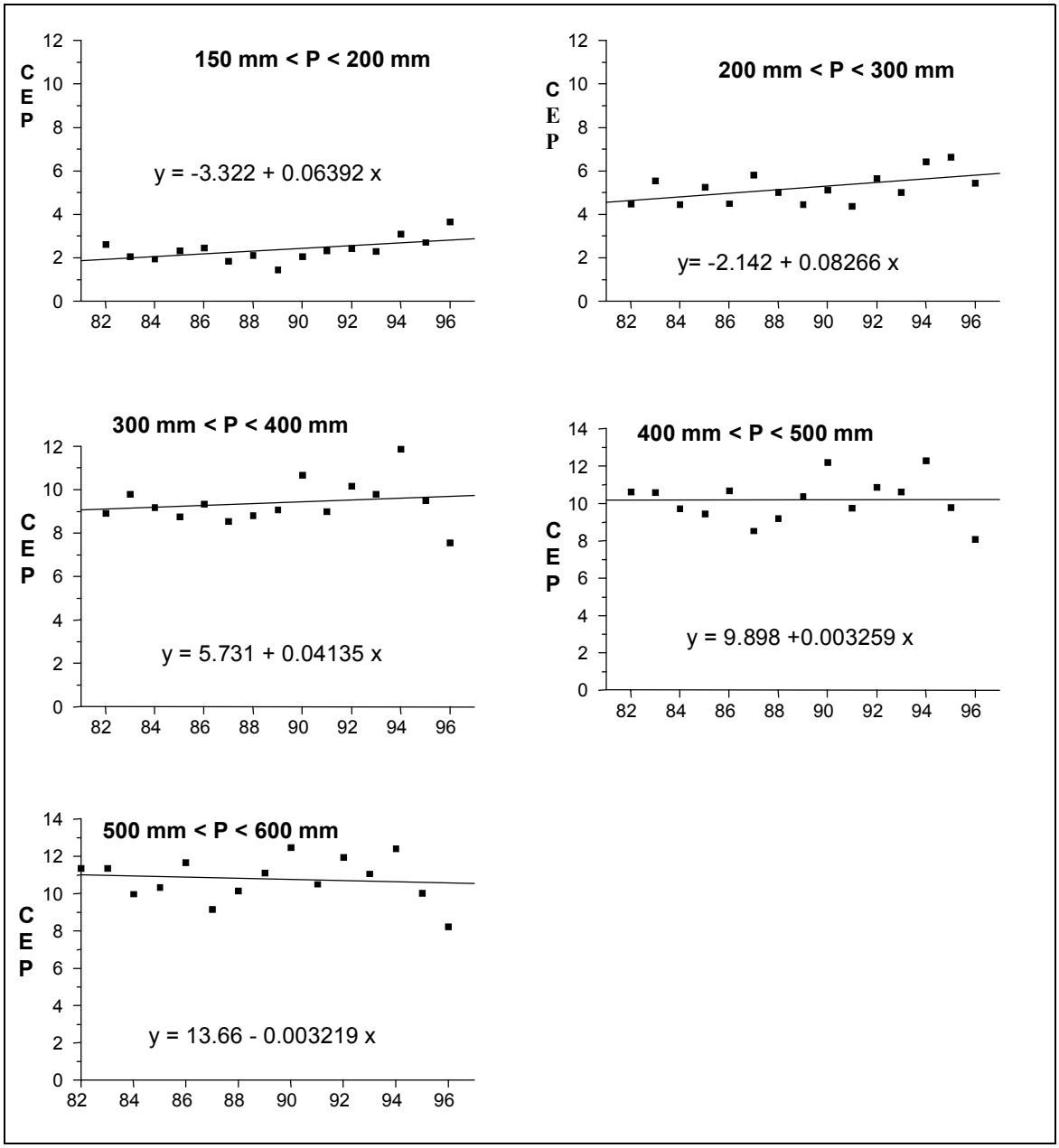


FIGURE 6 Évolution du coefficient d'efficacité pluviale de 1982 à 1996 pour 5 zones de pluviométries moyennes annuelles croissantes de 175 à 750 mm.an^{-1}. *Trends of rain-use efficiencies for zones of increasing mean annual rainfall during the 1982-1996 period.*

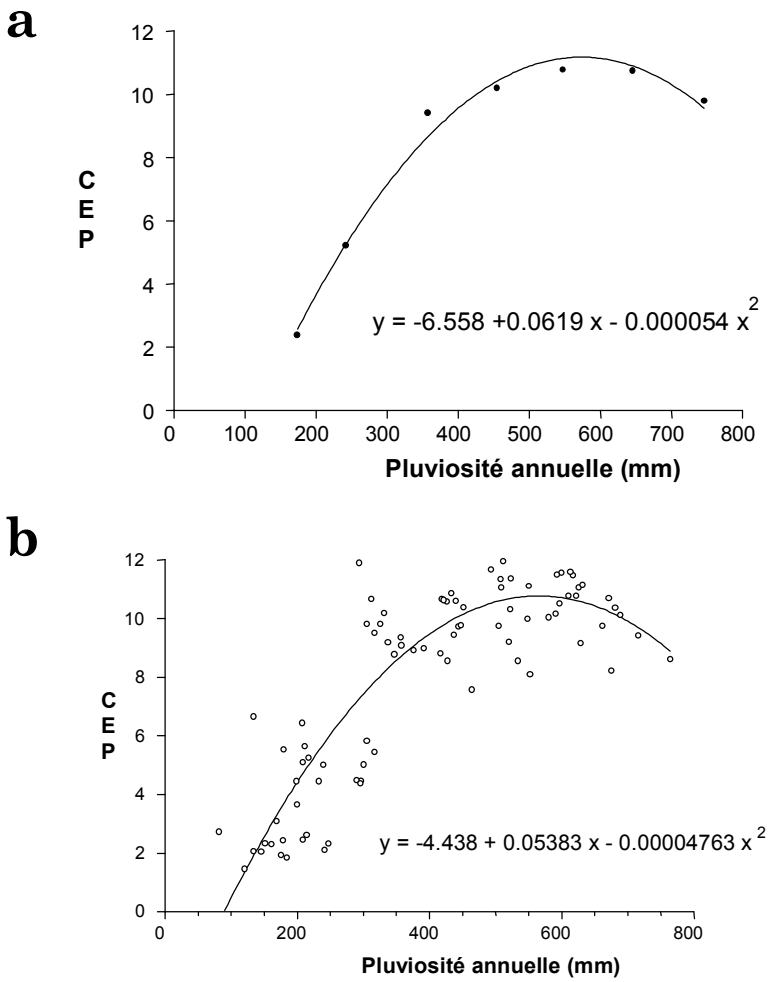


FIGURE 7 Relations entre pluviosité annuelle et coefficient d'efficacité pluviale dans le Bassin méditerranéen. *Relationships between annual rainfall and rain-use efficiencies in the mediterranean basin.* a) valeurs moyennes sur 15 ans pour les 7 zones de pluviométrie croissantes. *Mean values of 15 years* ; b) ensemble des 15 valeurs annuelles de 1982 à 1996 pour les 7 zones. *Annual values from 1982 to 1996.*

TABLEAU 1. Valeurs moyennes de la pluviosité, de la fraction végétation verte (FVV) et du coefficient d'efficacité pluviale (CEP) obtenues pour un zonage du Bassin méditerranéen réalisé selon des pluviométries annuelles moyennes croissantes (voir figure 3). *Mean values of rainfall, green vegetation fraction (FVV) and rain-use efficiency (CEP) obtained from a partition of Mediterranean basin according to increasing mean annual rainfall (see figure 3).*

Tranche pluviométrique ($mm.an^{-1}$)	Nombre de pixels (8 km × 8 km)	Pluviosité moyenne ($mm.an^{-1}$)	FVV moyenne (%)	CEP_{fvv} = 100 * FVV/Pluie
150 à 200	4 008	174	4,12(*)	2,37
200 à 300	4 618	242	12,61(*)	5,21
300 à 400	5 457	357	33,59	9,41
400 à 500	10 804	454	46,27	10,19
500 à 600	11 111	547	59,02	10,79
600 à 700	6 823	645	69,27	10,74
700 à 800	5 176	746	73,11	9,80

(*) Dans le calcul de la moyenne, les valeurs négatives de FVV ont été considérées égales à zéro.

Remerciements

Les travaux ont été réalisés dans le cadre du projet MODEM-RSM (*Demonstration of an integrated concept for monitoring desertification in the Mediterranean Basin based on remote sensing methods*) coordonné par S. Sommer, avec un financement de la Communauté Européenne (DG Science, Recherche et Développement).

Références

Adams, J.B., Smith, M.O. and Johnson P.E. (1986) Spectral mixture modelling : a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 Site. *Journal of Geophysical Research,* vol. 91 (B8), p. 8098-8112.

Haboudane, D., Bonn, F., Royer, A., Sommer, S. and Mehl, W. (2000) Land degradation assessment in a semi-arid environment through the use of spectral indices and spectral unmixing. *In* J.L. Casanova (ed.) Remote Sensing in the 21st century : Economic and Environmental Applications. A. A. Balkema, Rotterdam/Brookfield, p. 407-414.

Hill, J., Hostert, P., Röder, A. Udelhoven, T., Tsiourlis, G. and Kasapidis, P. (2000) Employing calibrated long time-series of EOS data for retrospective studies of grazing induced land degradation: the DeMon-II project. *In* M.F. Buchroitner (ed.) A Decade of Trans-European Remote Sensing Cooperation. A.A. Balkema, Lisse (The Netherlands), p. 341-346.

Hill, J., Sommer, S., Mehl, W. and Mégier, J. (1996) A conceptual framework for mapping and monitoring the degradation of Mediterranean ecosystems with remote sensing. *In* J. Hill and D. Peter (eds) The use of remote sensing for land degradation and desertification monitoring in the Mediterranean basin : state of the art and future research. Environment and Climate Program, report EUR 16732. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, p. 23-43.

Lacaze, B., Caselles, V., Coll, C., Hill, J., Hoff, C., de Jong, S., Mehl, W., Negendank, J.F. W., Riezebos, H., Rubio, E., Sommer, S., Teixeira Filho, J. and Valor, E. (1996) Integrated approaches to desertification mapping and monitoring in the Mediterranean basin. Final Report of DeMon 1 Project. European Commission, Bruxelles/Luxembourg, 176 p.

Legates, D.R. and Willmott, C.J. (1990) Mean seasonal and spatial variability in gauge corrected global precipitation. *International Journal of Climato*logy, vol. 10, p. 111-127.

Le Houérou, H.-N. (1984) Rain-Use efficiency : a unifying concept in arid land ecology. *Journal of Arid Environments,* vol. 7, p.1-35.

Le Houérou, H.-N. (1987) Aspects météorologiques de la croissance et du développement végétal dans les déserts et les zones menacées de désertification. Rapport WMO/TD-N°194. Organisation Météorologique Mondiale, Genève, 59 p.

Le Houérou, H.-N. (1992) Relations entre la variabilité des précipitations et celle des productions primaire et secondaire en zone aride. *In* E. Le Floc'h, M. Grouzis, A. Cornet et J.-C. Bille (réd.) L'aridité : une contrainte au développement. ORSTOM Éditions, Paris, série Didactiques, p. 197-220.

Le Houérou, H.-N., Bingham, R. E. and Skerbek W. (1988) Relationship between the variability of primary production and the variability of annual precipitations in world arid lands. *Journal of Arid Environments,* vol. 15, p. 1-18.

Meliá, J. (1996). Use of soil and rock spectral signatures for natural vegetation cover estimation. *In* J. Hill and D. Peter (eds) The use of remote sensing for land degradation and desertification monitoring in the Mediterranean basin : state of the art and future research. Environment and Climate programme, Report EUR 16732. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, p. 183-198.

NASA/GSFC (2002) *Global Land Biosphere Data and Resources*. http://daac.gsfc.nasa.gov/CAMPAIGN_DOCS/LAND_BIO/Pathfinder_Outline.html

Nemani, R.R. and Running, S.W. (1989) Testing a theoretical climate-soil-leaf area hydrologic equilibrium of forests using satellite data and ecosystem simulation. *Agricultural and Forest Meteorology,* vol. 44, p. 245-260.

Nicholson, S.E., Tucker, C.J. and Ba, M.B. (1998) Desertification, drought, and surface vegetation : an example from the West African Sahel. *Bulletin of the American Metorological Society,* vol. 79, p. 815-829.

Prince, S.D. (1991) Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981-88. *International Journal of Remote Sensing,* vol. 12, p. 1301-1311.

Prince, S.D. and Goward, S.N. (1995) Global primary production : a remote sensing approach. *Journal of Biogeography,* vol. 22, p. 815-835.

Prince, S.D., Brown de Colstoun, E. and Kravitz, L.L. (1998) Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification. *Global Change Biology,* vol. 4, p. 359-374.

Rosema, A. and Roozekrans, H. (1996). Practical approaches to desertification monitoring using meteorological satellite data. *In* J. Hill and D. Peter (eds) The use of remote sensing for land degradation and desertification monitoring in the Mediterranean basin : state of the art and future research. Environment and Climate Program, report EUR 16732. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, p. 95-112.

Quézel, P. (2000) Réflexions sur l'évolution de la flore et de la végétation au Maghreb méditerranéen. Ibis Presse, Paris, 117 p.

Smith, M.O., Ustin, S.L., Adams, J.B. and Gillespie, A.R. (1990) Vegetation in deserts : I. A regional measure of abundance from multispectral images. *Remote Sensing of Environment,* vol. 31, p.1-26.

Tucker, C.J. and Nicolson, S.E. (1999) Variations in the size of the Sahara, 1980 to 1997. *Ambio*, vol. 28, p. 587-591.

University of Delaware (2002) *List of available climate data archives*. http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/archive.html

USGS/LPDAAC (2002) Global Land 1km AVHRR Project. http://edcdaac.usgs.gov/1KM/1kmhomepage.html