

## *Albédo et pluviométrie dans le Sahel*

### INTRODUCTION

L'albédo de surface, qui correspond à la réflectance sur l'ensemble du domaine spectral du rayonnement solaire, permet de caractériser les surfaces en fonction de l'énergie qu'elles réfléchissent. Ce paramètre climatique, lié aux propriétés physiques et à l'état des surfaces, est mesurable par télédétection satellitaire. L'utilisation de différents satellites, qui enregistrent à des échelles diverses les signaux électromagnétiques émis par les objets terrestres, permet, après traitement et normalisation des données, de mesurer et de surveiller les modifications de réflectance des sols.

À partir des données enregistrées par les satellites Landsat ou Meteosat, les mesures de l'albédo de surface des régions sahéliennes ont permis de mettre en évidence les changements survenus sur l'ensemble de la région entre 1972 et 1982 (COUREL, 1985).

### RELATION ENTRE ALBÉDO ET PLUVIOMÉTRIE : L'HYPOTHÈSE DE CHARNEY

Dans les régions semi-arides, l'accroissement de la réflectivité des surfaces, la plupart du temps, est la marque de l'érosion et de la dégradation du milieu.

Le physicien CHARNEY (1975 ; *et al.*, 1975, 1977) a voulu expliquer l'apparition et le maintien de la sécheresse dans le Sahel par l'altération de l'albédo de surface. D'après lui, les activités agricoles et pastorales dans le Sahel ont entraîné la destruction de la végétation et elles ont provoqué ainsi un accroissement de la réflectivité des sols.

L'augmentation de l'albédo de surface entraîne une perte radiative nette, qui est compensée par un accroissement de la subsidence de l'air. Cette forte subsidence réduit d'autant les phénomènes convectifs susceptibles d'engendrer les pluies. La diminution, la rareté, voire l'absence de pluie, qui résultent de ce processus, conduisent à l'appauvrissement de la végétation restante, qui favorise et entretient alors l'effet positif de rétroaction. Ce mécanisme a été mis en évidence à partir de simulations réalisées dans le modèle de circulation générale de l'atmosphère du *Goddard Institute for Space Studies* (Giss) (CHARNEY, 1975 ; CHARNEY *et al.* 1977). La valeur initiale de l'albédo, fixée à 14 %, a été portée à 35 % sur la région sahélienne. Cette augmentation arbitraire de 20 % entraîne dans le modèle une réduction significative des précipitations de l'ordre de 45 % sur le Sahel. Les expériences de simulation, menées par la suite par différentes équipes (CHERVIN, 1979 ; SUD et FENESSY, 1982 ; PICON, 1983), confirment les résultats qualitatifs obtenus par CHARNEY.

À partir de ces résultats théoriques, l'auteur n'hésite pas à désigner les activités humaines comme le facteur déterminant de la sécheresse au Sahel.

Plusieurs questions se posent alors :

- l'albédo du Sahel est-il réellement de 14 % et celui des régions sahariennes de 35 % ?

- la dénudation des sols qui résulte des pratiques culturales a-t-elle effectivement provoqué une augmentation de 20 % de la réflectance des sols dans le Sahel ?

- la modification arbitraire d'un seul paramètre, tel que l'albédo, sans faire varier parallèlement d'autres paramètres comme le bilan hydrique au sol, est-elle réaliste ?

Les travaux présentés dans cet article ont pour but de répondre à tout ou partie de ces questions, en s'appuyant sur des données qui portent sur une période de dix années.

## LES MESURES D'ALBÉDO À PARTIR DES DONNÉES SATELLITAIRES

Elles portent sur la période qui s'étend de 1967 à 1984.

Nous avons utilisé pour la période 1967-1974 les valeurs établies par NORTON *et al.* (1979), à partir des enregistrements du satellite météorologique ATS 3 sur le Sahel et sur le Sahara.

Nous avons traité et analysé les données Landsat 1, 2 et 3 entre 1972 et 1984 (COUREL, 1984), sur 4 régions caractéristiques du domaine sahélien : le Ferlo au Sénégal, le Gondo au Mali, l'Oudalan au Burkina Faso et la région du lac Faguibine au Mali (fig. 1).

Les données Meteosat traitées par KANDEL (1982) concernent la période qui va d'août 1978 à novembre 1979.

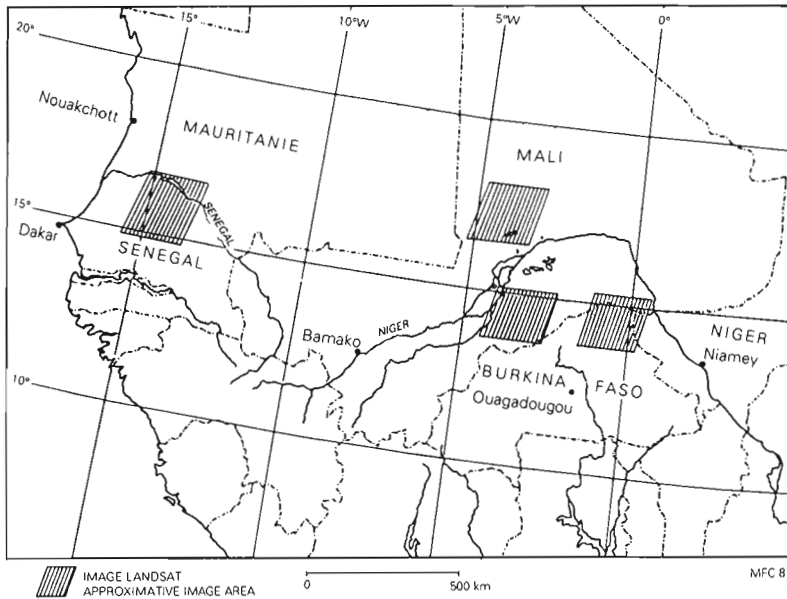


FIGURE 1 - Afrique de l'Ouest - Sahel.

L'étalonnage des données des différents satellites a été vérifié sur le secteur stable que représente l'Aklé Awana au Mali, région constituée de sables blancs vifs (COUREL, 1984). Ces 3 séries de mesures nous ont permis de montrer que les valeurs d'albédo obtenues à partir de satellites différents étaient cohérentes, et de vérifier que l'albédo de l'Aklé Awana ne variait pas dans le temps (fig. 2).

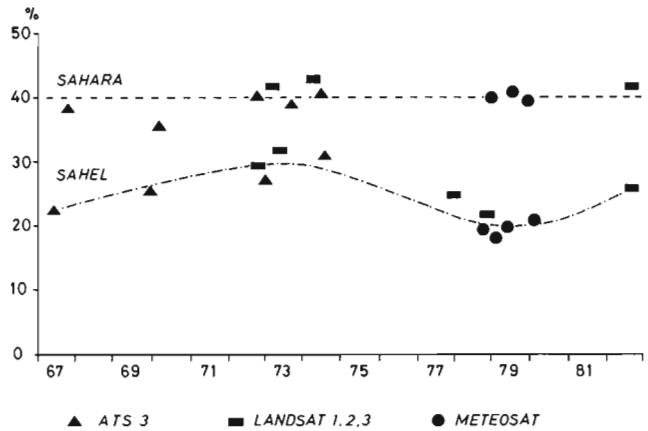


FIGURE. 2 - Variations interannuelles de l'albédo.

## RÉSULTATS

Les principaux résultats de cette étude montrent que :

- l'albédo du Sahara avoisine les 50 % dans ses secteurs les plus brillants ;
- l'albédo moyen, pour la région située entre 18° et 23° de latitude nord et entre 0° et 10° de longitude ouest, est de  $42 \pm 4$  % (COUREL *et al.*, 1984). Ces valeurs sont plus élevées que celles utilisées dans le modèle (35 %) et que celles attribuées aux secteurs désertiques (BUDYKO, 1969 ; HUMMEL et RECK, 1979).

Elles concordent avec celles qui ont été relevées sur d'autres secteurs désertiques, dans le Sinaï, au Mexique et en Arabie (OTTERMAN et FRASER, 1976 ; OTTERMAN, 1981 ; ROBINOVE *et al.*, 1981, SMITH et WONDER HAAR, 1983).

Pour ce qui est des régions sahéniennes, les travaux de Norton établissent que l'albédo passe de 20 %, en 1967, à 30 %, en 1974, valeurs confirmées par les mesures Landsat en 1974 sur les mêmes régions.

Les données Landsat et Meteosat indiquent, pour l'ensemble du Sahel occidental, une diminution de l'ordre de 10 %, entre 1974 et 1979, et une nette augmentation à partir de 1982 (fig. 2).

## CAUSES DE VARIATION DE L'ALBÉDO DANS LE SAHEL

Dans le Sahel, les variations interannuelles de l'albédo sont conditionnées par les changements d'état de la steppe arbustive. Le tapis herbacé, élément caractéristique de cette formation végétale, est composé essentiellement d'espèces annuelles à cycle court : 70 à 90 jours. Leur production est optimale lorsque les pluies assurent les ressources hydriques journalières indispensables (BILLE et POUPON, 1974 ; HIERNAUX, 1984) :

- d'une part à la germination des graines et à l'installation des plantules ( $3 \text{ mm.j}^{-1}$ ) ;
- d'autre part à la croissance complète de la plante ( $5 \text{ mm.j}^{-1}$ ).

La régénération et la productivité du tapis herbacé dépendent donc davantage de la distribution que de l'abondance totale des pluies estivales. Citons le cas de la région de Linguère-Labgar dans le Ferlo méridional. En 1981, les valeurs mesurées de la biomasse et de l'albédo ont été respectivement de 1 100 kg.MS<sup>-1</sup>.ha<sup>-1</sup> et de 20 % ; en 1984, elles passaient à 150 kg.MS<sup>-1</sup>.ha<sup>-1</sup> et à plus de 30 %, alors que la station de Linguère a enregistré des hauteurs de pluies identiques ces années-là : 376,7 et 373,7 mm.

Si, en 1981, la distribution des pluies fut assez bonne, elle fut très mauvaise en 1984, comme le montrent le tableau 1 et la figure 3.

Tableau 1 - Distribution des pluies en 1981 et 1984 à Linguère (Sénégal)

Année	Durée moyenne des périodes sèches entre deux pluies*	Disponibilités hydriques journalières moyennes
1981	3,9 j	4,8 mm. j <sup>-1</sup>
1984	6,6 j	2,9 mm. j <sup>-1</sup>

\* Pendant la saison des pluies

Les germinations avortées et la diminution de la taille des végétaux, induites par des interruptions prolongées des pluies en 1984, expliquent la très faible productivité de la strate herbacée pour le Ferlo.

En 1985, la situation est différente. La distribution correcte de la pluviométrie a permis la croissance des herbacées jusqu'en fin de cycle. On a pu observer des productions supérieures à 1 500 kg.MS<sup>-1</sup>.ha<sup>-1</sup> sur des secteurs restés totalement nus en 1984, d'après les observations que nous avons effectuées sur le terrain en octobre 1985 au Mali.

Il apparaît donc clairement qu'il ne peut y avoir de relation simple entre biomasse et total pluviométrique, ce qui implique également qu'il ne puisse y avoir une relation simple entre total pluviométrique et albédo (fig. 4).

Pour compléter ces observations globales, le suivi de l'évolution du couvert végétal du Sahel malien a été effectué, sur l'ensemble de la saison des pluies 1986, à partir des images Noaa-AVHRR et de l'estimation de l'indice de satisfaction des besoins en eau (ISBE) (FOREST, 1984) ; l'ISBE a été calculé à l'aide d'un modèle agrométéorologique qui fonctionne avec les précipitations quotidiennes relevées par les stations sahéliennes (COUREL *et al.*, 1988).

La figure 5 présente la relation entre l'indice de végétation, calculé à partir des images Noaa, et l'ISBE d'une jachère d'herbe. Les cas présentés concernent des secteurs proches des stations de Gossi, Hombori, Gao, Diré et Koro. On constate dans tous les cas, une relation étroite entre l'indice de végétation et l'ISBE.

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 de 0,1, ce qui est en bon accord avec les mesures de biomasse sur secteur dunaire dans la région de Gossi (entre 20 et 461 kg.ha<sup>-1</sup>, d'après les données fournies par le Centre international pour l'élevage en Afrique (Cipea).

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 trente jours. Après le 20 août, la décroissance de l'indice marque le début du dessèchement de la végétation herbacée.

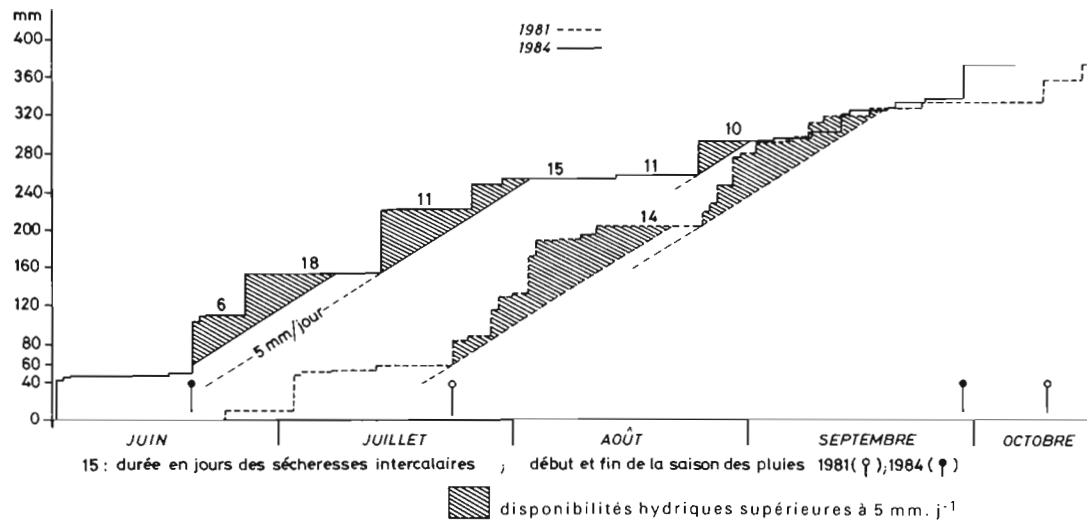
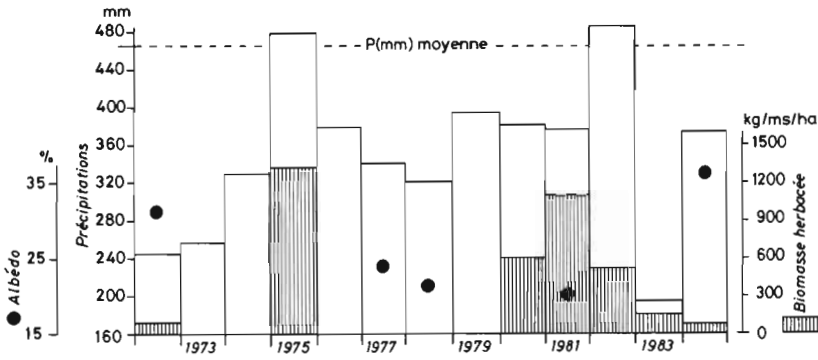


FIGURE. 3 - Pluies journalières cumulées des saisons des pluies 1981 et 1984 - Station de Linguère (Ferlo) Sénégal.



NB : seules les valeurs mesurées d'albédo et de biomasse sont ici portées.

FIGURE. 4 - Variations interannuelles des précipitations, de la biomasse herbacée et de l'albédo dans le Ferto (Sénégal). Station météorologique de référence : Linguère.

Sur cette région, les données de terrain indiquent une productivité importante en juillet, qui va de 24 à 30 kg MS.ha<sup>-1</sup>.j<sup>-1</sup>. La biomasse herbacée disponible en fin de saison des pluies varie entre 1 892 et 2 563 kg MS.ha<sup>-1</sup>.

Ainsi, à partir de ces différents résultats, il apparaît que l'établissement d'une relation entre albédo de surface et pluviométrie dans le Sahel doit nécessairement passer par l'analyse de la distribution de l'eau qui préside à l'installation et à la croissance de la végétation herbacée.

## DISCUSSION

La diminution de l'albédo de surface sur l'ensemble du Sahel, constatée à la suite des très fortes valeurs atteintes en 1972 et en 1973, est en contradiction avec le mécanisme de rétroaction biogéophysique de CHARNEY. De même que les fortes valeurs de 1973 n'ont pas eu pour effet d'accroître le déficit pluviométrique et la sécheresse, la diminution de l'albédo entre 1974 et 1979 n'a pas entraîné l'amélioration réelle de la pluviométrie, comme l'attestent les déficits très élevés et généralisés des années 1982 et 1983.

Toutes les modifications de l'albédo mesurées dépassent rarement 10 % et n'atteignent jamais 15 %. Ces valeurs sont très inférieures aux changements imposés dans les modèles ; elles sont insuffisantes pour sensibiliser le modèle au niveau de la circulation générale.

L'expérience menée par HENDERSON-SELLERS et GORNITZ (1984), sur les impacts climatiques éventuels des transformations du couvert végétal, a montré que le remplacement de la forêt tropicale humide brésilienne par un couvert herbacé et cultivé, sur une surface de 4,94 x 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>, a entraîné une augmentation de l'albédo de surface de 6% et, localement, l'altération de plusieurs paramètres climatiques, mais aucun impact majeur sur la circulation régionale ou générale.

GORNITZ (1985), dans son étude sur les changements dus à des actions anthropiques sur la végétation en Afrique occidentale durant le siècle dernier, montre qu'elles ont entraîné une augmentation de l'albédo de surface de 0,4 % sur cent ans, sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest. En supposant une désertification totale des régions

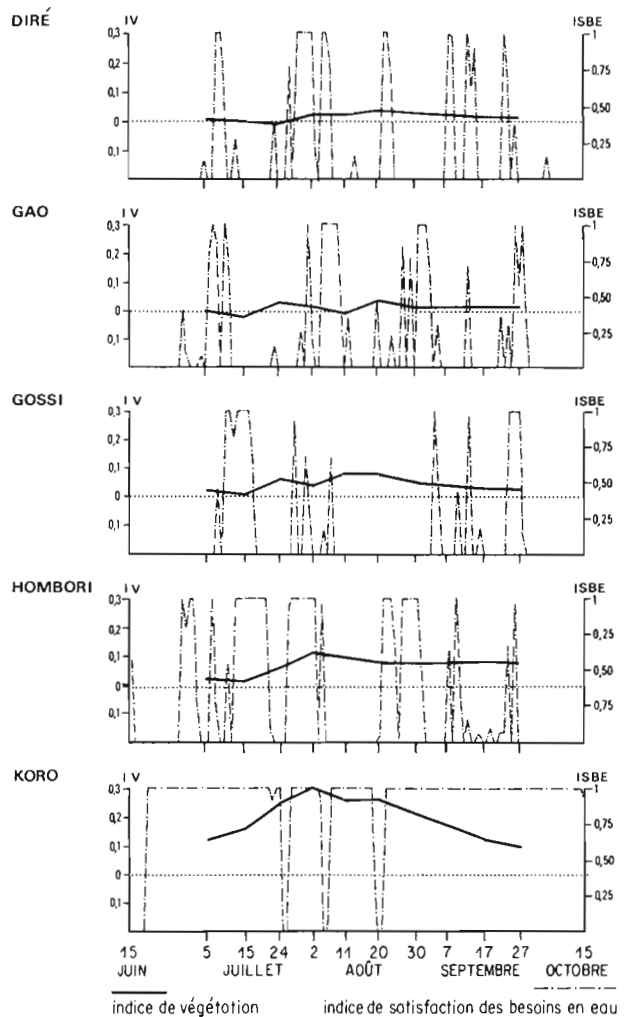


FIGURE. 5 - Relation entre l'indice de végétation (IV) et l'indice de satisfaction des besoins en eau (ISBE) pour quelques stations sahéliennes.

sahéliennes, les changements d'albédo atteindraient un maximum de 4,3 %. Ces résultats sont largement inférieurs aux variations interannuelles dues à des causes naturelles (COUREL, 1984). Par ailleurs, au cours de cette décennie, dans des secteurs totalement protégés des actions humaines et dans des secteurs où l'impact des populations est négligeable, on a pu observer une modification de l'organisation de la végétation qui montre une adaptation à des conditions hydriques caractéristiques d'une aridité accrue (COUREL, 1985b).

Il faut noter également que la paramétrisation de l'humidité du sol, dans l'expérience de CHARNEY, est loin de la réalité et simule une évaporation irréaliste sur l'ensemble du Sahel. ROWNTREE (1982) a mis en évidence la complexité du paramètre «sol» et il a

montré, lorsqu'on démarre l'expérience avec un sol sec (ce qui est la réalité sahélienne), que l'on termine avec un sol sec, quelles que soient les variations imposées à l'albédo de surface. D'où la nécessité de coupler l'albédo et l'humidité du sol dans ces simulations.

Un dernier point de discussion sur l'hypothèse de CHARNEY porte sur l'analyse historique. Le mécanisme de rétroaction suggéré devrait induire une évolution progressive vers une pluviométrie de plus en plus faible. Or, les régions sahélo-soudaniennes ont connu, depuis le début de notre ère, une alternance irrégulière de phases plus humides ou plus sèches que la phase actuelle. Les régions de forêts du littoral du golfe du Bénin, dont l'exploitation est plus récente, ont connu une évolution identique. Compte tenu de ce que l'on sait de la circulation au-dessus de l'Afrique de l'Ouest, ces fluctuations ne peuvent être attribuées qu'à la circulation atmosphérique et aux caractères variables de certains de ses éléments (jets intertropicaux, notamment).

À l'échelle géologique, et même si on réduit celle-ci aux quinze derniers millénaires, on sait que l'évolution climatique de l'espace saharo-sahélien a été marquée par :

- un aride très important entre 18 000 et 10 000 BP ;
- un pluvial entre 10 000 et 3 000 BP ;
- des épisodes pluviaux et des épisodes secs, de durée et d'intensité variables, qui se sont succédé de 3 000 BP à nos jours (CHAMARD, 1970 ; CHAMARD et MORIN, 1973 ; PETIT-MAIRE, 1982 ; DURAND et LANG, 1986).

Au moment de l'aride, le Méga-Sahara incluait le Sahel et ses limites coïncidaient avec l'isohyète moyen actuel 700 mm (TALBOT, 1984). Cette extension considérable des déserts peut-elle être attribuée à l'action de l'homme ?

Le pluvial a débuté aux environs de 10 000 BP ; la zone sahélienne s'est translátée vers le nord de près de 10° de latitude (sinon plus). Pendant ce pluvial, dans le Sahara des lacs, des groupes humains sédentaires pratiquaient la chasse, la pêche, la cueillette, mais aussi une agriculture et un élevage très extensif. Il est donc peu probable que les groupes néolithiques aient été à l'origine du Sahara actuel par la dégradation de leur environnement.

## CONCLUSION

Les variations de l'albédo dans le Sahel sont déterminées par les modifications de la couverture herbacée dont la production dépend de la distribution des ressources hydriques au cours de la saison des pluies. C'est la raison pour laquelle il n'y a qu'une très mauvaise relation entre un total pluviométrique et une valeur d'albédo.

Nous savons que l'humidité, dans le Sahel comme sur l'ensemble de l'Afrique occidentale, est le fait de pluies imputables à l'advection d'air humide d'origine allochtone. Ceci explique pourquoi des déficits pluviométriques plus ou moins importants ont été observés, tant dans les régions sahéliennes que dans les régions de savane et de forêt.

Il apparaît clairement que les causes de ces sécheresses relèvent davantage d'anomalies de la circulation générale de l'atmosphère que de modifications ponctuelles de l'état des surfaces attribuées de façon abusive à l'homme.



## BIBLIOGRAPHIE

- BILLE (J.-C.) et POUPON (H.), 1974. - La régénération de la strate herbacée. Recherches écologiques sur une savane sahélienne du Ferlo septentrional, Sénégal. *Rev. Ecol. Appl.*, t. 28, n° 1 : 21-48.
- BUDYKO (M. I.), 1969. - The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth. *Tellus*, 21 : 611-619.
- CHAMARD (Ph. C.), 1970. - Le bassin versant de la sebkha de Chemchane. Adrar de Mauritanie. Étude de géomorphologie. Thèse de doctorat de 3<sup>e</sup> Cycle, université de Dakar, 202 p., 2 cartes h. t., Dakar, 1970.
- CHAMARD (Ph. C.) et MORIN (S.), 1973. - Grès calcaires et grès ferrugineux de la tête de la presqu'île du Cap-Vert. *Trav. et Doc. Géogr. tropicale*, n° 8 : 1-27, a pl. phot., Talence.
- CHARNEY (J. G.), 1975. - Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quat. J. Roy. Meteor. Soc.*, 101 : 193-202.
- CHARNEY (J. G.), SONE (P. H.) et QUIRT (W. J.), 1975. - Drought in the Sahara : a biogeophysical feedback mechanism. *Science* 187 : 434-435.
- CHARNEY (J. G.), QUIRT (W. J.), CHOW SHU HSIEN et KORNEFIELD (J.), 1977. - A comparative study of albedo change on drought in semi-arid regions. *J. Atm. Sc.*, vol., 34 : 1366-1385.
- CHERVIN (R. M.), 1979. - Response of the NCAR General Circulation Model to changed land surface albedo. Report of the JOC Study Conference on Climate Model, vol. 1, *GARP Publications*, Serie n° 22.
- COUREL (M.-F.), 1985a. - Étude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse de doctorat d'État, Université Paris I, publiée par le Centre scientifique IBM France. Paris.
- COUREL (M.-F.), 1985b. - La contraction des ligneux, adaptation de la végétation à la sécheresse récente. *Revue Photo-Interprétation*, n° 1, fasc. 2.
- COUREL (M.-F.), CUQ (F.) et TOUNSI (I.), 1988. - Suivi de l'évolution des pâturages du Sahel malien. *Revue Mappemonde* n° 88-2.
- COUREL (M.-F.) et KANDEL (R. S.), 1985. - Le Sahel est-il responsable de sa sécheresse ? *La Recherche*, n° 158, septembre 1984. vol. 15 : 1152-1154.
- COUREL (M.-F.), KANDEL (R. S.) et RASOOL (S. I.), 1984. - Surface albedo and the Sahel drought. *Nature*, vol. 307, n° 5951, 9-15 Feb.
- DURAND (A.) et LANG (J.), 1986. - Approche critique des méthodes de reconstitution paléoclimatique : le Sahel nigéro-tchadien depuis 40 000 ans. *Bull. Soc. Géol. France*, (8), t. II, n° 2 : 267-278, Paris.
- FOREST (F.), 1984. - Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Rapport Cirad, Montpellier, *multigr.*
- GORNITZ (V.), 1985. - A survey of anthropogenic vegetation changes in West Africa during the last Century-Climatic implications. *Climatic Change* 7 (1985) : 285-325. 0165-0009/85/15.
- HENDERSON-SELLERS (A.) et GORNITZ (V.), 1984. - Possible climatic impacts of land cover transformations, with particular emphasis on tropical deforestation. *Climatic Change* 6 (1984), 231-257.
- HIERNAUX (P.), 1984. - Distribution des pluies et production herbacée au Sahel : une méthode empirique pour caractériser la distribution des précipitations journalières et ses effets sur la production herbacée. Premiers résultats acquis pour le Sahel malien. Doc du Programme n° AZ98, CIPEA, Bamako.
- HUMMEL (J. R.) et RECK (R. A.), 1979. - A global surface albedo model. *J. Appl. Meteor.*, 18 : 239-253.
- KANDEL (R.), 1982. - Satellite observation of the Earth radiation budget. International Symposium of the Deutsche Meteorologische Gesellschaft.

- NORTON (C. C.), MOSHER (F. R.) et HINTON (B.), 1979. - An investigation of surface albedo variations during the recent Sahel drought. *J. Appl. Meteor.*, vol., 18 : 1252-1262.
- OTTERMAN (J.), 1981. - Satellite and field studies of man's impact on the surface in arid region. *Tellus*, 33 : 68-77
- OTTERMAN (J.) et FRASER (R.S.), 1976. - Earth atmosphere system and surface reflectivities in arid regions from Landsat MSS data. *Remote Sensing of Environment*, 5 : 247-266.
- PETIT-MAIRE (N.), 1982. - Le Shati, lac pléistocène du Fezzan. Publ. CNRS, 118 p., Marseille.
- PICON (L.), - 1983. Étude de l'influence de l'albédo du sol dans les phénomènes de désertification au Sahel à l'aide du modèle de circulation générale du LMD. Thèse de doctorat de 3<sup>e</sup> Cycle, université Paris-VII, 78 p., 67 fig., Paris.
- ROBINOVE (C. J.), CHAVEZ (P. S) Jr, GERHING (D.) et HOLGREN (R.), 1981. - Arid land monitoring using Landsat albedo difference images. *Remote Sensing of Environment*, vol. II : 133-156.
- ROWNTREE (P. R.), 1982. - Numerical experiments relevant to the Sahel drought. Met. Off. 20, *Technical note* II/178.
- SMITH (E. A.) et WONDER HAAR (T. H.), 1983. - Satellite measurements and analysis of the radiation budget, cloudiness, and precipitation over Monex. 1st year final Report, NSF Grant ATM-8200808 1/04/1982-31/03/1983, Dept. of Atm. Sci., Colorado State University, Fort Collins.
- SUD (Y.C.) et FENESEY (M.), 1982. - A study of the influence of surface albedo on July circulation in semi-arid regions using the GLAS GCM. *J. of Climat.*, 2 : 105-125.
- TALBOT (M. R.), 1984. - Late pleistocene rainfall and dune building in the Sahel. *Palaeoecology of Africa*, 16 : 203-214.