

UTILISATION D'UNE SÉRIE TEMPORELLE DE DONNÉES-SATELLITE NOAA-AVHRR POUR LE SUIVI HYDROLOGIQUE DES GRANDS FLEUVES EN AFRIQUE DE L'OUEST

S. GEFFARD¹

RÉSUMÉ

L'intérêt d'utiliser les informations tirées des données-satellite NOAA-AVHRR dans le cadre du suivi du régime hydrologique des fleuves en Afrique de l'Ouest est évalué au travers de la confrontation entre la dynamique saisonnière des indices radiométriques et le bilan hydrologique annuel. Les bassins versants étudiés, répartis dans 3 domaines bioclimatiques d'Afrique de l'Ouest, présentent des superficies de l'ordre de 3 000 km² à 17 000 km². Les indices radiométriques utilisés pour suivre la dynamique des états de la surface sont l'indice de végétation NDVI et le compte numérique du canal 3. La série des données GAC (résolution 4 km) permet de comparer 5 années d'observations. Deux paramètres traduisant l'évolution saisonnière de la végétation sont comparés à la différence annuelle entre précipitations et écoulement, assimilée dans le cas présent à l'évapotranspiration annuelle. Le premier paramètre est le cumul des moyennes mensuelles de NDVI en début de saison des pluies ; le second est le gradient du compte numérique du canal 3 en fin de saison des pluies. Le cumul des moyennes mensuelles de NDVI peut permettre d'estimer un intervalle dans lequel situer, à l'échelle régionale, la valeur moyenne interannuelle du déficit d'écoulement. La pente d'évolution du compte numérique du canal 3 en fin de saison des pluies traduit les valeurs annuelles de la différence entre précipitations et écoulement.

¹Laboratoire d'Hydrologie, Orstom, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1, France.

INTRODUCTION

En Afrique de l'Ouest, l'intensification des activités humaines ajoutée aux récentes catastrophes climatiques se traduit par des modifications profondes de l'environnement qui risquent d'avoir, à plus ou moins long terme, une forte influence sur la disponibilité des ressources en eau de surface. La compréhension du rôle que jouent les états de surface dans les processus de transformation pluie-débit est de fait un des principaux axes de recherche de l'hydrologie. Parallèlement aux travaux qui sont entrepris sur les petits bassins versants – où il est possible de mettre en place et de maintenir des réseaux de mesure et d'observation complets – il apparaît également nécessaire d'aborder le problème à l'échelle où s'appréhendent ces phénomènes de transformation (déforestation, disparition de la forêt sèche, progression de la savane herbeuse sur la savane arborée, ...), c'est-à-dire, à une échelle régionale. Ce type d'étude est aujourd'hui envisageable grâce aux satellites d'observation de la Terre qui peuvent fournir des informations sur la dynamique des éléments de la surface du bassin versant.

Parmi tous les satellites existants, le satellite NOAA-AVHRR a été choisi pour cette étude car il allie une haute répétitivité (une image par jour) à une résolution relativement fine en regard de celle des satellites géostationnaires tout en conservant une vision régionale. De plus, en raison du faible coût des images, il est possible de constituer des banques de données continues sur plusieurs années, fournissant alors une information sur la dynamique des surfaces observées. C'est ce qu'a réalisé l'Institut des Applications de la Télédétection (IATD) du Centre Commun de Recherche d'Ispra qui fournit, sous contrat avec l'Orstom, les données-satellite utilisées dans cette étude.

Il s'agit alors de développer une méthodologie d'utilisation de ces données avec pour finalité de les intégrer dans des modèles de fonctionnement hydrologique déjà existants ou à imaginer. La première étape de cette étude a été de constituer une banque de données opérationnelles sur plusieurs bassins versants situés dans des domaines bioclimatiques différents (GEFFARD *et al.*, 1992) et de vérifier sur les années d'observation satellitaires disponibles (1987/1988 et 1988/1989) la concordance entre le bilan hydrologique annuel et l'analyse des données-satellite. La dynamique temporelle des indices radiométriques étant liée à la composition du couvert végétal (ACHARD, BLASCO, 1990 ; LAPORTE, 1990), on a également tenté de relier des paramètres traduisant cette dynamique avec les coefficients de la relation linéaire pluie-débit, au pas de temps annuel (GEFFARD, 1992).

L'exploitation de la banque de données-satellite GAC qui couvre 5 années d'observation, 1984 à 1988, permet d'étudier la possibilité d'estimer les écoulements à partir d'informations sur les précipitations et la dynamique saisonnière des indices radiométriques représentatifs du couvert végétal. Les résultats de cette démarche sont présentés ici.

SUPPORT THÉORIQUE DE LA MÉTHODE

À l'échelle annuelle, sur les bassins versants étudiés présentant un substratum géologique imperméable et des étiages marqués, on admet que les précipitations P se répartissent entre l'écoulement de surface E et l'évapotranspiration ETR . On peut alors assimiler l' ETR à la différence $P-E$, ou déficit d'écoulement.

La répartition des précipitations entre écoulements et ETR varie d'une année sur l'autre et dépend étroitement des caractéristiques des précipitations parmi lesquelles : l'état de saturation du sol avant les événements pluvieux, donc leur chronologie, l'intensité des averses, leur répartition spatiale sur le bassin versant, ... Or, on ne peut pas obtenir ces paramètres sur des bassins versants de plusieurs milliers de km^2 . Rappelons en effet que pour les grands bassins versants, seuls les réseaux météorologiques fournissent facilement des données continues sur de longues périodes et que ces réseaux sont peu denses, espacés de 10 à 20 km dans les meilleurs cas, plus souvent de 100 à 150 km. Les caractéristiques des précipitations sur l'ensemble du bassin sont complètement inconnues.

Pendant, les différents facteurs qui conditionnent la répartition entre ruissellement et infiltration définissent également la quantité d'eau qui se trouve stockée dans le sol et qui est alors disponible pour la transpiration du couvert végétal. Le comportement du couvert végétal durant son cycle de développement est le reflet de cette quantité d'eau disponible.

On propose donc de s'appuyer sur des caractéristiques du développement saisonnier de la végétation pour évaluer la différence $P-E$ qui peut être assimilée dans le cas des bassins versants étudiés à l' ETR annuelle.

LA ZONE D'ÉTUDE ET LES CARACTÉRISTIQUES DES BASSINS VERSANTS

Cette étude porte sur trois grands bassins versants :

- la Falémé, affluent du Sénégal situé en domaine soudanien ;
- le haut Niger à Kouroussa en Guinée situé en zone de transition guinéo-soudannienne ;
- le bassin supérieur du Sassandra en Côte d'Ivoire à cheval sur la zone de transition guinéo-soudannienne et le domaine guinéen.

Ces trois grands bassins ont été découpés en sept sous-bassins (figure 1).

Les sous-bassins de la Falémé D et C constituent le cours supérieur de la Falémé. Leur superficie respective est de 5 720 km^2 et 2 370 km^2 . La moyenne des précipitations sur la période de 1980 à 1988 est d'environ 1 000 mm. D'après la carte de la végétation (LAVENU, 1987), le couvert dominant sur ces deux bassins versants est essentiellement de type savane arborée et arbustive au nord et savane boisée et forêt sèche au sud. On observe également de manière localisée des zones de cultures.

EF est le bassin supérieur du Niger à Kouroussa en Guinée. Sa superficie est de 16 280 km². Les précipitations sont en moyenne d'environ 1 450 mm sur la période 1980 à 1988. La formation végétale dominante est l'association de savane boisée et forêt sèche. On trouve également la savane arborée et arbustive au nord, des îlots de forêt sèche et des zones de cultures.

Les bassins versants G, H, J et L sont des sous-bassins du Sassandra qui correspondent respectivement au bassin de la Férédogouba à N'golodougou (5 020 km²), au bassin de la Boa à Vialadougou (5 770 km²), au bassin du Bafing à Bafindala (6 230 km²) et au bassin du N'zo à Kahin (4 300 km²). Les précipitations moyennes (1980 à 1988) vont de 1300 pour H à 1 600 mm pour L. Le couvert dominant est la savane boisée et la forêt sèche pour G. Sur H, ce type de couvert alterne avec la savane arborée et arbustive. Le bassin versant J est à cheval sur la zone de transition et le domaine guinéen. De fait, sur la rive gauche, le couvert dominant est la savane boisée et la forêt sèche, et sur la rive droite, la forêt dense primaire dégradée. Le bassin versant L, quant à lui, situé dans le domaine guinéen, est couvert en majorité de forêt primaire dégradée.

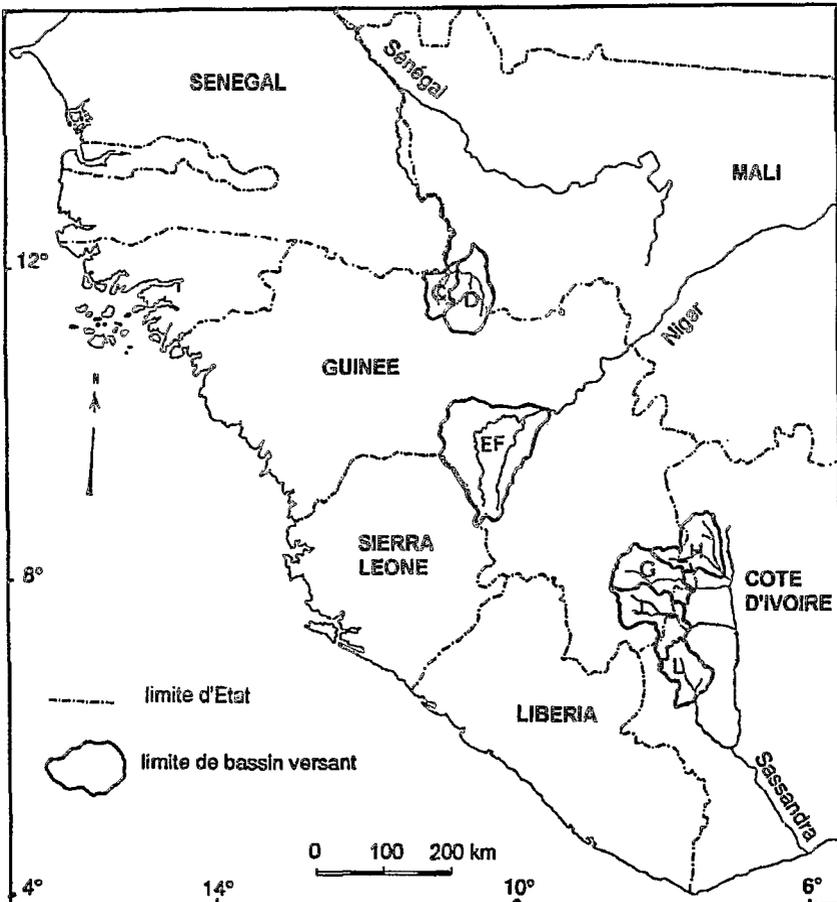


Figure 1 :
Situation géographique des bassins versants étudiés.

LES DONNÉES-SATELLITE NOAA-AVHRR

ACQUISITION ET TRAITEMENTS DES DONNEES-SATELLITE

Les données-satellite brutes correspondent à 4 minutes d'enregistrement au sein d'une orbite du satellite NOAA et couvrent un espace géographique allant du Golfe de Guinée au Sud Mauritanien et du Sénégal au Togo (4°N18°W, 4°N6°E ; 16°N18°W, 16°N6°E).

Chaque enregistrement contient l'information radiométrique correspondant aux bandes spectrales du capteur AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) installé à bord des satellites de la série NOAA (tableau 1).

Tableau 1
Principales caractéristiques des satellites NOAA et du senseur AVHRR

Satellite	Mise en service	Caractéristiques
NOAA-7	24.08.1981	cycle orbital : 9 jours période orbitale : 102 minutes inclinaison sur l'orbite : 102 degrés altitude : 825 km noeud ascendant : 14h30 noeud descendant : 2h30
NOAA-9	25.02.1985	
NOAA-11	08.11.1988	
Canal	Bande en μm	Domaine
AVHRR 1	0.58-0.68	rouge (visible)
AVHRR 2	0.73-1.10	proche infrarouge
AVHRR 3	3.55-3.93	infrarouge moyen
AVHRR 4	10.30-11.30	infrarouge thermique
AVHRR 5	11.50-12.00	infrarouge thermique

Les données transmises en temps réel appelées HRPT (High Resolution Picture Transmission) sont en pleine résolution : la taille du pixel est de 1.1 km au nadir. Ce type de données n'a pu être acquis sur l'Afrique de l'Ouest que depuis la mise à niveau de la station de réception de Mas Palomas aux Canaries, en 1987. Auparavant, les enregistrements réalisés sur l'Afrique de l'Ouest étaient stockés à bord du satellite pour être retransmis aux Etats-Unis. Compte-tenu des faibles capacités de stockage, les données en pleine résolution appelées LAC (Local Area Coverage), n'ont été acquises que sur demande et en quantité limitée. Les données disponibles pour la période 1981 à 1987 sont des données échantillonnées appelées GAC (Global Area Coverage). Cet échantillonnage s'accompagne d'une perte d'information de 75 % de la surface du sol qui rend délicate leur utilisation (BELWARD, MALINGREAU, 1989).

Chaque image subit des corrections radiométriques et géométriques nécessaires à leur inter-comparaison (VOGT, 1990 ; BELWARD *et al.*, 1992). Deux grandeurs, calculées par l'IATD, et caractéristiques de l'état du couvert végétal, ont été retenues pour cette étude :

- l'Indice de Végétation Normalisé (NDVI), combinaison des enregistrements dans le rouge et le proche infrarouge. Cet indice est un bon indicateur de la densité du couvert végétal chlorophyllien (TOWNSHEND et JUSTICE, 1986) à la surface du sol ;
- le signal, en compte numérique, enregistré dans la bande AVHRR 3. Ce canal infrarouge moyen (3.55–3.93 μm) enregistre à la fois des rayonnements solaires réfléchis et des rayonnements terrestres émis. Les contributions respectives de ces deux composantes du signal reçu sont mal connues, avec semble-t-il une dominance de la composante réfléchie pour les températures moyennes du sol (<50°C). D'après GUYOT (1992), le sol est plus réfléchissant que la végétation dans l'infrarouge moyen et la réflectance de la végétation chlorophyllienne augmente lors de la sénescence. Ce signal réfléchi permet de mettre en évidence les zones de sol nu ou de végétation jaunie lors des périodes de transition entre la saison des pluies et la saison sèche (GRÉGOIRE, 1990 ; GRÉGOIRE, FERRARI, 1990).

CONSTITUTION DES SÉRIES TEMPORELLES

Dans une première approche, on a choisi de caractériser le couvert végétal des différents bassins versants de façon globale. Les surfaces des bassins versants ont été numérisées puis recalées par point d'amer sur les images. Elles sont utilisées comme des polygones d'entraînement et permettent de calculer une moyenne spatiale et un écart-type des valeurs de NDVI ou de compte numérique du canal 3 des pixels du bassin.

La série des données GAC a été acquise globalement sans sélection des images utilisables. Leur très grand nombre rend l'extraction supervisée, avec masquage des nuages, très fastidieuse. De plus, de par la taille des pixels et le mode d'échantillonnage, on ne peut pas prétendre éliminer ces nuages de façon efficace. La procédure de calcul des moyennes spatiales a été automatisée. Les séries temporelles ainsi obtenues font apparaître un bruit de fond important qu'il a été nécessaire d'atténuer en tenant compte des températures de surface et des valeurs de NDVI très sensibles à la présence d'aérosols (GEFFARD, 1994).

MÉTHODOLOGIE ET RÉSULTATS

1^{ÈRE} PROPOSITION

Le développement de la végétation dépend beaucoup de la répartition annuelle des précipitations et de leur régime. La régularité des apports en début de saison sèche en particulier a une forte importance (FOURNIER, 1987). L'évapotranspiration annuelle – dont on admet que la différence P-E est un estimateur – dépend directement du développement de ce couvert végétal. Plusieurs auteurs ont proposé d'utiliser le cumul des valeurs de NDVI observé pendant la saison des pluies pour estimer la production de biomasse annuelle (TUCKER *et al.*, 1985 ; PRINCE, 1991 ; FRANKLIN, HIERNAUX, 1991). Sachant que la production de biomasse est liée aux échanges entre la plante et l'atmosphère, on propose de mettre en relation le cumul des valeurs de NDVI au cours de la saison des pluies et la différence P-E, traduisant l'évapotranspiration annuelle.

Pour que le cumul des valeurs de NDVI puisse être comparé de bassin à bassin, on a utilisé la moyenne mensuelle des moyennes spatiales de NDVI (figure 2). La période de juillet à septembre présentant une forte nébulosité, le cumul n'est réalisé que sur la période qui va de mars à juin. Elle correspond par ailleurs à la période d'activité maximum du couvert végétal.

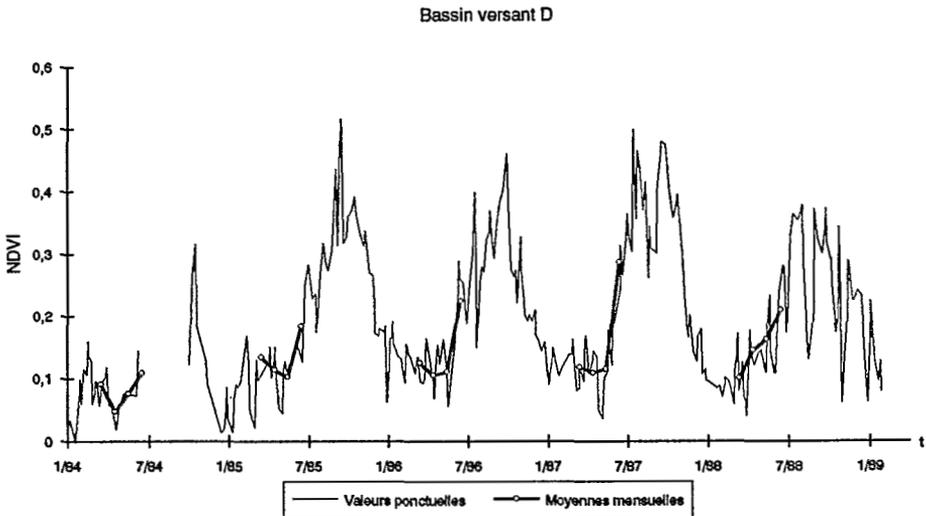


Figure 2 :

Série temporelle de NDVI sur le bassin versant D et moyennes mensuelles de mars à juin.

Si l'on considère séparément chaque bassin versant (figure 3), les valeurs de P-E et de NDVI mensuel cumulé sur la période mars à juin, ne montrent pas de réelle concordance. L'explication avancée ici est que l'importante nébulosité en début de saison des pluies perturbe fortement la valeur de NDVI qui ne constitue pas alors un indicateur suffisamment sensible du développement saisonnier du couvert végétal.

Le nuage de points (figure 3) laisse deviner une tendance linéaire. À l'échelle régionale, les bassins qui présentent une activité chlorophyllienne élevée en début de saison des pluies sont également ceux pour lesquels la différence P-E est la plus élevée. Ainsi, le cumul de NDVI pourrait être utilisé comme un indicateur de la gamme de valeurs dans laquelle se situe le déficit d'écoulement d'un bassin versant.

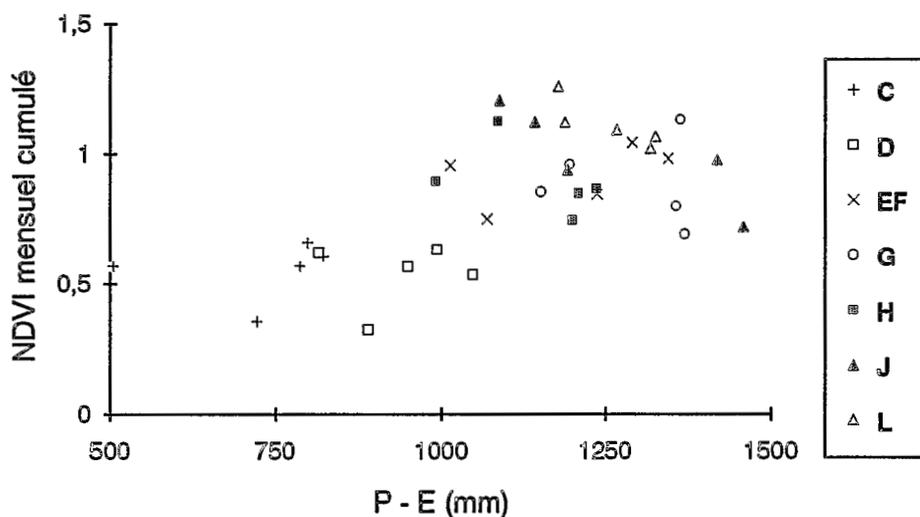


Figure 3 :
Relation entre la différence annuelle P-E et le cumul de mars à juin des moyennes mensuelles de NDVI.

2^{EME} PROPOSITION

Les cycles de développement saisonnier du couvert végétal de la savane soudanienne sont étroitement associés à la répartition des précipitations, c'est-à-dire, en fait, à la disponibilité en eau au cours de la saison des pluies. On émet ici l'hypothèse que la durée de la période de sénescence du couvert végétal est liée à cette disponibilité en eau et donc par extension à la différence P-E qui traduit l'évapotranspiration annuelle. On a choisi de prendre la pente de l'évolution des indices radiométriques en fin de la saison des pluies comme paramètre représen-

tatif de la sénescence du couvert végétal. Pour que la valeur de cette pente soit relativement indépendante du choix des dates de début et fin, elle a été calculée à partir du compte numérique du canal 3, moins variable d'une date à l'autre que le NDVI.

La pente de l'évolution du compte numérique du canal 3, que l'on appelle gradient du canal 3, a été calculée pour la période qui va du début novembre au début janvier correspondant à la diminution de NDVI. Les valeurs minimales et maximales servant à calculer cette pente sont obtenues en faisant la moyenne des valeurs comprises dans l'intervalle des 10 premiers jours de chaque mois (novembre pour le minimum et janvier pour le maximum) (figure 4).

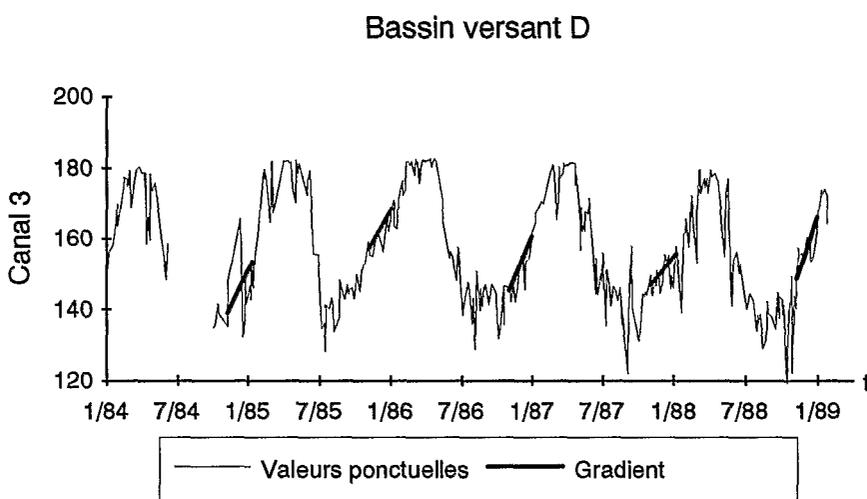


Figure 4 :

Série temporelle du compte numérique du canal 3 et gradient en fin de saison des pluies.

Les graphiques de la figure 5 montrent une assez bonne correspondance entre les valeurs de gradient et de P-E pour les bassins versants situés au nord de la zone d'étude, C, D et EF. Par contre, pour les sous-bassins du Sassandra, les points sont très dispersés. Cette différence de comportement est à mettre en relation avec l'influence du front intertropical que subissent encore les bassins versants de Côte d'Ivoire après le mois de novembre.

Les observations des bassins versants C, D et EF ont été regroupées dans un même graphique (figure 6). Une bonne concordance entre les valeurs relatives de P-E et les gradients est observée, les fortes valeurs de gradient correspondant à de faibles valeurs de P-E et donc à une faible évapotranspiration. Validée sur d'autres années et d'autres bassins versants, une telle relation pourrait permettre d'estimer l'intervalle de valeurs dans lequel se situe la différence P-E pour une année donnée.

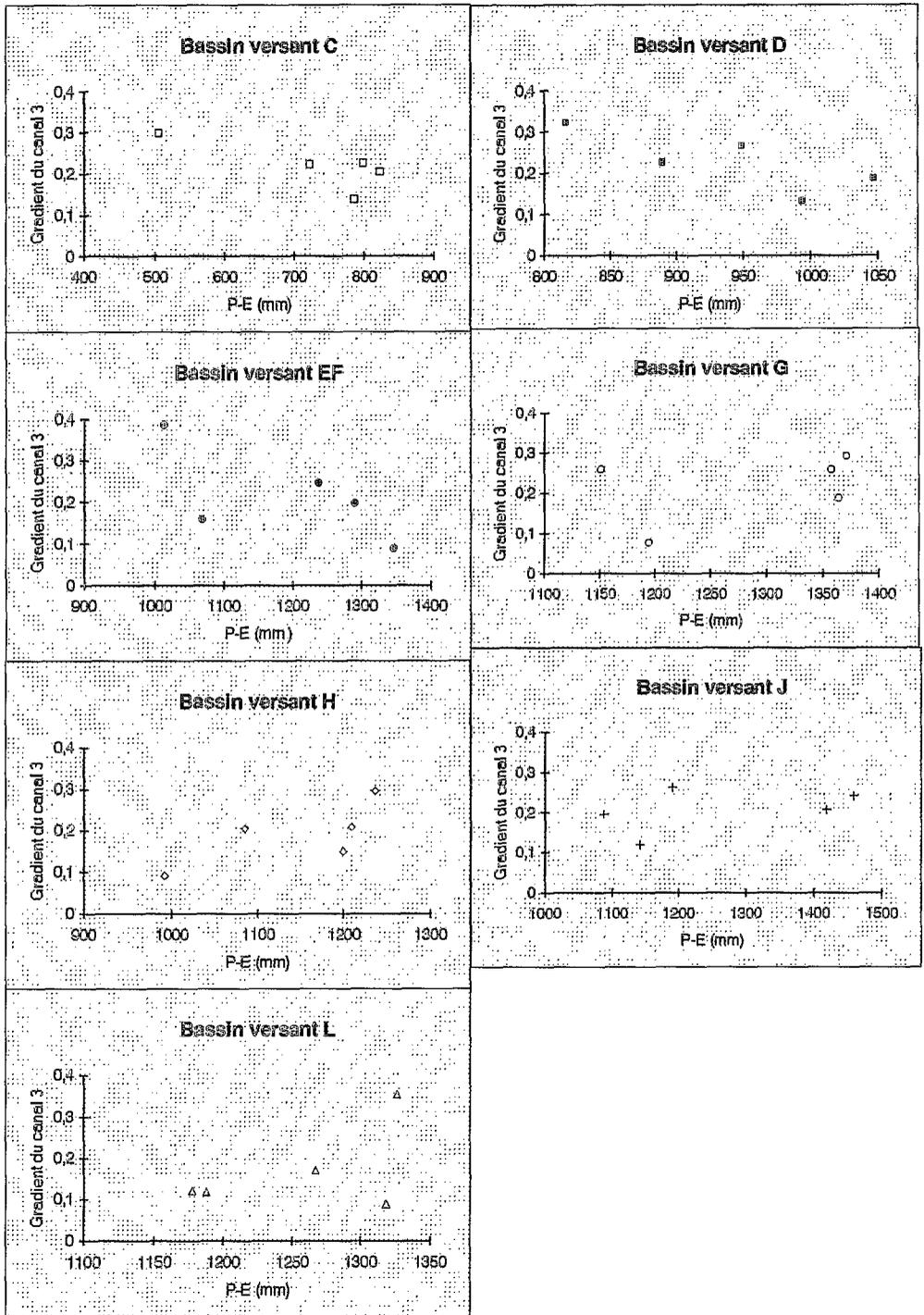


Figure 5 :

Relation entre gradient du canal 3 et différence annuelle P-E, bassin par bassin.

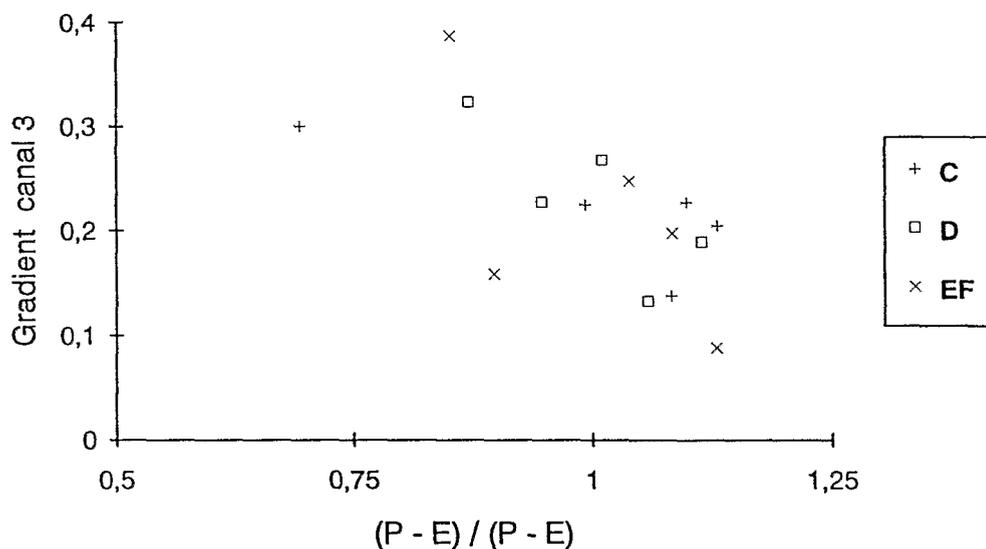


Figure 6 :

Relation entre gradient du canal 3 et valeur relative de la différence annuelle P-E.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ces deux démonstrations laissent entrevoir des perspectives très intéressantes pour l'amélioration des méthodes d'estimation des écoulements et pour le suivi du régime des fleuves. En effet, bien que l'on ait utilisé des données-satellite de qualité insatisfaisante, il apparaît clairement que la dynamique temporelle des indices radiométriques exprime une réalité qui concorde avec le bilan hydrologique, à l'échelle annuelle dans le second cas et plus grossièrement à l'échelle interannuelle et régionale dans le premier cas. Tout porte à croire que l'utilisation de données de meilleure qualité, corrigées des perturbations liées à la transparence atmosphérique, ou dans une moindre mesure, de la présence des nuages, pourrait permettre d'obtenir de meilleurs résultats. L'attention devrait être concentrée sur une amélioration de la première méthode (exploitation de la dynamique du NDVI en début de saison des pluies) qui constitue un outil de prévision annuel des écoulements. Par ailleurs, l'étape suivante logique de cette étude est l'adaptation ou la réalisation de modèles au pas de temps mensuel, introduisant une information sur la dynamique des éléments de la surface du bassin versant. Cette étape a été abordée avec les données hydropluviométriques et les données-satellite en pleine résolution (HRPT) disponibles conjointement, c'est-à-dire, pour la période 1987 et 1988 (GEFFARD, 1994). Les résultats décevants ont confirmé, si besoin en est, la nécessité de compléter les banques de données respectives avant d'envisager la possibilité de réaliser des outils de prévision des écoulements tenant compte des transformations du milieu.

BIBLIOGRAPHIE

- ACHARD F., BLASCO F., 1990. Analysis of Vegetation Seasonal Evolution and Mapping of Forest Cover in West Africa with the Use of NOAA AVHRR HRPT Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 56, No. 10, October 1990, 1359-1365.
- BELWARD A.S., VOGT J.V., FALK-LANGEMANN A., SARADETH S., CAMBRIDGE H., 1992. Preparation of AVHRR GAC Data Sets for Global Change Studies. Proceedings of the Central Symposium of the « International Space Year » Conference, Held in Munich, Germany, 30 March-4 April 1992 (ESA SP-341, July 1992), 19-23.
- BELWARD S., MALINGREAU J.P., 1989. A comparison of AVHRR GAC and HRPT data for regional environmental monitoring. IGARSS '89/12th Canadian Symp. on Remote Sensing, University of British Columbia, Vancouver, Canada 10th to 14th July 1989, 9 p.
- FOURNIER A., 1987. Cycle saisonnier de la phytomasse et de la production herbacée sans les savanes soudaniennes de Nazinga (Burkina Faso), *Bull. Ecologie* N°18 (4) 1987, 409-430.
- FRANKLIN J, HIERNAUX P.H. Y., 1991. Estimating foliage and woody biomass in Sahelian and Sudanian woodlands using a remote sensing model. *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 12, No. 6, 1387-1404.
- GEFFARD S., 1992. Conséquences hydrologiques des changements d'états de la surface survenant sur les bassins versants des grands fleuves d'Afrique de l'Ouest. Rapport final de la phase IIIa du contrat n°3840-89-11 ED IP F, Orstom - Commission of the European Communities Joint Research Centre (Ispra site), 41 p. ss an.
- GEFFARD S., 1994. Utilisation d'une série temporelle de données-satellite NOAA-AVHRR dans l'étude de la dynamique de systèmes hydrologiques en Afrique de l'Ouest. Thèse Sciences, Hydrologie, Univ. Paris-Sud, Orsay, 248 p.
- GEFFARD S., GRÉGOIRE J.M., PIEYNS S., 1992. Le suivi du régime hydrologique des grands fleuves de l'Ouest Africain : apport de l'imagerie satellitaire NOAA/AVHRR. *Revue des Sciences de l'Eau*, 5(1992), 263-289.

- GRÉGOIRE J.M., 1990. Effects of the dry season on the vegetation canopy of some river basins of West Africa as deduced from NOAA-AVHRR data. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, Vol. 35, N° 3, 6/1990, 323-338.
- GRÉGOIRE J.M., FERRARI G., 1990. Suivi par télédétection des changements d'état de surface sur les bassins versants du Haut-Sénégal, de la Gambie et du Rio Corubal (novembre 1987-décembre 1988). Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse (Journées scientifiques de Thiés, 21-24 novembre 1989), Ed. AUPELF-UREF, John Libbey Eurotext, Paris 1990, 81-93.
- GUYOT G., 1992. Signature spectrale des surfaces naturelles. *Télédétection Satellitaire 5*, Collection dirigée par Fernand Verger, Ed. Paradigme, Caen 1992, 178 p.
- Laporte N., 1990. Étude de l'évolution spatio-temporelle de la végétation tropicale : utilisation de données satellitaires NOAA AVHRR sur l'Afrique de l'Ouest. Thèse Sciences, Ecologie tropicale, Univ. Toulouse, 231 p.
- LAVENU F., 1987. Digitized vegetation map of Africa, scale 1/5000000. Descriptive memoir and map prepared for the Department of Forestry Ressources F.A.O., Rome, 34 p.
- PRINCE S.D., 1991. Satellite remote sensing of primary production : comparaison of results for Sahelian grassland : 1981-1988. *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 12, No. 6, 1301-1311.
- TOWNSHEND J.R.G., JUSTICE C.O., 1986. Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 7, No. 11, 1435-1445.
- TUCKER CJ., VANPRAET C.L., SHARMAN M.J., VAN ITTERSUM G., 1985. Satellite Remote Sensing of Total Herbaceous Biomass Production in the Senegalese Sahel : 1980-1984. *Remote Sensing of Environment* 17, 233-249.
- VOGT J.V., 1990. Calculation of ToA Albedo, NDVI, Surface Temperature, and Precipitable Water Content of the Atmosphere from NOAA AVHRR Data. Commission of the European Communities Joint Research Centre - Ispra site, Technical Note No. 1.90.72.