

# Le suivi du régime hydrologique des grands fleuves de l'Ouest Africain : apport de l'imagerie satellitaire NOAA/AVHRR

## Monitoring of large West African river's regimes : contribution of the NORA AVHRR imagery

S. Geffard, J. M. Gregoire and S. Pieyns

Volume 5, Number 2, 1992

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/705132ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/705132ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (print)

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Geffard, S., Gregoire, 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 / Journal of Water Science*, 5(2), 263–289. <https://doi.org/10.7202/705132ar>

### Article abstract

The project « Monitoring Tropical Vegetation » (MTV) of the Institute for Remote Sensing Applications/Joint Research Center of the European Communities, Ispra Establishment, has created and continually updated a NOAA-AVHRR imagery data bank. We describe here the proposed methodology to use this data bank for hydrological purposes and the results of an initial application, within a joint research, performed by the MTV Project and the Department for Continental Waters of ORSTOM.

The knowledge and the monitoring of the hydrological regimes of large watersheds, especially in the inter-tropical zone, are obviously major topics for hydrology. Interest shown by the scientific community of hydrologists catches up with the goals that are environment protection and « reasonable » sustainable socioeconomic development of these inter-tropical environments, for which a good understanding of the hydrological cycle and water balance is necessary.

A lot of studies, which have already been carried out in order to reach these issues, very often include rainfall runoff relationship modeling, about which it is well known that there is a strong influence of surface conditions. But if many research programs dealt with that particular point, few things in fact have been done on small scale basins, for large river basins. Taking into account the kind of information needed for the characterization of surface conditions at the required time and space perception levels (i.e. seasonal and interannual dynamics, large geographical expanses) and due to the fact that it was possible to utilize classical tools and techniques for data collection, satellite-based remote sensing techniques were obviously the only ones which could contribute to start in answering the question.

The aim of this study is to demonstrate that a real possibility exists to obtain, by an appropriate use of the NOAA imagery, relevant informations related to the time and space dynamics of the surface conditions, (more precisely about the evolution of the vegetation cover status), which can be used as quantitative inputs for hydrological models for the West African large watersheds.

This study has been conducted through three phases.

First, five groups of basins have been selected along a north to south transect which intersects all the major ecological systems of this part of the African continent, from the soudano-sahelian zone to the guinean one. Using scientific and technical criteria, but also taking into account the fact that some of this basins are of particular interest for development projects conducted by the EC in West Africa, 3 watersheds have been selected. The Falceme river, a tributary of the Senegal river, the Upper Niger and the Konkoure. The main characteristics of these basins are given in the text.

Then, we have defined the methodological approach with 3 major steps:

- creation of data banks for runoff and rainfall, satellite time series and cartographic information (basin boundaries),
- extraction, from the satellite imagery, of the indexes we selected to describe the surface conditions,
- joint analysis of hydrological and remotely sensed data for 2 years with important hydrological contrasts.

The hydrological data bank contains the monthly mean discharges and rainfall for 5 selected basins, from year 1980/1981 to year 1988/1989 (hydrological year).

The creation of the satellite data bank started with the preparation of a NOAA-AVHRR HRPT time series including the years 1987, 1988 and a part of 1989. Each of the image we choose (no clouds or as less as possible and with orbital characteristics allowing a 3° W flight over the Equator in order to mitigate the image distortion) has been processed using a processing chain (installed at MTV project).

Radiometric corrections have been made to avoid calibration differences between the AVHRR sensors of NOAA 7, 9 and 11.

The computation of the derived channels is done through the transformation of the original data provided by the AVHRR sensor into values which are easier to interpret in terms of surface conditions.

Three radiometric indexes have been kept:

- the vegetation index (NDVI), computed by combination of records in the red and mean infrared bands, which is a good indicator of the vegetal chlorophyll cover on the land surface (Townsend and Justice, 1986),
- the surface temperature (TS), computed by the « split window method, using the brightness temperatures in the AVHRR 4 and 5 channels.

- the signal, in numerical count, recorded by AVHRR 3 channel. This mean infra-red channel (3.55-3.93 µm) is of great interest. First it records the radiation emitted from the surface and, being very sensitive to the high temperature emissions, is very useful for bush fires detection. Secondly, it records a reflected component which gives information on clearings within vegetated surfaces. By combining the 2 signals, it is possible to detect the bush fires which are known to affect, each year, large extents of vegetation cover, and to make the differentiation between different vegetation covers, particularly in forest areas or forest-savannah transition zone.

Resulting images have been geometrically corrected and resampling of radiometric signals done by cubic convolution method. The final product is a 5 bands image (TS, NDVI, albedo, atmospheric water contents and channel 3 inverted) of 2400 x 1600 pixels (pixel size is 1 km), with geometrical rectification and centered 7° W, 10° N. It must be borne in mind that the radiometric signals are not corrected for the atmospheric effects. That explains why we are rather more interested in the evolution in time of the indexes values than in their absolute values. From these 5 channels images, sub-images of 500 x 500 km are extracted to cover areas of interest for the study of the selected river basins.

The graphic data base contains the digitized basins boundaries. These files have been geometrically corrected using reference points, both on the 1/1 000 000 map and on the NOAA-AVHRR HRPT images, in order to be superimposable to these images. After that, the basins are located on the images and using the CHIPS software statistical descriptors of watersheds surface characteristics are derived.

In a third step, we have applied our methodology to the Falceme river basin. The main hydrological data for the 4 hydrological stations within the basin are given in the text. 1987/1988 and 1988/1989 years has been compared among to each others and to the long term average values. One can remark that, as far as rainfall is concerned, the selected years are very close to the long term average annual rainfall, while runoff during 1987/1988 is clearly lower than the long term average discharge, and that is true for all the basins. Runoff increase for 1988/1989, compared for the year before, is more than 100 %, while annual rainfall are quite equivalent. That can be explained by a difference in the time distribution of rainfall during these two hydrological years. In fact it is observed that runoff for 1988/1989 starts and ceases earlier than for 1987/1988. So the high values of rainfall at the very beginning of the rainy season 1988/1989 have been propitious to runoff, whereas a more homogeneous rainfall repartition during the rainy season, the year before, has given a higher rate of infiltration and probably an easiest use of water by vegetation.

These differences in terms of total annual rainfall and in time distribution along the year, should have bar, an effect on vegetation dynamic for the two years, and subsequently on the radiometric responses of the surface.

In fact, analysis of dynamics of the signal in the NDVI and the medium infrared band shows that:

- a minimum is reached for the NDVI value during February for 1987/1988, December for 1988/1989,
- a clear shifting between the curves related of the different basins. At the same date, the mean value is always higher for the upstream parts of the basin, with a denser vegetation cover, than for lower part of the basin integrates downstream flat areas,
- a very low mean value for the NDVI as early as December 1988, lower than 0.10, which is to be compared to the threshold value 0.05 given as the normal value corresponding to a very sparse herbaceous cover (1 % coverage),
- much steeper slopes immediately at the end of the rainy season and beginning of the dry season 1988/1989 than for 1987/1988. This indicates a much faster drying up process for the herbaceous stratum.

When looking at the dynamics of the signal in the mean infra-red band, one can see that for the Falceme basin at Kidira during the year 1987 the shape of the distribution histogram changes as we are sinking deeper into the dry season. Starting from a bimodal form it reaches finally an unimodal one. This phenomenon indicates a gradual drying up of the entire basin with as a result a homogenization of the radiometric values.

A date la date comparison of the 1987 and 1988 histograms shows that, as early as November 1988, the distribution is unimodal with a mean value higher than in 1987. The fact that homogeneity kept on during the warm-up period indicates that the main part of the vegetation cover, and particularly the herbaceous stratum, was already dry in November 1988.

All these observations tend to show that it is possible to perceive, on one hand space-time distribution of rainfall and on the other hand the relative importance of grass in the vegetation.

Finally this study has been extended to the Upper Niger and the Konkoure basins. All the above observations related to the Falceme river basin are corroborated by the temporal evolution of the standard deviation values of NDVI.

In conclusion, we can say that this study bears encouraging results as regard as to the possible use of descriptive indicators of the surface conditions derived from the NORA AVHRR data bank, as inputs for the hydrological models, on a monthly basis, of large West African watersheds.

Thus, it may be possible to evaluate the changes in these large rivers regimes, in relation with changes, either natural or due to human activities affecting their environment.

# Le suivi du régime hydrologique des grands fleuves de l'Ouest Africain : apport de l'imagerie satellitaire NOAA/AVHRR

Monitoring of large West African  
river's regimes : contribution of  
the NOAA AVHRR imagery

S. GEFFARD<sup>1</sup>, J.M. GREGOIRE<sup>2</sup>, S. PIEYNS<sup>1</sup>

Reçu le 21 mai 1991, accepté pour publication le 20 février 1992\*.

## SUMMARY

The project « Monitoring Tropical Vegetation » (MTV) of the Institute for Remote Sensing Applications-Joint Research Centre of the European Communities, Ispra Establishment, has created and continually updated a NOAA:AVHRR imagery data bank. We describe here the proposed methodology to use this data bank for hydrological purposes and the results of an initial application, within a joint research, performed by the MTV Project and the Department for Continental Waters of ORSTOM.

The knowledge and the monitoring of the hydrological regimes of large watersheds, especially in the inter-tropical zone, are obviously major topics for hydrology. Interest shown by the scientific community of hydrologists catches up with the goals that are environment protection and « reasonable » sustainable socio-economic development of these inter-tropical environments, for which a good understanding of the hydrological cycle and water balance is necessary.

A lot of studies, which have already been carried out in order to reach these issues, very often include rainfall runoff relationship modelling, about which it is well known that there is a strong influence of surface conditions. But if many research programmes dealt with that particular point, few things in fact have been done on small scale basis, for large river basins. Taking into account the kind of information needed for the characterization of surface conditions at the required time and space perception levels (i.e. seasonal and inter-annual dynamics, large geographical expanses) and due to the fact that it was possible to utilize classical tools and techniques for data collection, satellite-based remote sensing techniques were obviously the only ones which could contribute to start in answering the question.

1. Centre ORSTOM de Montpellier, 2051, avenue du Val de Montferand, BP 5045, 34002 Montpellier cedex, France.

2. Centre Commun de Recherche des Communautés Européennes, Institut des Applications de la Télé-détection, Etablissement d'Ispra, 21020 Ispra (VA), Italie.

\* Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 décembre 1992.

The aim of this study is to demonstrate that a real possibility exists to obtain, by an appropriate use of the NOAA imagery, relevant informations related to the time and space dynamics of the surface conditions, (more precisely about the evolution of the vegetation cover status), which can be used as quantitative inputs for hydrological models for the West African large watersheds.

This study has been conducted through three phases.

First, five groups of basins have been selected along a north to south transect which intersects quite all the major ecological systems of this part of the African continent, from the soudano-sahelian zone to the guinean one. Using scientific and technical criteria, but also taking into account the fact that some of these basins are of particular interest for development projects conducted by the EC in West Africa, 3 watersheds have been selected. *The Falkeme river, a tributary of the Senegal river, the Upper Niger and the Konkoure.* The main characteristics of these basins are given in the text.

Then, we have defined the methodological approach with 3 major steps :

- creation of data banks for runoff and rainfall, satellite time series and cartographic information (basin boundaries),
- extraction, from the satellite imagery, of the indexes we selected to describe the surface conditions,
- joint analysis of hydrological and remotely sensed data for 2 years with important hydrological contrasts.

The hydrological data bank contains the monthly mean discharges and rainfall for 5 selected basins, from year 1980/1981 to year 1988/1989 (hydrological year).

*The creation of the satellite data bank started with the preparation of a NOAA-AVHRR HRPT time series including the years 1987, 1988 and a part of 1989. Each of the image we choose (no clouds or as less as possible and with orbital characteristics allowing a 3° W flight over the Equator in order to mitigate the image distortion) has been processed using a processing chain (installed at MTV project).*

Radiometric corrections have been made to avoid calibration differences between the AVHRR sensors of NOAA 7, 9 and 11.

The computation of the derived channels is done through the transformation of the original data provided by the AVHRR sensor into values which are easier to interpret in terms of surface conditions.

Three radiometrics indexes have been kept :

- the vegetation index (NDVI), computed by combination of records in the red and near infrared bands, which is a good indicator of the vegetal chlorophyll cover on the land surface (Townsend and Justice, 1986),
- the surface temperature (TS), computed by the « split window » method, using the brightness temperatures in the AVHRR 4 and 5 channels,
- the signal, in numerical count, recorded by AVHRR 3 channel. This near infrared channel (3.55-3.93  $\mu\text{m}$ ) is of great interest. First it records the radiation emitted from the surface and, being very sensitive to the high temperature emissions, is very useful for bush fires detection. Secondly, it records a reflected component which gives information on clearings within vegetated surfaces. By combining the 2 signals, it is possible to detect the bush fires which are known to affect, each year, large extents of vegetation cover, and to make the differentiation between different vegetation covers, particularly in forest areas or forest-savannah transition zone.

Resulting images have been geometrically corrected and resampling of radiometric signals done by cubic convolution method. The final product is a

5 bands image (TS, NDVI, albedo, atmospherical water contents and channel 3 inverted) of 2400 x 1600 pixels (pixel size is 1 km), with geometrical rectification and centred 7° W, 10° N. It must be borne in mind that the radiometric signals are not corrected for the atmospheric effects. That explains why we are rather more interested in the evolution in time of the indexes values than in their absolute values. From these 5 channels images, sub-images of 500 x 500 km are extracted to cover areas of interest for the study of the selected river basins.

The graphic data base contains the digitized basins boundaries. These files have been geometrically corrected using reference points, both on the 1/1 000 000 map and on the NOAA:AVHRR HRPT images, in order to be superimposable to these images. After that, the basins are located on the images and using the CHIPS software statistical descriptors of watersheds surface characteristics are derived.

In a third step, we have applied our methodology to the Faleme river basin. The main hydrological data for the 4 hydrological stations within the basin are given in the text. 1987/1988 and 1988/1989 years has been compared among to each others and to the long term average values. One can remark that, as far as rainfall is concerned, the selected years are very close to the long term average annual rainfall, while runoff during 1987/1988 is clearly lower than the long term average discharge, and that is true for all the basins. Runoff increase for 1988/1989, compared for the year before, is more than 100 %, while annual rainfall are quite equivalent. That can be explained by a difference in the time distribution of rainfall during these two hydrological years. In fact it is observed that runoff for 1988/1989 starts and ceases earlier than for 1987/1988. So the high values of rainfall at the very beginning of the rainy season 1988/1989 have been propitious to runoff, whereas a more homogeneous rainfall repartition during the rainy season, the year before, has given a higher rate of infiltration and probably an easiest use of water by vegetation.

These differences in terms of total annual rainfall and in time distribution along the year, should have had an effect on vegetation dynamic for the two years, and subsequently on the radiometric responses of the surface.

In fact, analysis of dynamics of the signal in the NDVI and the medium infra-red band shows that :

- a minimum is reached for the NDVI value during February for 1987/1988, December for 1988/1989,
- a clear shifting between the curves related of the different basins. At the same date, the mean value is always higher for the upstream parts of the basin, with a denser vegetation cover, than for lower part of the basin integrates downstream flat areas,
- a very low mean value for the NDVI as early as December 1988, lower than 0.10, which is to be compared to the threshold value 0.05 given as the normal value corresponding to a very sparse herbaceous cover (1 % coverage),
- much steeper slopes immediately at the end of the rainy season and beginning of the dry season 1988/1989 than for 1987/1988. This indicates a much faster drying up process for the herbaceous stratum.

When looking at the dynamics of the signal in the mean infra-red band, one can see that for the Faleme basin at Kidira during the year 1987 the shape of the distribution histogram changes as we are sinking deeper into the dry season. Starting from a bimodal form it reaches finally an unimodal one. This phenomenon indicates a gradual drying up of the entire basin with as a result a homogenization of the radiometric values.

A date to date comparison of the 1987 and 1988 histograms shows that, as early as November 1988, the distribution is unimodal with a mean value higher

than in 1987. The fact that homogeneity kept on during the warm-up period indicates that the main part of the vegetation cover, and particularly the herbaceous stratum, was already dry in November 1988.

All these observations tend to show that it is possible to perceive, on one hand space-time distribution of rainfall and on the other hand the relative importance of grass in the vegetation.

Finally this study has been extended to the Upper Niger and the Konkoure basins. All the above observations related to the Faleme river basin are corroborated by the temporal evolution of the standard deviation values of NDVI.

In conclusion, we can say that this study bears encouraging results as regards to the possible use of descriptive indicators of the surface conditions derived from the NOAA AVHRR data bank, as inputs for the hydrological models, on a monthly basis, of large West African watersheds.

Thus, it may be possible to evaluate the changes in these large rivers regimes, in relation with changes, either natural or due to human activities affecting their environment.

*Key-words* : large watersheds, remote sensing, hydrological regime, NOAA-AVHRR, West Africa, modeling, vegetation canopy.

## RÉSUMÉ

Le Projet, « suivi de la végétation en zone tropicale » de l'Institut des Applications de la Télédétection au Centre Commun de Recherche des Communautés Européennes d'Ispra, a mis au point et alimente en permanence une banque de données satellitaires NOAA/AVHRR. On présente ici la méthodologie développée pour une utilisation de cette banque de données, à des fins hydrologiques, et les résultats d'une première application dans le cadre d'une étude menée en commun, par le Projet et le Département des Eaux Continentales de l'ORSTOM.

Cette étude réalisée sur la Falème, affluent du fleuve Sénégal, le Haut Niger et le Konkoure donne des résultats encourageants quant à la possibilité d'utiliser des descripteurs d'états de la surface, tirés de la banque de données NOAA/AVHRR, comme données d'entrée pour la modélisation hydrologique, au pas de temps mensuel, des grands bassins de l'Ouest Africain.

Il serait peut-être ainsi possible de suivre les modifications des régimes hydrologiques de ces grands fleuves liées à des modifications éventuelles, naturelles ou anthropiques, de leur environnement.

*Mots clés* : grands bassins versants, télédétection, régime hydrologique, Afrique de l'Ouest, modélisation, couvert végétal.

## INTRODUCTION

La connaissance et le suivi des régimes hydrologiques des grands bassins, notamment ceux de la zone intertropicale, est à l'évidence l'un des thèmes majeurs de l'hydrologie.

Il suffit pour s'en persuader de passer en revue les grands programmes initiés et/ou soutenus de par le monde, tant par les Agences spécialisées des Nations Unies que par les organismes de développement plurinationaux ou d'aide bilatérale et bien évidemment par les principaux organismes de recherche.

L'intérêt manifesté par la communauté scientifique des hydrologues est à la hauteur des enjeux que sont la protection de l'environnement et le développement socio-économique « raisonnable » de ces milieux intertropicaux, pour lesquels une connaissance du cycle et du bilan de l'eau s'avère nécessaire.

Les études entreprises pour atteindre ces objectifs intègrent très souvent la modélisation des relations hydropluviométriques, dont il est bien connu qu'elles sont fortement influencées par les états de la surface. Mais si de nombreuses recherches sur ce dernier point ont été entreprises et sont encore en cours actuellement, notamment à l'ORSTOM, elles s'intéressent, le plus souvent, à un niveau de perception spatiale différent, de la parcelle au bassin versant de l'ordre de la centaine de km<sup>2</sup>. Peu de choses en vérité ont été tentées à petite échelle sur de grands bassins versants. C'est là l'objectif essentiel de l'étude que l'Institut des Applications de la Télédétection (I.A.T.D.) du Centre Commun de Recherche (C.C.R.) d'ISPRA et l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM) ont décidé de mener en commun, sachant que :

- la communauté des hydrologues reconnaît les difficultés qu'elle rencontre à bien comprendre le fonctionnement des relations précipitation-écoulement à ce niveau spatial et que des recherches méthodologiques sont donc indispensables,

- la dimension des phénomènes, d'ordre naturel ou artificiel, intervenant dans les modifications de l'environnement et pouvant avoir une influence directe sur les relations précipitation-écoulement, s'appréhende à l'échelle sous-continentale et non locale. C'est par exemple le cas, sur le continent africain, pour les changements survenant dans la nature du couvert végétal dans la zone de transition « forêt-savane ». Il importe donc d'aborder l'étude de ces phénomènes à l'échelle correspondante,

- nous avons le souci d'orienter nos recherches dans une direction compatible, autant que faire se peut, avec les besoins exprimés par la communauté des aménageurs. S'agissant d'une ressource naturelle indispensable pour toute activité humaine, tant agricole qu'industrielle, les aménageurs attachent une importance croissante à l'amélioration de la gestion des ressources en eau, sur le plan quantitatif et qualitatif, et ce tout particulièrement dans la ceinture intertropicale du globe. Mais là encore, les besoins se situent à un niveau régional sinon continental.

Compte tenu du type d'information recherché pour caractériser « les états de la surface » au niveau de perception spatio-temporel requis (dynamique saisonnière et interannuelle, grand espace géographique), de l'impossibilité d'utiliser des outils ou des techniques de collecte de données classiques, il est apparu que seules les techniques de télédétection spatiale pouvaient apporter un début de réponse.

Parmi la panoplie des satellites disponibles il convenait de faire le bon choix qui, en prenant en compte plusieurs critères qui seront évoqués plus avant, nous a paru être l'imagerie NOAA/AVHRR.

L'essentiel du texte qui suit est consacré à l'approche méthodologique et à la présentation de l'utilisation qui a été faite de cette imagerie NOAA/AVHRR sur les sous-bassins de la Falème pour le suivi de l'évolution de l'état de la surface. Parallèlement, l'analyse, au cours de deux années hydrologiques, des relations pluie-écoulement a mis en évidence le rôle significatif joué par ce paramètre du milieu, dans ces relations.

Il s'agit là de la première étape de l'étude qui vise, quant à elle, à montrer s'il est réellement possible d'obtenir, par une utilisation appropriée de l'imagerie NOAA, des informations pertinentes sur la dynamique spatio-temporelle des états de la surface et plus précisément de la végétation, quantifiables et utilisables comme données d'entrée dans des modèles hydrologiques pour les grands bassins de l'ouest africain.

## 1 - LA ZONE D'ÉTUDE

Parmi les bassins des grands fleuves importants pour les ressources en eau de l'Afrique de l'Ouest, cinq groupes ont été retenus pour les recherches que l'ORSTOM et le CCR mènent en commun.

Distribués le long d'un transect nord-ouest sud-est ils recourent l'essentiel des domaines écologiques rencontrés dans cette partie de l'Afrique (*fig. 1*) :

- le premier groupe, situé en zone soudano-sahélienne, comporte les bassins des principaux affluents du fleuve Sénégal en amont de Bakel : le Bafing et le Bakoye ;
- le second, en zone soudanienne, concerne les affluents du fleuve Niger en amont de Koulikoro : le haut-Niger proprement dit, le Mafou, le Niandan, le Milo, le Tinkisso et le Sankarani ;
- le troisième regroupe quatre affluents de la Sassandra situés en zone de transition entre le milieu soudanien-sud et le milieu guinéen ;
- le quatrième comprend quatre bassins de fleuves côtiers situés en Guinée et en Sierra-Leone, soit en milieu de type guinéen avec forte influence atlantique ;
- le cinquième enfin comprend les bassins de la Gambie, qui traverse la zone de contact entre domaine guinéo-soudanien et domaine soudanien, et le Corubal situé lui totalement en zone de transition guinéo-soudanienne.

Au sein de cet ensemble, trois bassins ont été sélectionnés pour cette phase d'étude de faisabilité et de développement méthodologique. Leurs caractéristiques essentielles sont résumées dans le tableau 1.

Ce choix s'appuie sur des critères d'ordre scientifique et technique, tels que la disponibilité de données hydro-pluviométriques et satellitaires, l'exis-

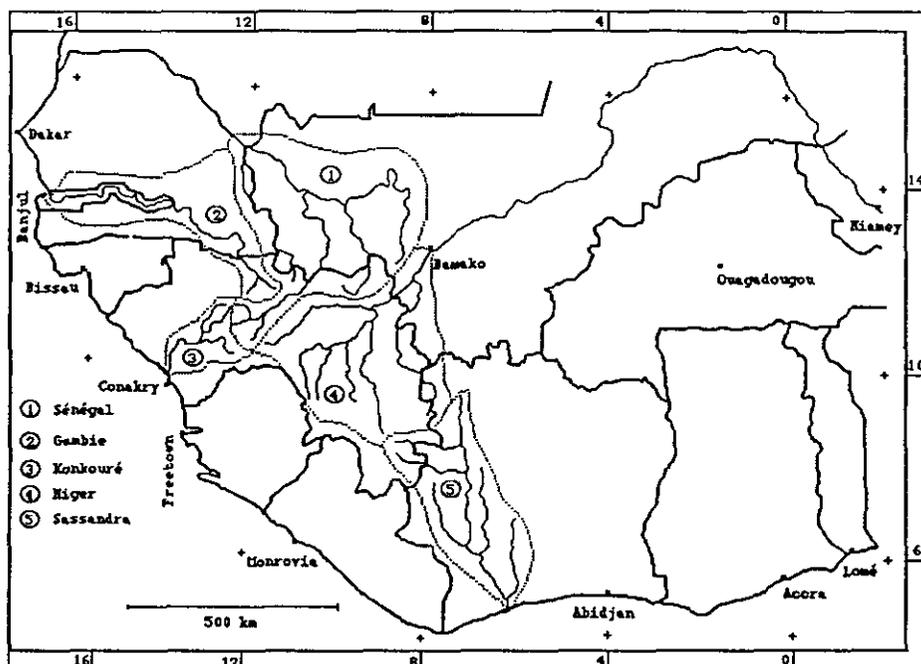


Figure 1 Ensemble des 5 bassins versants faisant l'objet des recherches communes ORSTOM-CCR.

*The five basins where the ORSTOM-CCR are carried out.*

Tableau 1 Les trois bassins retenus et leurs caractéristiques.

Table 1 *The 3 selected basins and their characteristics.*

| Bassin     | Drain principal | Domaine écologique                | Type de végétation*                                                                 | Pays concerné           | Surface                                                               |
|------------|-----------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Falémé     | Sénégal         | Sahélien sud et soudanien         | Forêt claire indifférenciée soudanienne                                             | Sénégal, Mali et Guinée | 28 900 km <sup>2</sup> à Kidira                                       |
| Haut-Niger | Niger           | Soudanien                         | Mosaïque de forêt ombrophile et de formations herbues secondaires                   | Guinée                  | 3 180 km <sup>2</sup> à Faranah<br>16 450 km <sup>2</sup> à Kouroussa |
| Konkouré   | Konkouré        | Guinéen avec influence atlantique | Mosaïque de forêt ombrophile guinéo-congolaise et de formations herbues secondaires | Guinée                  | 10 250 km <sup>2</sup> au Pont de Télimélé                            |

tence dans la zone d'étude de milieux écologiques suffisamment variés et contrastés, mais aussi sur le fait que ces bassins font partie d'un espace géographique d'intérêt particulier pour certains programmes d'aménagement, que la Commission des Communautés européennes mène en Afrique de l'Ouest (ANONYME, 1989).

## 2 - L'APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

### 2.1 Méthode

L'objectif général de l'étude a nécessité une analyse des données hydropluviométriques et des observations réalisées à partir des données satellitaires, sur l'évolution spatio-temporelle de l'état de la surface des bassins retenus, cela en trois étapes.

Première étape : constitution de banques de données

– la banque de données hydropluviométriques qui comporte d'une part les débits moyens mensuels aux quatre stations de la Falème et aux deux stations du Haut Niger, d'autre part les précipitations moyennes mensuelles sur les bassins contrôlés par ces six stations. La période considérée couvre neuf années hydrologiques de 1980/1981 à 1988/1989 ; les débits ont été calculés à partir des hauteurs d'eau instantanées (logiciel HYDROM Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM, COCHONNEAU, 1989) ; les précipitations moyennes mensuelles sur chaque bassin ont été calculées à partir des données aux stations pluviométriques par la méthode de Thiessen (GEFFARD, 1990) ;

- la banque de données satellitaires ;
- la banque de données graphiques.

Les différentes opérations qui ont permis la création des banques de données satellitaires et graphiques sont développées plus loin.

Deuxième étape : recherche des descripteurs des états de la surface dérivés des données satellitaires. Au stade actuel de la recherche, il ne nous a pas paru fondamental de nous livrer à une étude comparative de l'intérêt présenté par les différents indices existants mais plutôt de nous appuyer sur les connaissances acquises par ailleurs, pour l'exploitation des données des domaines visibles et infrarouge fournies par le senseur AVHRR équipant les satellites de la série NOAA.

L'utilisation de ces descripteurs s'est faite non pas par une analyse visuelle au travers de compositions colorées certes toujours intéressantes, mais essentiellement sur la base statistique des variations saisonnières de la moyenne arithmétique, calculée pour chaque image, de ces indices (GRÉGOIRE, 1989). L'analyse des distributions et leur comparaison date à date et bassin à bassin a complété cette partie de l'étude, l'approche de l'hétérogénéité spatiale étant faite en utilisant le paramètre de dispersion qu'est l'écart-type.

Troisième étape : analyse conjointe des données hydropluviométriques et satellitaires pour deux années hydrologiques particulièrement contrastées. Pour ce faire, l'on a tout d'abord cherché à situer, pour chaque bassin et sous-bassin, les valeurs annuelles des différents paramètres tels que les débits moyens, les lames d'eau équivalentes, les déficits et coefficients d'écoulement, par rapport à leurs valeurs interannuelles calculées sur notre période de référence 1980/1981 à 1988/1989.

Ceci nous a conduit à nous livrer à une comparaison entre les différents bassins et sous-bassins, à l'échelle annuelle, puis passant à l'échelle mensuelle à choisir deux années hydrologiques 1987/1988 et 1988/1989, très contrastées en terme de répartition de la pluie et des écoulements.

Les données satellitaires, quant à elles, ont été essentiellement exploitées pour caractériser l'évolution de l'état de la surface et plus particulièrement la réponse de la végétation à l'installation progressive de la saison sèche durant les deux années sélectionnées et ce pour chaque bassin et sous-bassin.

Enfin, on a réalisé la synthèse des analyses conduites séparément sur les données hydropluviométriques et satellitaires afin de voir dans quelle mesure l'information état de la surface, telle que dérivée de ces données satellitaires, pouvait être utilisable comme variable explicative dans la relation pluie-débit.

## 2.2 Constitution des banques

L'exploitation des données satellitaires s'est faite en trois opérations successives :

1) la préparation d'une série temporelle d'images NOAA-AVHRR HRPT couvrant les années 1987, 1988 et une partie de l'année 1989 ;

2) la préparation de fichiers graphiques permettant de localiser les bassins sur les images de la série et d'en extraire les paramètres descriptifs de l'état de la surface pour ces mêmes bassins ;

3) enfin la mise en forme de ces paramètres descriptifs pour l'analyse de leur dynamique saisonnière et interannuelle (GEFFARD, 1990 ; GRÉGOIRE, 1991).

### 2.2.1 Préparation de la série d'images NOAA-AVHRR HRPT (fig. 3)

Les données satellitaires brutes, acquises par le CCR auprès du service EARTHNET de l'Agence Spatiale Européenne (ANONYME, 1984), correspondant à 4 minutes d'enregistrement au sein d'une orbite du satellite NOAA couvrent un espace géographique allant du Golfe de Guinée au Sud Mauritanien et du Sénégal au Togo (4°N18°W, 4°N6°E ; 16°N18W, 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 2).

L'archive d'images NOAA-AVHRR HRPT, dont dispose le Projet « Surveillance de la Végétation Tropicale » du CCR, couvre les années 1987 à 1990. La première opération a donc consisté à extraire de cette base de données les

enregistrements journaliers susceptibles de permettre un suivi des deux années hydrologiques 1987/88 et 1988/89. Pour minimiser les problèmes dérivant de la distorsion des images, ces dernières ont été choisies au sein de l'orbite dont les coordonnées de passage à l'équateur étaient les plus proches de 3°W. De plus, les images présentant une couverture nuageuse excessive ont été éliminées.

**Tableau 2** Principales caractéristiques des satellites NOAA et du senseur AVHRR.

**Table 2** Main characteristics of NOAA satellites an AVHRR sensor.

| Satellite | Date de lancement      | Caractéristiques                      |
|-----------|------------------------|---------------------------------------|
| NOAA-7    | 23.06.1981             | Cycle orbital : 9 jours               |
| NOAA-9    | 12.12.1984             | Période orbitale : 102 minutes        |
| NOAA-11   | 27.10.1988             | Inclinaison sur l'orbite : 102 degrés |
|           |                        | Altitude : 825 km                     |
|           |                        | Nœud ascendant : 14 h 30              |
|           |                        | Nœud descendant : 2 h 30              |
|           |                        | Résolution LAC : 1 km au nadir        |
|           |                        | Résolution GAC : 4 km au nadir        |
| Canal     | Bande en $\mu\text{m}$ | 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                  |

Chaque image retenue pour créer la série temporelle est traitée numériquement suivant la procédure indiquée sur la figure 2.

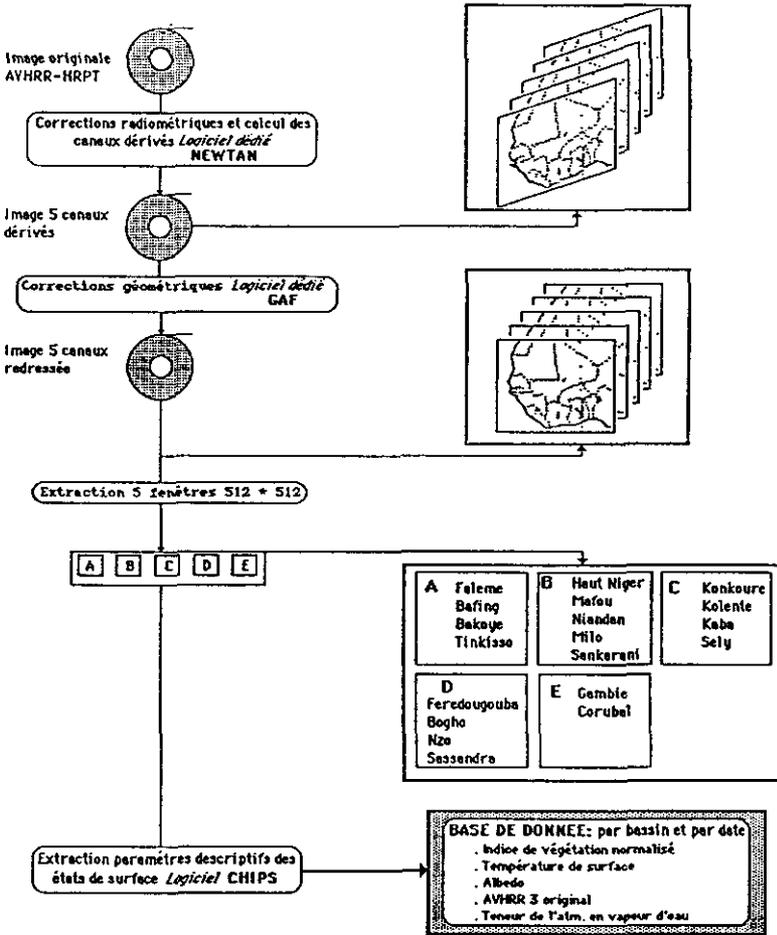
Les corrections radiométriques ont pour but de palier aux différences d'éta-lonnage entre les capteurs AVHRR respectivement installés à bords des satellites NOAA 9 et 11, dont proviennent les images couvrant la période 1987 à 1989 (VOGT, 1990).

Le calcul des canaux dérivés consiste à transformer les enregistrements originaux fournis par le capteur AVHRR en des grandeurs plus faciles à interpréter en termes d'état de la surface observée (VOGT, *op. cit.*). Trois grandeurs ont été retenues :

- l'Indice de Végétation Normalisé (NDVI) est défini comme étant une 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 ;

- la « température de surface » ( $T_s$ ) calculée par la méthode dite du « split window » à partir des températures de brillance dans les bandes AVHRR 4 et 5 (VOGT, *op. cit.*) ;

- le signal, en compte numérique, enregistré dans la bande AVHRR 3 ; ce canal infrarouge moyen (3,55-3,93  $\mu\text{m}$ ) a un double intérêt : il enregistre la radiation émise par la surface et est très sensible aux sources de chaleur élevée, ce qui le rend utile pour la détection et le suivi des feux de brousse



**Figure 2** Chaîne de traitement des données satellitaires NOAA-AVHRR-HRPT. Le calcul des indices radiométriques (Ts, NDVI, albédo, teneur en eau de l'atmosphère et canal 3 dérivé) est effectué après correction géométrique des images originales. Viennent ensuite les corrections géométriques destinées à rendre les images superposables entre elles. De ces images on extrait des fenêtres de travail de 512 x 512 pixels. On crée ensuite, à partir des contours de bassins numérisés, des polygones d'entraînement permettant d'extraire les paramètres statistiques descriptifs des états de la surface.

*Processing chain applied to the NOAA-AVHRR-HRPT data. Physical parameters (Ts, NDVI, albedo, precipitable water content of the atmosphere and channel 3 inverted) are computed after geometric correction of the original AVHRR data. Translations are then applied to register images; sub-images, 512 x 512 pixels, are used for analysis and interpretation of resulting time series. A graphic data base, containing watersheds boundaries in a numerical form and geometrically corrected on the images, is used to derive statistical descriptions of watersheds surface characteristics.*

(GRÉGOIRE *et al.*, 1988, GRÉGOIRE, 1989 ; LANGAAS et MUIRHEAD, 1988 ; MALINGREAU et TUCKER, 1988), processus particulièrement actif de modification des caractéristiques du couvert végétal et par là du cycle de l'eau à la surface. Il enregistre également une composante réfléchie par la surface. Cette propriété du canal AVHRR 3 a, par exemple, été exploitée par TUCKER *et al.* (1984) pour caractériser l'ampleur des défrichements en zone forestière au Brésil. L'association des signaux émis permet ainsi la détection, dans cette partie du spectre, des feux actifs et la différenciation entre types de couvert végétal, tout particulièrement en milieu forestier ou de transition forêt-savane (MALINGREAU *et al.*, 1989).

Après corrections radiométriques et calculs des canaux dérivés, les images résultantes ont été corrigées géométriquement sur base des paramètres de navigation du satellite et restituées en projection Mercator (SARADETH et FALK, 1989). Le rééchantillonnage des signaux radiométriques a été fait par convolution cubique. Le produit final de cette première étape étant constitué par une image 5 bandes (Ts, NDVI, albedo, teneur en eau de l'atmosphère, canal AVHRR 3 original), redressée géométriquement, de 2 400 par 1 600 pixels (taille du pixel = 1 km), centrée sur 7°W, 10°N.

L'albédo et le NDVI sont calculés à partir des valeurs moyennes de réflectance dans les bandes AVHRR 1 et 2. Ces réflectances sont obtenues à partir des radiances enregistrées par le capteur et de l'irradiance au sommet de l'atmosphère, corrigée pour les effets de l'angle zénithal solaire et de la distance soleil-terre. Ces réflectances permettent de tenir compte des différences d'illumination et d'étalement du capteur AVHRR équipant les satellites NOAA 7, 9 et 11, mais pas des effets de l'atmosphère sur le signal. Cette absence de correction pour les effets atmosphériques explique l'intérêt porté non pas aux valeurs absolues de l'indice mais plutôt aux évolutions temporelles.

Cette image 5 bandes, corrigée radiométriquement et géométriquement, contient l'information requise au niveau régional (Afrique de l'Ouest dans le cas présent) et constitue le premier niveau de la banque de données satellitaires. De ce premier niveau sont extraites des images de taille plus réduite (« fenêtre » de 500 x 500 km) permettant d'étudier un groupe de bassins particulier : les sous-bassins du fleuve Niger en Guinée, par exemple. Constituant le 2<sup>e</sup> niveau de la banque de données satellitaires, ces « fenêtres », permettent à l'utilisateur hydrologue de sélectionner les données utiles compte tenu de sa zone d'intérêt.

### 2.2.2 Préparation des fichiers graphiques

Les contours de bassins, définis sur fond de carte au 1/500 000<sup>e</sup> et 1/100 000<sup>e</sup>, ont été numérisés sur table graphique. Les fichiers résultants ont ensuite été corrigés géométriquement par prise d'amers sur la carte au 1/100 000<sup>e</sup> et sur les images NOAA-AVHRR,HRPT.

Une fois corrigés pour être superposables aux images, ces fichiers graphiques peuvent être utilisés pour localiser les bassins auxquels on s'intéresse sur les images ou pour l'extraction des signaux radiométriques servant à définir l'état de la surface au sein de ces mêmes bassins. En ce cas, les fichiers graphiques de contour sont transformés en polygones d'entraînement, au

sens statistique du terme, à l'aide du logiciel CHIPS développé par l'Université de Copenhague (RASMUSSEN, 1989).

La base de données graphique comporte ainsi deux niveaux : les contours de bassins, les polygones.

### 3 - APPLICATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

Comme indiqué plus haut, les recherches menées en commun par l'ORS-TOM et le CCR concernent cinq bassins d'Afrique de l'Ouest : le Sénégal, le Haut Niger, le Konkoure, la Sassandra et la Gambie. Notre étude se rapporte aux bassins de la Falème, du Haut Niger et du Konkoure. Afin d'illustrer la démarche qui a été la nôtre, nous avons choisi de prendre comme exemple le bassin de la Falème. Ce choix tient essentiellement à la diversité des milieux rencontrés du nord au sud, sur ce bassin, tant du point de vue du couvert végétal que de la géomorphologie ou de l'occupation des sols.

#### 3.1 Présentation du bassin

Affluent important du fleuve Sénégal, la Falème prend sa source en Guinée à 800 mètres d'altitude et marque la frontière entre le Mali et le Sénégal sur son cours moyen. La pente de son cours supérieur est extrêmement forte puisque 70 kilomètres en aval de la source, la rivière se trouve à 200 mètres d'altitude ; la pente s'adoucit ensuite pour n'être plus que de 0,24 % entre Fadougou et la confluence avec le Sénégal (ROCHETTE, 1974).

La rivière reçoit successivement quatre affluents principaux : le Kouloun-Ko en rive droite, le Balinn-Ko en rive gauche, puis le Koila-Kabe également en rive gauche, enfin le Doundi en rive droite. La station de Moussala qui contrôle un bassin de 7 420 km<sup>2</sup> se situe à l'amont de la confluence avec le Balinn-Ko et la station de Fadougou (9 300 km<sup>2</sup>) juste à l'aval. En descendant le cours de la Falème, on trouve ensuite la station de Gourbassy (17 100 km<sup>2</sup>) et enfin la station de Kidira qui contrôle un bassin de 28 900 km<sup>2</sup>.

La partie supérieure de la Falème située au sud de l'isohyète 1 500 mm (moyenne interannuelle pour la période 1950 à 1980) est considérée comme faisant partie du domaine tropical de transition. Plus au nord et jusqu'à Kidira, s'étend le domaine tropical pur (RODIER, 1964).

La végétation, dans son ensemble, est rattachée au centre d'endémisme soudanien et est définie comme une forêt claire à dominance d'espèces décidues et semi-décidues, avec présence d'une strate herbacée continue (WHITE, 1986). Cependant, la végétation est assez contrastée entre la partie supérieure du bassin, plus arrosée et donc plus boisée et la partie inférieure où la strate herbacée domine largement.

## 3.2 La constitution des banques de données

### 3.2.1 Données hydropluviométriques

Les données utilisées ont des origines très variées et nous sont parvenues sous des formes diverses : données déjà critiquées, fichiers de données brutes sur disquettes, recopies d'originaux, enregistrements de cartouches CHLOE issues de télélimnigraphes, etc.

Un certain nombre de traitements complémentaires ont donc été nécessaires pour constituer nos fichiers hydropluviométriques opérationnels sur une base mensuelle : étude de consistance des données pluie en utilisant la méthode du vecteur des indices annuels de précipitation (logiciel VECREG, Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM, CAMUS, 1989), comblement des lacunes des données hydropluviométriques essentiellement par la méthode des doubles cumuls.

Il faut tout de suite souligner deux points d'importance : d'une manière générale la qualité des données est satisfaisante, de plus, les années 1987/1988 et 1988/1989 sur lesquelles nous avons focalisé notre étude, du fait de leur intérêt, ont fait l'objet d'une attention toute particulière et présentaient en fait peu de problèmes.

La banque de données hydropluviométriques comporte donc, pour le bassin de la Falème, les débits moyens mensuels aux quatre stations hydrométriques déjà citées, ainsi que les valeurs mensuelles des précipitations aux stations de Sadiola, Gourbassy, Sagabari, Labe et Galougo.

### 3.2.2 Données satellitaires

Une vingtaine d'images pour lesquelles la couverture nuageuse est inférieure à 20 % et réparties sur les deux années hydrologiques 1987/1988 et 1988/1989 ont été extraites de la série temporelle disponible à l'IATD. Ces images s'échelonnent entre le 22 novembre 1987 et le 6 février 1989, englobant ainsi deux débuts de saison sèche.

De ces images on a extrait, pour chaque bassin, en utilisant les polygones d'entraînement définis au point 2.2.2, les paramètres statistiques suivants : les valeurs moyennes de l'indice de végétation NDVI et celles du compte numérique de l'infrarouge thermique moyen (canal 3 du capteur), ainsi que l'écart-type de la distribution de ces descripteurs qui se complètent, pour la distinction entre les zones géographiques et les périodes pour lesquelles le sol nu ou la végétation sont dominants.

## 3.3 L'analyse hydropluviométrique

Les paramètres utilisés au niveau de cette analyse et donc préalablement calculés à partir de la banque de données sur une base annuelle et sur une base mensuelle sont : les débits moyens, les lames d'eau équivalentes, les précipitations moyennes et les déficits d'écoulement.

Les valeurs annuelles et interannuelles Q, Le, P et DE de ces paramètres, pour les quatre bassins, figurent dans les quatre tableaux suivants. Afin de

garder la cohérence de l'ensemble, nous avons calculé les valeurs moyennes interannuelles des paramètres sur la même période homogène de seulement six années. Les années hydrologiques (mai à avril) 80/81, 83/84 et 84/85 ont été exclues.

**Tableau 3** Débits moyens annuels ( $m^3/s$ ).

**Table 3** Mean yearly discharges.

| Année | Moussala<br>(7 420 km <sup>2</sup> ) | Fadougou<br>(9 300 km <sup>2</sup> ) | Gourbassy<br>(17 100 km <sup>2</sup> ) | Kidira<br>(28 900 km <sup>2</sup> ) |
|-------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|
| 80/81 | 29,8                                 | 56,2                                 | (80,0)                                 | 80,2                                |
| 81/82 | 25,3                                 | 47,4                                 | (77,7)                                 | (90,7)                              |
| 82/83 | (17,3)                               | 51,0                                 | 21,2                                   | (55,6)                              |
| 83/84 | 5,2                                  |                                      | 21,0                                   | (20,2)                              |
| 84/85 | 8,6                                  |                                      | 30,0                                   | 31,0                                |
| 85/86 | 15,7                                 | 44,1                                 | 52,1                                   | (64,6)                              |
| 86/87 | 20,3                                 | 40,1                                 | 50,4                                   | (59,3)                              |
| 87/88 | 14,3                                 | 35,0                                 | 30,5                                   | 33,0                                |
| 88/89 | 33,9                                 | 71,3                                 | 75,8                                   | 86,4                                |
| Q     | 21                                   | 48                                   | 51                                     | 65                                  |

**Tableau 4** Lames d'eau équivalentes annuelles (mm).

**Table 4** Yearly depths of runoff.

| Année          | Moussala | Fadougou | Gourbassy | Kidira |
|----------------|----------|----------|-----------|--------|
| 80/81          | 127,3    | 191,9    | (148,3)   | 87,9   |
| 81/82          | 107,7    | 161,3    | (143,5)   | (99,5) |
| 82/83          | (74,1)   | 174,2    | 39,3      | (61,0) |
| 83/84          | 22,3     |          | 38,8      | (22,2) |
| 84/85          | 37,0     |          | 55,9      | 34,2   |
| 85/86          | 66,9     | 150,3    | 96,4      | (70,7) |
| 86/87          | 86,0     | 136,2    | 93,0      | (64,7) |
| 87/88          | 61,1     | 119,3    | 56,5      | 36,3   |
| 88/89          | 144,2    | 242,4    | 140,0     | 94,5   |
| L <sub>a</sub> | 90       | 164      | 95        | 71     |

**Tableau 5** Précipitations moyennes annuelles (mm).

**Table 5** Mean yearly rainfall.

| Année | Moussala  | Fadougou  | Gourbassy | Kidira  |
|-------|-----------|-----------|-----------|---------|
| 80/81 |           |           |           |         |
| 81/82 | 1 085,0   | 1 195,4   | 1 010,4   | 874,3   |
| 82/83 | (1 023,6) | (1 151,1) | (949,4)   | (796,0) |
| 83/84 |           |           |           |         |
| 84/85 | 991,6     | 1 084,4   | 932,1     | 790,6   |
| 85/86 | 1 061,5   | 1 152,1   | 1 080,6   | 1 003,2 |
| 86/87 | 948,8     | 978,7     | 905,4     | 790,3   |
| 87/88 | 984,2     | 1 015,7   | 894,6     | 801,3   |
| 88/89 | (1 001,0) | (1 008,6) | (900,5)   | (803,5) |
| P     | 1 017     | 1 083     | 957       | 845     |

**Tableau 6** Déficit d'écoulement annuels (mm).**Table 6** Yearly runoff deficit.

| Année | Moussala | Fadougou | Gourbassy | Kidira  |
|-------|----------|----------|-----------|---------|
| 80/81 |          |          |           |         |
| 81/82 | 977,4    | 1 034,0  | 866,9     | 774,8   |
| 82/83 | (949,6)  | (977,0)  | (910,1)   | (734,9) |
| 83/84 |          |          |           |         |
| 84/85 | 954,6    |          | 876,2     | 756,4   |
| 85/86 | 994,5    | 1 001,8  | 984,2     | 932,5   |
| 86/87 | 862,8    | 842,5    | 812,5     | 725,6   |
| 87/88 | 923,2    | 896,3    | 838,1     | 765,0   |
| 88/89 | (856,9)  | (766,2)  | (760,5)   | (709,0) |
| DE    | 927      | 919      | 862       | 774     |

Notre propos n'étant pas ici de nous livrer à une analyse détaillée de ces valeurs, nous en venons immédiatement aux valeurs du tableau suivant.

En effet, ce dernier permet de situer les données hydrologiques 1987/1988 et 1988/1989 par rapport aux valeurs moyennes interannuelles et également de comparer leurs comportements hydrologiques respectifs.

On trouve dans ce tableau pour chaque sous-bassin, les valeurs suivants :

Ha : hydraullicité annuelle, rapport du débit moyen de l'année considérée à la valeur moyenne interannuelle P,

Pa : pluviosité annuelle, rapport de la pluie moyenne de l'année considérée à la valeur moyenne interannuelle,

$I_{DE}$  et  $I_{Ke}$  : calculés de la même façon en utilisant le déficit d'écoulement d'une part et le coefficient d'écoulement d'autre part.

**Tableau 7** Comparaison intervassin des hydraullicités, pluviosités, déficits d'écoulement et coefficients d'écoulement pour les années hydrologiques 1987/1988 et 1988/1989.**Table 7** Inter-basins comparison of runoff, rainfall, runoff deficit indices and runoff coefficient for the hydrological years 1987/88 and 1988/89.

|          | Moussala 7 420 km <sup>2</sup> |         | Fadougou 9 300 km <sup>2</sup> |         | Gourbassy 17 100 km <sup>2</sup> |         | Kidira 28 900 km <sup>2</sup> |         |
|----------|--------------------------------|---------|--------------------------------|---------|----------------------------------|---------|-------------------------------|---------|
|          | 1987/88                        | 1988/89 | 1987/88                        | 1988/89 | 1987/88                          | 1988/89 | 1987/88                       | 1988/89 |
| Ha       | 0,68                           | 1,60    | 0,72                           | 1,47    | 0,59                             | 1,47    | 0,51                          | 1,33    |
| Pa       | 0,96                           | 0,98    | 0,94                           | 0,93    | 0,93                             | 0,94    | 0,95                          | 0,95    |
| $I_{DE}$ | 0,99                           | 0,92    | 0,97                           | 0,83    | 0,97                             | 0,88    | 0,99                          | 0,92    |
| $I_{Ke}$ | 0,68                           | 1,64    | 0,78                           | 1,60    | 0,67                             | 1,56    | 0,53                          | 1,41    |

On remarque qu'en ce qui concerne la pluie, les années considérées sont très proches de la moyenne interannuelle et cela pour l'ensemble des bassins, c'est également le cas pour les déficits d'écoulement. Par contre, l'on peut voir qu'au niveau de l'hydraullicité et bien évidemment du coefficient

d'écoulement, l'année 1987/1988 est nettement inférieure à la moyenne interannuelle et de manière sensiblement équivalente sur l'ensemble des bassins.

Le gain observé pour 1988/89 par rapport à 1987/1988 est supérieur à 100 %, ce qui est énorme. Les différences de précipitation et de déficit d'écoulement sont faibles et pourraient être attribués à des erreurs de mesure. Par contre, les différences de débit et de coefficient d'écoulement témoignent bien d'un comportement différent des bassins entre les deux années hydrologiques consécutives.

Cette différence peut être expliquée par une répartition différente de la pluie en cours d'année. L'analyse des tableaux des pluies mensuelles montre qu'il en est bien ainsi et l'on peut voir sur la figure 3 que les mois de juillet et de septembre 1988 sont nettement plus pluvieux qu'en 1987, alors que le mois d'octobre 1987, est, lui, nettement déficitaire par rapport au même mois de 1988, mais également par rapport aux autres années de notre série de référence.

Précipitations en mm

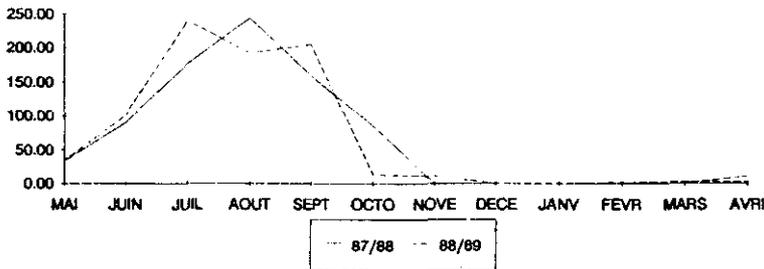


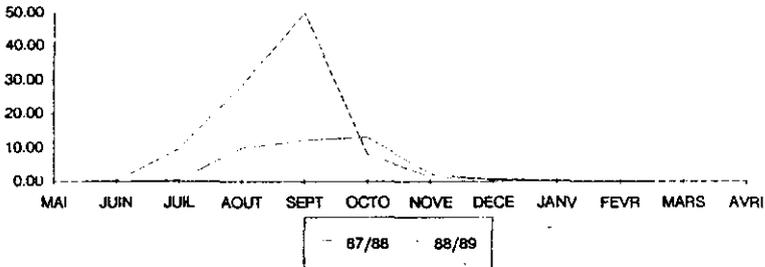
Figure 3 Comparaison des précipitations mensuelles entre les années 1987/1988 et 1988/1989 sur le bassin de la Falène à Kidira.

*Monthly rainfall comparison between years 1987/88 and 1988/89 on the Faleme basin at Kidira.*

Si l'on observe les courbes de variation des débits moyens mensuels, sur la figure 4, l'on constate que les écoulements de l'année 1988/1989 commencent et finissent plus tôt que ceux de 1987/1988. Le maximum d'écoulement est obtenu en septembre 1988 et l'on retrouve ce comportement sur tous les bassins de la Falème.

Ainsi, les fortes valeurs des précipitations en début de saison des pluies 1988/1989 ont favorisé le ruissellement, alors qu'une répartition plus homogène entre les différents mois en 1987/1988 a favorisé l'infiltration et, on peut l'espérer, l'utilisation de l'eau par la végétation.

Lames d'eau équivalentes en mm



**Figure 4** Comparaison des lames d'eau équivalentes mensuelles entre les années 1987/ 1988 et 1988/1989 sur le bassin de la Falème à Kidira.

*Monthly depths of runoff comparison between years 1987/88 and 1988/89 on the Falème basin at Kidira.*

De même, on a pu montrer que bien qu'il y ait une homogénéité certaine au plan de la répartition des précipitations entre les deux années hydrologiques considérées sur tout le bassin de la Falème, l'augmentation des écoulements en 1988/1989 était moins importante sur les sous-bassins situés plus à l'amont et pour lesquels les formations herbeuses sont moins développées.

Une observation a d'autre part été faite sur le bassin du Konkoure en Guinée. Sur ce bassin, la dominance des formations arborées dans la végétation explique, sans doute en partie, que la différence entre les deux années soit peu marquée alors que les conditions étaient réunies en 1988/1989 pour favoriser les écoulements : total plus élevé et répartition favorisant le début de la saison des pluies.

Les différences de pluviosité et de répartition des précipitations dans le temps devraient donc se traduire par une dynamique du couvert végétal différente entre les deux années et donc, en terme de réponse radiométrique, par une diminution de la valeur moyenne de l'indice de végétation plus rapide en début de saison sèche 1988/1989 qu'en début de saison sèche 1987/1988 et ce d'autant plus que les formations herbeuses, dont la dynamique saisonnière est directement liée au calendrier des précipitations, sont développées.

### 3.4 Analyse des données satellitaires concernant le bassin de la Falème

#### 3.4.1 Dynamique temporelle de l'indice de végétation NDVI

L'allure générale des courbes de la figure 5 met bien en évidence les variations saisonnières du développement de la végétation, avec un maximum bien marqué en fin de saison des pluies 1988 et deux minimums, l'un qui correspond à la pleine saison sèche de 1987/88, l'autre au premier tiers de celle de 1988/89.

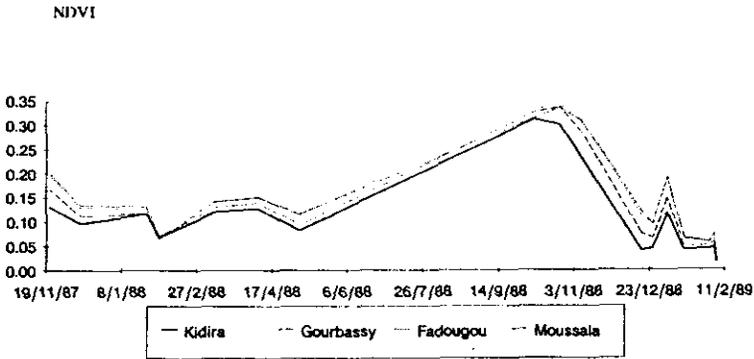


Figure 5 Courbes d'évolution des moyennes de l'indice de végétation.  
NDVI mean values evolution curves.

Bien que l'évolution de la moyenne du NDVI soit tout à fait comparable sur les quatre bassins de la Falème, ce qui est somme toute normal puisque l'on prend en compte, non pas les bassins intermédiaires mais des bassins emboîtés, l'on peut cependant observer un net décalage entre les courbes qui traduit des différences dans les états de la surface de chaque bassin. Ainsi, pour une même date, la moyenne est-elle toujours plus élevée pour la partie amont du bassin, à végétation plus dense, que pour le bassin pris à Kidira intégrant des zones aval moins favorisées sur ce point.

On remarque, en outre, que la valeur de la moyenne du NDVI est, pour tous les bassins, inférieure à 0,10 dès le mois de décembre 1988, alors que l'année précédente, elle se maintient autour de cette valeur durant toute la saison sèche. Cette faiblesse des valeurs du NDVI est à rapprocher du seuil de 0,05 considéré par JUSTICE *et al.* (1985) comme valeur minimale pour une surface à couvert herbacé très clairsemé (1 % de recouvrement), ainsi que celles mentionnées par HIERNAUX et JUSTICE (1986) dans leur étude sur le Gourma malien. De même, on voit très bien que pour la période qui correspond à la fin de la saison des pluies et au début de la saison sèche 1988/89, la pente des courbes est nettement plus accusée que pour la même période de l'année hydrologique précédente, signe de modifications beaucoup plus rapides des états de la surface, en l'occurrence essentiellement liées à un dessèchement de la végétation, notamment de la strate herbacée.

### 3.4.2 Dynamique du signal infrarouge moyen

Une analyse plus approfondie des données satellitaires, axée sur l'hétérogénéité spatiale des états de la surface et de sa dynamique temporelle peut être réalisée à partir des variations des écarts-types des distributions du NDVI et des valeurs de l'infrarouge thermique moyen et des caractéristiques des histogrammes de distribution de ces deux indices, en particulier du second. En effet, il est apparu que si l'on voulait utiliser les histogrammes de distribution il

était préférable de s'intéresser aux valeurs de l'infrarouge thermique moyen plutôt qu'à celles du NDVI. Cela est lié, en partie, à l'effet de lissage introduit par cet indice, ce qui est un défaut lorsque l'on s'intéresse aux valeurs de la moyenne, l'infrarouge thermique moyen n'étant pas assez discriminant, permet au contraire une analyse plus aisée des histogrammes de distribution des valeurs ponctuelles.

La figure 6 rassemble les histogrammes de la Falème à Kidira à des dates sensiblement équivalentes des deux années hydrologiques étudiées en détail. Cette figure illustre bien les possibilités d'appréciation des dynamiques de réchauffement du milieu suite aux effets de la saison sèche (diminution de l'humidité dans la partie superficielle des sols, sénescence du couvert, diminution de l'évapotranspiration, etc.) et indirectement des types de couvert végétal (herbacé et arbustif/arbore), par leurs modes respectifs de réponse à la saison sèche. On s'aperçoit ainsi qu'en 1987, la forme de l'histogramme se modifie considérablement au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans la saison sèche. Partant d'une forme bimodale tout d'abord très déséquilibrée, les deux modes s'équilibrent ensuite en décembre, on obtient finalement un histogramme unimodal resserré et décalé vers les fortes valeurs. Les deux modes de novembre 1987 correspondent à une situation de fin de saison des pluies, début de saison sèche, et indiquent une différenciation importante des états de la surface entre l'amont et l'aval du bassin, cette dernière partie présentant vraisemblablement déjà un dessèchement conséquent. Cette situation va, peu à peu, se généraliser à l'ensemble du bassin, ainsi qu'on peut le voir sur la courbe des variations des valeurs de la moyenne du NDVI, à la figure 6, avec comme conséquence une homogénéisation des valeurs radiométriques. Si l'on examine l'histogramme de Gourbassy, station située plus à l'amont, pour la même date de novembre 1987 on peut noter qu'il se superpose presque parfaitement au premier mode de la distribution de Kidira, ce qui confirme notre interprétation. L'on voit également, en comparant date à date les histogrammes de 1987 et de 1988, que dès le mois de novembre 1988 la distribution est unimodale, avec une valeur moyenne plus élevée qu'en 1987. Le fait que l'homogénéité soit conservée au cours de la période de réchauffement tend à prouver que la plus grande partie du couvert végétal et en particulier, la strate herbacée était déjà sèche en novembre 1988. En février 1989 l'on observe un nombre important de pixels ayant une valeur de 255 en compte numérique dans l'infrarouge thermique moyen, valeur correspondant en fait à une saturation du capteur, soit une température égale ou supérieure à 50° C, attribuables à des surfaces chaudes et sèches ou à des feux de brousse. Ces feux sont très nombreux en 1988 alors qu'ils apparaissent plus tard, en décembre, l'année précédente.

Les observations faites à partir des données satellitaires recourent donc tout à fait les premières conclusions tirées de l'analyse hydropluviométrique.

Notre objectif essentiel étant de réaliser une étude à l'échelle régionale, en Afrique de l'Ouest, nous avons poursuivi la même démarche pour l'analyse conjointe des données hydropluviométriques et satellitaires sur deux autres bassins situés au sud de la Falème.

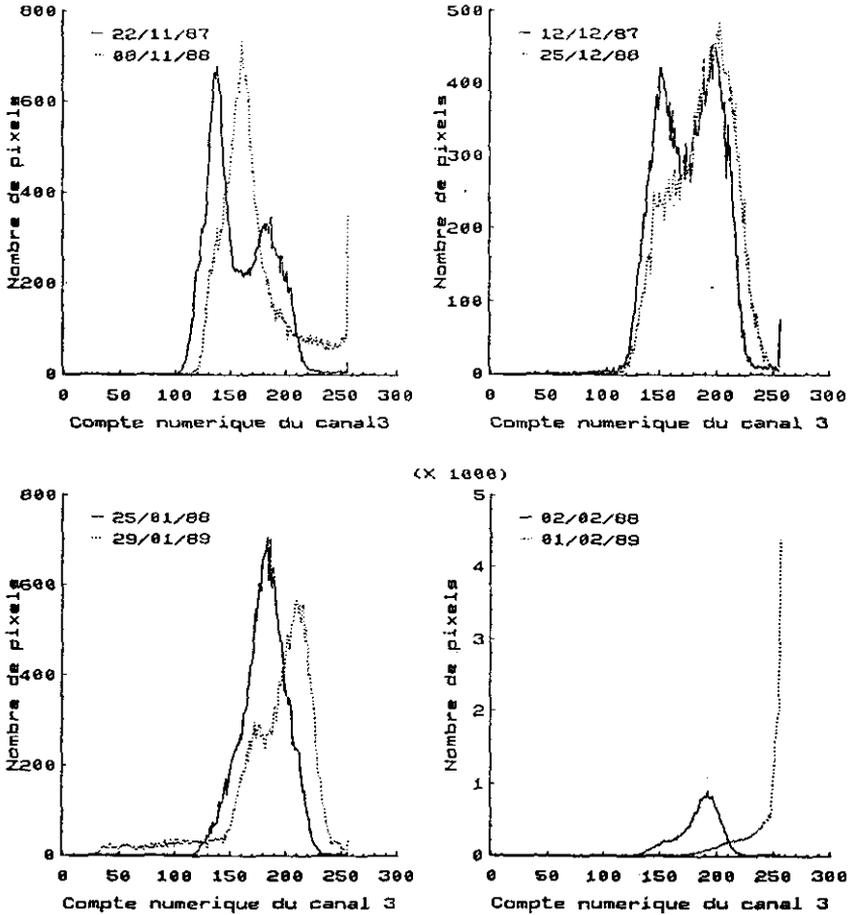


Figure 6

Comparaison de l'évolution des histogrammes de distribution des valeurs du canal (infrarouge thermique moyen) entre les débuts de saison sèche 1987/88 et 1988/89. Bassin de la Falémé à Kidira. Pour ces quatre périodes, du début de la saison sèche, on constate que le couvert végétal présente un état d'assèchement plus avancé en 1988/89 qu'en 1987/88 ; ceci est particulièrement net pour la fin janvier et le début février.

*Comparison of distribution histograms of AVHRR channel 3 values (medium infrared) observed at the beginning of the 1987/88 and 1988/89 dry seasons. Falémé basin at Kidira. Channel 3 values, at the four considered periods, show that drying up of the vegetation cover is more pronounced in 1988/89 than in 1987/88 ; maximum differences between the two dry seasons are observed at the end of January and beginning of February.*

### 3.5 Analyse combinée des données pluviométriques et satellitaires sur des bassins situés en milieu soudanien de transition

Nous nous sommes ainsi intéressés au Haut Niger aux stations de Fara-nah et de Kouroussa qui contrôlent respectivement des superficies de 3 180 et 16 450 km<sup>2</sup> et au bassin du Konkoure à la station du Pont de Téli-mé, soit 10 250 km<sup>2</sup>. En moyenne interannuelle les précipitations atteignent 1 423 mm sur le Haut Niger à Kouroussa et 1 464 mm sur le Konkoure contre, rappelon-le, 845 mm sur la Falème à Kidira. Ces trois bassins ont donc des caractéristi-ques bioclimatiques différentes et présentent des contrastes importants du point de vue des états de la surface.

L'analyse hydropluviométrique a cependant montré que le même type de situation rencontré sur la Falème durant la période d'étude existait également sur le haut Niger et, à un degré moindre, sur le Konkoure. De fait, si l'on retrouve bien à la figure 7 la même évolution générale sur les deux années hydrologiques 1987/88 et 1988/89, l'on peut également noter des différences de comportement entre les trois bassins.

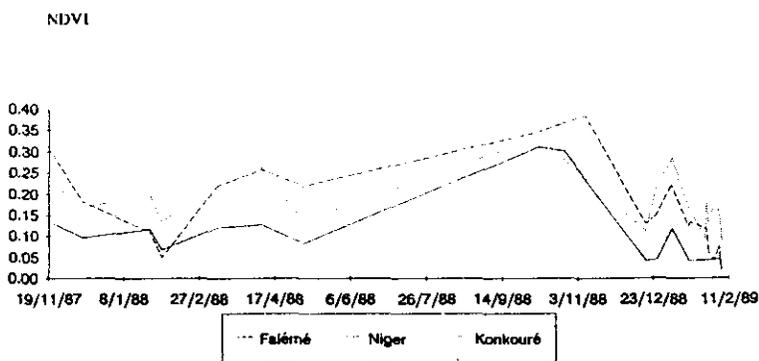


Figure 7 Comparaison interbassin des courbes d'évolution des moyennes de l'indice de végétation.

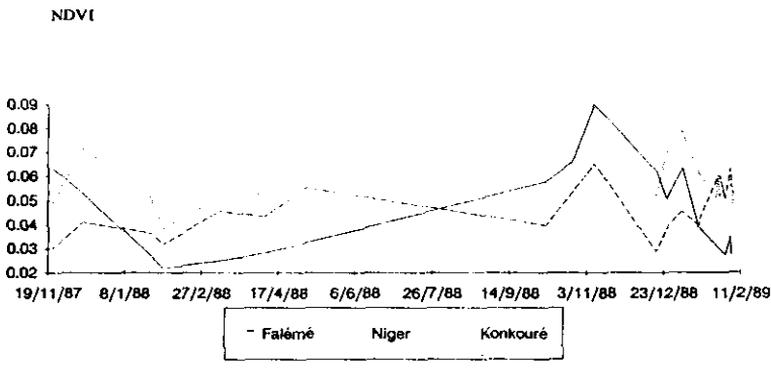
*Inter-basins comparison of NDVI mean values evolution curves.*

Sur le Konkoure où domine une végétation sempervirente, la moyenne de l'indice de végétation a une variation d'amplitude plus faible que sur les autres bassins et reste supérieure à 0,10, même en saison sèche. Le Haut Niger à Kouroussa a un comportement différent, les variations des valeurs moyennes du NDVI sont beaucoup plus importantes que pour le Konkoure, avec une amplitude de variation sensiblement équivalente à celle observée sur la Falème, mais avec des valeurs plus élevées en saison des pluies et rejoignant les valeurs basses de la Falème, en saison sèche.

Si l'on continue d'observer la même figure, on voit également, d'une part que la modification des états de la surface en début de la saison des pluies est

plus précoce sur le Konkoure et le Haut Niger, le calendrier des pluies est différent, d'autre part que l'on retrouve effectivement sur le Haut Niger des valeurs moyennes du NDVI qui indiquent une saison sèche plus précoce et plus marquée en 1988/89 qu'en 1987/88, le phénomène étant moins marqué sur le Konkoure.

Toutes ces observations sont confirmées par l'étude approfondie des courbes d'évolution des écarts-types de l'indice de végétation et des histogrammes des valeurs dérivées de l'infrarouge thermique moyen présentés aux figures 8 et 9.

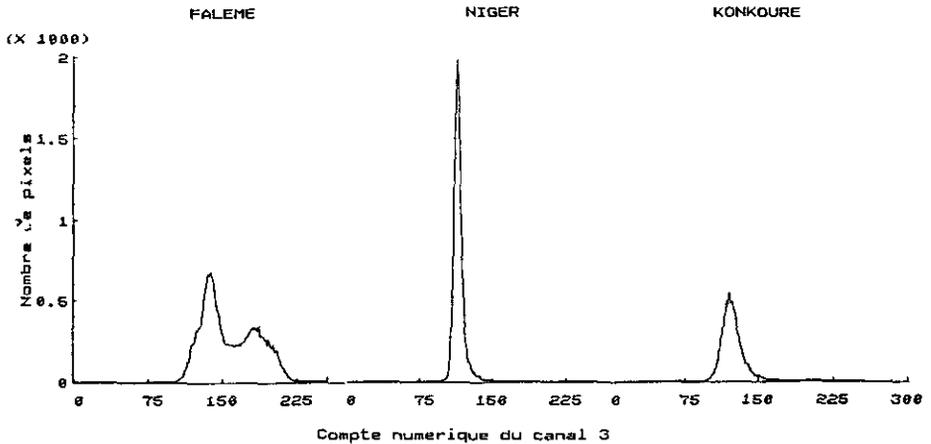


**Figure 8** Comparaison interbassin des courbes d'évolution des écarts-types de l'indice de végétation.

*Inter-basin comparison of NDVI standard deviation values evolution curves.*

L'hétérogénéité spatiale et la dynamique temporelle des états de la surface sont réduites pour le Konkoure qui a un couvert arboré permanent mais également des zones de sols nus assez développées, ce qui explique ses valeurs de NDVI plus faibles et sa distribution plus étalée que pour le Haut Niger. Ce dernier présente un couvert arbustif mieux distribué sur l'ensemble du bassin que pour la Falème, d'où une hétérogénéité plus réduite, le poids de la zone aval dans le bassin de la Falème à Kidira étant très important.

L'utilisation d'indices tels que le NDVI et l'infrarouge thermique moyen, tirés des données fournies par NOAA-AVHRR, permet donc de bien mettre en évidence différents états de la surface des bassins hydrologiques de cette région de l'Afrique de l'Ouest, d'en suivre les évolutions spatio-temporelles. Si l'on rapproche les conclusions de l'analyse hydropluviométrique de celles tirées de l'analyse des données satellitaires on note une convergence objective des observations, ce qui laisse envisager une réelle possibilité d'utiliser ces indices comme variables explicatives dans les relations pluie-écoulement, sur les grands bassins.



**Figure 9** Comparaison interbassin de la forme des histogrammes de distribution du canal 3 sur 3 bassins : la Falème à Kidira, le Haut Niger à Kouroussa et le Konkoure au Pont de Téliélé. Ces histogrammes sont tirés de l'image du 22 novembre 1987 ; à cette période de l'année, les formations herbacées sont asséchées alors que peut subsister un couvert arboré encore actif. On constate ainsi une grande homogénéité de l'état du couvert sur l'ensemble du bassin du Haut Niger, ainsi que sur le bassin du Konkoure, alors qu'à l'opposé, les deux modes sur l'histogramme de distribution de la Falème traduisent la différence de couvert végétal entre le nord et le sud du bassin.

*Histograms showing distribution of AVHRR channel 3 values for 3 river basins on the 22nd of november 1987 : Faleme at Kidira, upper Niger at Kouroussa and Konkoure at Pont de Téliélé. At this time of the year, herbaceous vegetation is dried up while trees can still be photosynthetically active. One can observe a very low dispersion of channel 3 values on the upper Niger and Konkoure river basins, due to homogeneity in vegetation cover status ; while the Faleme basins shows a bimodal distribution, indicator of the differences in vegetation cover between the northern and southern part of the watershed.*

#### 4 - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'approche méthodologique proposée, appliquée ici aux bassins de la Falème du Haut Niger et du Konkoure, a mis en évidence l'utilisation possible de l'imagerie NOAA-AVHRR pour suivre l'évolution de l'état de la surface et dériver des informations quantitatives susceptibles d'être utilisables comme données d'entrée dans les modèles hydrologiques d'écoulement pour les grands bassins de l'ouest africain. On a ainsi montré la possibilité d'utiliser ces données satellitaires pour caractériser la répartition des précipitations. De la même façon, on a mis en évidence l'effet régulateur du couvert herbacé sur la relation pluie/écoulement et la possibilité d'apprécier le pourcentage de sur-

face occupé par ce type de couvert par l'imagerie NOAA et ce, à des niveaux de perception spatio-temporelle compatibles avec les besoins exprimés par la communauté scientifique et par celle des aménageurs. Cette approche a également montré que beaucoup reste à faire en matière de recherche/développement dans au moins deux domaines.

En premier lieu, la construction et la gestion d'une banque de données regroupant l'information requise pour apprécier l'état de la surface sur les grands bassins d'intérêt pour les hydrologues et les aménageurs. Une telle banque de données devrait remplir trois conditions :

- bien que s'appuyant sur des informations dérivées d'observations satellitaires, son contenu doit répondre aux besoins de la modélisation hydroclimatologique ; cela signifie, entre autre, que des projets de recherche communs doivent regrouper spécialistes de télédétection et hydro-climatologues pour mieux définir quel doit être le contenu de cette base de données (VERSTRAETE et DICKINSON, 1986) ;

- compte tenu des besoins exprimés par les utilisateurs potentiels, l'information se doit d'être pertinente au niveau régional, sinon sous-continentale. Agir au niveau de perception voulu requiert un effort de recherche car, comme le font remarquer SOLOMON *et al.* (1988) ou RANGO (1989), il ne s'agit pas ici d'un simple facteur multiplicatif ;

- enfin, le système de référence géographique de la base de données doit être le bassin versant, compris comme unité de paysage, au sens géomorphologique du terme et non l'image satellite utilisée pour collecter l'information. En d'autres termes, l'utilisateur hydrologue ou aménageur doit pouvoir exploiter la base de donnée sans pour autant être spécialiste en plate-formes satellitaires !

En second lieu, la recherche doit amener une meilleure compréhension des interactions existant entre état de la surface, météorologie locale et processus hydrologiques, encore une fois à l'échelle spatio-temporelle requise. La base de données proposée plus haut peut constituer la source d'information indispensable à cette recherche. En retour, une meilleure compréhension des interactions mentionnées peut mener à modifier le contenu de cette base, dans un sens plus conforme aux besoins. Il n'est pas interdit de penser qu'une telle dynamique puisse aller jusqu'à influencer sur la définition des futures plate-formes de télédétection spatiale, mettant ainsi le pourquoi de ces outils d'observation de la terre avant le comment... !

La collaboration scientifique et technique entre télédéTECTEURS et hydrologues, telle que proposée ici, disposera à brève échéance d'une banque de données satellitaires étendue à toute l'Afrique. Actuellement en cours d'élaboration au sein du projet « Suivi de la Végétation Tropicale » du CCR, elle sera le résultat du traitement radiométrique et géométrique de dix années (1980-1990) d'enregistrements NOAA-AVHRR-GAC. D'une résolution spatiale de 8 km, après traitement, cette banque de données permettra d'étendre les recherches à d'autres ensembles hydrographiques essentiels pour le développement de l'Afrique sub-saharienne.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANONYME, 1984. EARTHNET, the story of images. *ESA publication* BR-18, mars 1984, p. 59.
- ANONYME, 1989. *Projet Régional d'aménagement intégré du Haut Bassin de la Gambie et ses affluents en Guinée. Etude et élaboration de projets d'aménagements de bassins versants types du Fouta Djallon et des Hauts bassins de la Gambie. Termes de référence. Rapport Fond Européen de Développement, DG VIII, CCE, Bruxelles, p. 14.*
- CAMUS H., 1989. Note au sujet de l'utilisation du programme « VEGREG » et de l'exploitation des résultats. *Note interne ORSTOM, Montpellier, p. 33.*
- COCHONNEAU G., 1989. HYDROM logiciel de banque de données hydrométriques. Manuel de l'utilisateur. Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM, Montpellier, p. 77 + annexes.
- DALU G., 1986. Satellite remote sensing of atmospheric water vapour. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 7, 1089-1097.
- GEFFARD S., 1990. Utilisation de séries temporelles de données satellitaires (NOAA-AVHRR) dans l'étude de la dynamique de systèmes hydrologiques en Afrique de l'Ouest. *D.E.A. National d'Hydrologie, ORSTOM-Université Paris XI, septembre 1990, p. 111 + annexes.*
- GRÉGOIRE J.-M., FLASSE S. et MALINGREAU J.-P., 1988. Evaluation de l'action des feux de brousse, de novembre 1987 à février 1988, dans la région frontalière Guinée-Sierra Leone. Exploitation des images NOAA-AVHRR. *Rapport CCR S.P.I. 88.39, octobre 1988, p. 23.*
- GRÉGOIRE J.-M., 1989. Effect of the dry season on the vegetation canopy of some river basins of West Africa as deduced from NOAA-AVHRR data. *Hydrological Sciences Journal*, 35, 3, 6/1990, 323-338.
- GRÉGOIRE J.-M., 1991. Watershed degradation. Use of thermal date and vegetation indices as indicators of environmental changes. Hydrological implications of changes in land surface cover. In « Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing Countries », edited by A.S. Belward and C.R. Valenzuela, KLUWER academic publishers, Dordrecht, in press 1991, 235-252.
- HIERNAUX P.H.Y. and JUSTICE C.O., 1986. Suivi du développement végétal au cours de l'été 1984 dans le Sahel malien. *Int. J. Remote Sensing*, 1986, 7, 11, 1515-1531.
- JUSTICE C.O., TOWSHEDN J.R.G., HOLBEN B.N. and TUCKER C.J., 1985. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *Int. J. Remote Sensing*, 6, 8, 1271-1318.
- LANGAAS S. and K. MUIRHEAD, 1988. Monitoring bushfires in West Africa by weather satellites. *Proceedings of the 22nd International Symposium on Remote Sensing of Environment, Abidjan, Côte d'Ivoire, october 20-26, 1988, vol. I, 253-268.*
- MALINGREAU J.P. and TUCKER C.J., 1988. Large-scale deforestation in the southeasterne Amazon Basin of Brazil. *AMBIO*, 17, 1, 1988, 49-55.
- MALINGREAU J.P., TUCKER C.J. and LAPORTE N., 1989. AVHRR for monitoring global tropical deforestation. *Int. J. Remote Sensing*, 1989, 10, 4 and 5, 855-867.
- RANGO A. ed., 1989. Remote Sensing and Large-Scale global Processes. *Proceedings of a symposium held during the Third Scientific Assembly of the International Association of Hydrological Sciences (IAHS), Baltimore, USA, May 1989, IAHS Publication n° 186, p. 191.*
- RASMUSSEN K., 1989. The CHIPS software package. *CHIPS newsletter*, n° 1, jan. 1989, Inst. of Geography, Univ. of Copenhagen, DK.
- ROCHETTE C., 1974. Le bassin du fleuve Sénégal. *Monographies hydrologiques ORSTOM, Ed ORSTOM, p. 325.*
- RODIER J., 1964. Régimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'ouest du Congo. *Mémoires ORSTOM n° 6, p. 137.*
- SARADETH S. and FALK A., 1989. Orbit parameter recovery and image rectification techniques for NOAA AVHRR data, *Proceedings of IGARSS'89/12th Canadian Symp. on Remote Sensing, held at Vancouver,*

- Canada, on 10th-14th July 1989, 1640-1643.
- SOLOMON M. S. I., PIETRONIRO A., WISHART W., PIEYNS S., GUILLOT B. and CARN M., 1988. Application de la télédétection à l'évaluation des ressources en eau du Sahel. *Veille Climatique Satellitaire*, septembre 1988, n° 24, 26-37.
- TOWNSHED N. J. R. G. and JUSTICE C. O., 1986. Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. *Int. J. Remote Sensing*, 1986, 7, 11, 1435-1445.
- TUCKER C. J., HOLBEN B. N. and GOLF T. E., 1984. Intensive forest clearing in Rondonia, Brazil, as detected by satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 15, 255-261.
- VERSTRAETE M. M. and DICKINSON R. E., 1986. Modeling surface processes in atmospheric general circulation models. *Annales Geophysicae*, 1986, 4, B, 4, 357-364.
- VOGT J., 1990. Calculation of T-O-A-albedo, NDVI, surface temperature, and precipitable water content of the atmosphere from NOAA AVHRR data. User guide to the program NEWTAN. *Technical Note n° 1.90.72*, JRC Ispra, August 1990, p. 29.
- WHITE F., 1986. La végétation de l'Afrique. Mémoire accompagnant la carte de végétation de l'Afrique UNESCO/AETFAT/UNSO. *Rapport ORSTOM-UNESCO*. UNESCO ISBN : 92-3-201955-8 ; ORSTOM, ISBN : 2-7099-0832-8.