

Don Cued

Pole 14

## Hydrology in Inland Valleys of West and Central Africa

### L'hydrologie des bas-fonds d'Afrique de l'Ouest et d'Afrique Centrale

<sup>can</sup>  
<sup>arie</sup>  
/ LAMACHÈRE J.M., DACOSTA \*\*

\* Laboratoire d'Hydrologie, ORSTOM, Montpellier

\*\* Université Cheikh Anta Diop / ORSTOM, Dakar

**Summary** - This article presents the main hydrology lessons learned to date with respect to inland valleys in West and Central Africa. Inland valleys, typically small shallow valleys, depend exclusively on run-off water in the Sahelian zone and on both run-off water and drainage from the groundwater table in the Sudanian zone. The water supply of inland valleys comes from small watersheds (10 to 300 km<sup>2</sup>).

Numerous studies in climatology, hydrology and hydrogeology (AGRHYMET, CIEH, ORSTOM, BRGM) have provided a fairly complete understanding of the hydrology of inland valleys in the region. The most recent study (work in progress) concerns precisely the evaluation of water flow and flooding in small watersheds in Sahelian and dry tropical Africa (FAO, 1996).

Agricultural development of inland valleys in the region has also been the subject of a synthesis study within the CORAF/R3S project (Albergel *et al.*, 1993) involving collaboration between CIEH, WAU, CIRAD, ORSTOM, FSAGx and three African research institutions in Senegal, Mali and Burkina Faso: ISRA, IER, and INERA.

In humid tropical Africa, publications on hydrology of small watersheds are more dated, coming for most part from the 60s and 70s. Developing research on sustainable agricultural development of inland valleys in the humid zone of West and Central Africa will require an analysis of existing knowledge and a review of hydrologic observations on small watersheds in this part of Africa.

**Résumé** - Cet article présente les principaux acquis dans le domaine de l'hydrologie des bas-fonds, en Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale. Les bas-fonds, petites vallées à fond plat, sont alimentés en eau exclusivement par les eaux de ruissellement en zone sahélienne, par les eaux de ruissellement et de vidange des nappes aquifères en zone soudanienne. L'alimentation en eau des bas-fonds provient de petits bassins versants (10 à 300 km<sup>2</sup>). En Afrique sahélienne et tropicale sèche, de nombreuses études en climatologie, en hydrologie et en hydrogéologie (AGRHYMET, CIEH, ORSTOM, BRGM) permettent actuellement de connaître de manière globalement satisfaisante les conditions hydriques d'alimentation en eau des bas-fonds de cette région. L'étude la plus récente (en cours d'édition) concerne précisément l'évaluation des apports et des crues des petits bassins versants de l'Afrique sahélienne et tropicale sèche (FAO, 1996).

La mise en valeur agricole des bas-fonds de cette région a également fait l'objet d'une étude de synthèse dans la cadre d'un projet CORAF/R3S (Albergel *et al.*, 1993) grâce à la collaboration entre le CIEH, l'UAW, le CIRAD, l'ORSTOM, la FSAGx et trois organismes de recherche africains du Sénégal, du Mali et du Burkina Faso : l'ISRA, l'IER et l'INERA.

En Afrique tropicale humide, les publications hydrologiques concernant les petits bassins versants sont plus anciennes. Elles datent, pour la plupart, des années 60 et 70. Le développement des recherches sur la mise en valeur agricole des bas-fonds, dans la zone humide d'Afrique de l'Ouest et d'Afrique Centrale, nécessite une analyse des acquis et une reprise des observations hydrologiques sur des petits bassins versants de cette partie de l'Afrique.





## 1 - Introduction

According to Raunet (1985), in the tropical zone, an inland valley bottom is a "small valley, a small shallow valley or valley with less enclosed fringes, 20 to 500 meters of width, without substantial or permanent water flow". An inland valley consists of a central flat part and of slopes more or less pronounced which connect the lower central portion to the general contours of the surrounding relief. The central part can be cut by a shallow minor riverbed, only a few meters wide, and having no river banks. Soils in inland valley bottoms have a colluvio-alluvial origin.

During part of the year, inland valleys drain run-off and ground water flow from a watershed with an area less than 300 km<sup>2</sup>. Raunet (1985) limited this area to 20 km<sup>2</sup>, which would seem a bit too limiting for weak relief zones. For watershed exceeding 300 km<sup>2</sup>, the inland valley widens, its soil become more heterogenous and its central portion has an undulating topography, with depressions difficult to drain and mounds that are rarely flooded.

In the first section, we will present current knowledge on hydrology in West and Central Africa and, more particularly, water supply and flooding in watersheds which furnish the water flow in inland valleys within this zone. In a second section concerning hydro-agricultural land development, we summarize what is currently known from the CORAF/R3S project, "Sustainable agricultural development of inland valleys in the Sahel" (Albergel *et al.*, 1993). In the final section, we present an outline of hydrologic studies which could be conducted by the Inland Valley Consortium at the regional scale (1/200 000), semi-detailed scale (1/50 000,) and detailed scale of characterization of an inland valley.

## 2. Hydrology of watersheds in West and Central Africa

### 2.1. History

At the level of West and Central Africa, regional organizations such as AGRHYMET for the CILSS countries and CIEH (Inter-African Hydraulic Study Commission) for French-speaking African countries, have been involved since their beginning in the collection of regional hydrologic data and in conducting synthesis studies to permit characterization of hydrologic regimes of non studied watersheds.

Since the end of the Second World War, the Department of Hydrology at ORSTOM has been given responsibility by the French government to collect all hydrologic data for Francophone Africa needed for building hydraulic development projects. The first representative experimental watersheds were established in West Africa in the 50s. After substantial development in the 60s and 70s, studies on small watersheds undertaken by ORSTOM in Africa fell off toward the end of the 70s and were limited in the 80s to hydrologic studies linked to inland valley development projects.

Thanks to regional development projects, numerous African countries also began to collect hydrologic observations on small experimental watersheds. An inventory conducted by CIEH in 1990 reports more than 500 small watersheds distributed over 15 countries in West and Central Africa, among which 300 had been monitored by ORSTOM.

## 1. Introduction

Selon Raunet (1985), en région intertropicale, un bas-fond est un "vallon, petite vallée à fond plat ou gouttière peu encaissée, de 20 à 500 mètres de large, sans cours d'eau important ou pérenne". Il se compose d'une partie centrale plane et de versants plus ou moins marqués qui raccordent la partie centrale déprimée au modelé général du relief environnant. La partie centrale peut être incisée d'un lit mineur peu profond, large de quelques mètres et sans bourrelets de berge. Les sols y sont de nature colluvio-alluviale.

Le bas-fond draine, pendant une partie de l'année, les eaux de ruissellement et les eaux de la nappe phréatique d'un bassin versant de superficie inférieure à 300 km<sup>2</sup>. Raunet (1985) limitait cette superficie à 20 km<sup>2</sup>, ce qui semble, dans les régions à faible relief, un peu excessif. Au-dessus d'une superficie de 300 km<sup>2</sup> pour le bassin versant, le bas-fond s'élargit, ses sols deviennent hétérogènes et sa partie centrale présente une topographie ondulée, avec des dépressions difficiles à drainer, des bosses rarement inondées, et des bourrelets de berges.

Nous exposerons d'abord les acquis hydrologiques en Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale concernant l'hydrologie des petits bassins-versants qui alimentent les écoulements des bas-fonds de cette région. Dans un second paragraphe, relatif aux aménagements hydro-agricoles, nous résumerons les connaissances acquises par le projet CORAF/R3S "Mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel" (Albergel et al., 1993). Dans un dernier paragraphe, nous présenterons un canevas des études hydrologiques qui pourraient être réalisées par le Consortium Bas-Fonds à l'échelle de la caractérisation régionale (1/200 000<sup>e</sup>), de la caractérisation semi-détaillée (1/50 000<sup>e</sup>) et de la caractérisation détaillée d'un bas-fond.

## 2. Hydrologie des petits bassins versants en Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale

### 2.1. Historique

A l'échelle de l'Afrique de l'Ouest et de l'Afrique Centrale, des organismes régionaux, tels qu'AGRHYMET pour les pays du CILSS et le CIEH (Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques) pour l'Afrique francophone, se sont intéressés, dès leur création, à la collecte de données hydrologiques régionales et à la réalisation d'ouvrages de synthèse permettant de caractériser les régimes hydrologiques de bassins versants non jaugés.

Pour l'Afrique francophone, dès la fin de la seconde guerre mondiale, la division hydrologie de l'ORSTOM a reçu mission du gouvernement français de collecter toutes les données hydrologiques susceptibles d'être utilisées pour la réalisation d'aménagements hydrauliques. Les premiers bassins versants représentatifs expérimentaux d'Afrique francophone ont été installés à la fin des années 50. Après un grand développement dans les années 60 et 70, les études sur petits bassins versants entreprises par l'ORSTOM ont connu en Afrique un net ralentissement à la fin des années 70 et se sont limitées, vers la fin des années 80, à des études hydrologiques liées à l'aménagement des bas-fonds.

A la faveur de projets régionaux de développement, de nombreux pays africains ont effectué des observations hydrologiques sur des petits bassins versants expérimentaux. Un inventaire réalisé par le CIEH en 1990, recense plus de 500 petits bassins répartis sur 15 pays d'Afrique de l'Ouest et d'Afrique Centrale, dont plus de 300 ont été suivis par l'ORSTOM.

With the support of the French Ministry of Cooperation, and later the FAO, ORSTOM and CIEH have conducted several regional studies concerning :

- annual rainfall,
- rainfall intensity for intervals of 10 mn to 24 hours,
- predicting decennial flooding in small watersheds,
- evaluating the annual water flow in small watersheds.

Most of these studies were conducted using data collected in Francophone Africa. Their extension to Anglophone Africa could be one of the Inland Valley Consortium's objectives.

## **2.2. Climatology and Annual Rainfall**

One of the main references on climates of tropical Africa is the article by Leroux (1983), "*Le Climat de l'Afrique Tropicale*". In 1990, AGRHYMET (Niamey) published maps of the monthly Penman PET in West Africa for the period 1951-1986. In 1992, AGRHYMET published an agroclimatological atlas of CILSS countries in 11 volumes.

Mahé's thesis (1993) entitled "*Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique*" studies the inter-annual variability of factors of the hydrologic balance and analyzes average and extreme hydroclimatic situations. This study constitutes the most recent Francophone synthesis of African hydroclimatology.

In the Anglophone literature, we noted such references as: Hulme (1992), Nicholls (1989), Owen and Ward (1989), Riehl (1979).

## **2.3. Rainfall Intensities**

In 1963, ORSTOM published Brunet-Moret's studies on exceptionally heavy rains in Western Africa (Benin, Burkina Faso, North-Cameroon, Côte d'Ivoire, Mali, Mauritania, Niger, Senegal, Chad and Togo). Statistical analyses made in various West African countries during the 80s and 90s show that results obtained by Brunet-Moret are still valid despite the long dry period from 1970 to 1990 (Albergel, 1986 and Dacosta, 1989).

In 1980, CIEH published a study of low frequency daily rains for all of the CIEH member states (Lahaye), and later in 1984, height - duration - frequency curves for West and Central Africa for rains of 5 mn to 24 hours duration.

## **2.4. Predicting seasonal rise in river levels (flooding) and evaluating annual water flow in small watersheds**

For small watershed hydrology in West and Central Africa, we found eight references focusing on predicting decennial flooding and evaluating annual water flows. Five of these were written by Rodier (1965, 1975, 1976a, 1976b, 1982).

Avec l'appui du Ministère français de la coopération, puis de la FAO, l'ORSTOM et le CIEH ont réalisé plusieurs études régionales concernant :

- la pluviométrie annuelle,
- les intensités pluviométriques sur des intervalles de 10 mn à 24 heures,
- la prédétermination des crues de fréquence décennale des petits bassins versants,
- l'évaluation de l'écoulement annuel des petits bassins versants.

La plupart de ces études ont été réalisées à partir de données collectées en Afrique francophone. Leur extension à l'Afrique anglophone pourrait être un des objectifs du Consortium Bas-Fonds.

## **2.2. La climatologie et la pluviométrie annuelle**

Une des principales références sur les climats d'Afrique tropicale est la publication de Leroux (1983), *"Le climat de l'Afrique Tropicale"*. En 1990, AGRHYMET (Niamey) publiait des cartes de l'ETP Penman mensuelle en Afrique de l'Ouest sur la période 1951-1986. En 1992, AGRHYMET publiait un atlas agroclimatologique des pays du CILSS, en 11 volumes.

La thèse de Mahé (1993), intitulée *"Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique"*, fait l'étude de la variabilité inter-annuelle des éléments du bilan hydrique et analyse les situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Elle constitue la synthèse francophone la plus récente en hydroclimatologie africaine.

Dans la littérature anglophone nous avons relevé des références comme Hulme (1992), Nicholls (1989), Owen et Ward (1989), Riehl (1979).

## **2.3. Les intensités pluviométriques**

Dès 1963, l'ORSTOM publiait les travaux de Brunet-Moret sur les averses exceptionnelles en Afrique Occidentale (Bénin, Burkina Faso, Nord Cameroun, Côte d'Ivoire, Mali, Mauritanie, Niger, Sénégal, Tchad et Togo). Les analyses statistiques qui ont été faites dans diverses régions d'Afrique de l'Ouest au cours des années 80 et 90, montrent que les résultats obtenus par Brunet-Moret sont toujours valables malgré la longue période de sécheresse des années 1970 à 1990 (Albergel, 1986 et Dacosta, 1989).

En 1980, le CIEH publiait une étude des pluies journalières de fréquence rare dans tous les Etats membres du CIEH (Lahaye), puis en 1984 les courbes hauteur-durée-fréquence en Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale pour des pluies de durée 5 mn à 24 heures.

## **2.4. La prédétermination des crues et l'évaluation des apports annuels des petits bassins versants**

Dans le domaine de l'hydrologie des petits bassins versants en Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale, nous avons relevé huit références bibliographiques traitant de la prédétermination des crues décennales et de l'évaluation des apports annuels. Cinq d'entre elles ont été écrites par Rodier (1965, 1975, 1976a, 1976b, 1982).

At FAO's request, CIEH, ORSTOM and CEMAGREF worked together to produce a reference manual on predicting flooding and evaluating annual water flow in small watersheds in Sahelian and dry tropical Africa. This manual is in the process of being published by FAO (1996). It will be accompanied by software for calculating the frequency of decennial flooding (SAHEL software).

### 3. Sustainable Agricultural Development in Inland Valley Bottoms.

The following section draws mainly from the book "*Mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel*" (Albergel *et al.*, 1993). It is based on knowledge acquired from the CORAF/R3S project which brought together national agronomic research services of Senegal, Mali and Burkina Faso, and CIEH, WAU, CIRAD, ORSTOM, and FSAGx.

The main advantage of inland valley bottoms is the concentration of surface and groundwater flows, favoring agricultural development either with varieties requiring more water such as sorghum and rice in the Sahelian zones, or with longer duration and high yielding varieties in Sudan zones. Water resource development in inland valley bottoms can stabilize water supplies for crops, protect them from flooding, and increase arable land area through partial or total water control.

The existence of shallow water tables in inland valleys permits the development of arboriculture and vegetable cultivation during the dry season, using water supplied by manual irrigation from shallow wells.

#### 3.1. Natural constraints

In Sahelian and northern Sudan zones where annual rainfall is less than 1 000 mm, strong flooding, coupled with a sufficiently steep slopes of approximately 2 to 5 m/km in inland valley bottoms can create flow rates greater than 0.6 m/s which, in the beginning of the rainy season, causes young plants to be washed away and, at the end of the season, lodging crops. Lack of rain translates into less flooding which normally supplements the water supply for valley bottom crops. Risk of water deficit is therefore significant, and agricultural intensification requires supplemental irrigation during the rainy season and full irrigation during the dry season.

In the southern Sudanian and Guinean zones, annual rainfall is more than 1 000 mm, successive showers can submerge crops cultivated in lower zones and asphyxiate them. At the end of the vegetative cycle, during the flowering, grain filling and maturation stages, water needs for crops increase, first more and take slightly lower than the PET; risk of drought stress then becomes important, especially given low annual rainfall. Low rainfall leads to a premature drying of the water flow in the inland valley bottom and a rapid fall of the ground water level, detrimental to crops if the soil is sandy.

A special note should be made regarding coastal estuary small valleys where the main constraints to agricultural development are excessive salinity and toxicity of soils due to rapid and strong acidification following the long dry period that has struck West Africa for the last twenty years.

A la demande de la FAO, le CIEH, l'ORSTOM et le CEMAGREF se sont associés pour réaliser un manuel de référence sur la prédétermination des crues et l'évaluation des apports annuels des petits bassins versants en Afrique sahélienne et tropicale sèche. Cet ouvrage est en cours d'édition par la FAO (1996). Il sera accompagné d'un logiciel de calcul des crues de fréquence décennale (le logiciel SAHEL).

### 3. La mise en valeur agricole des bas-fonds.

L'exposé qui suit est extrait, pour l'essentiel, de l'ouvrage "*Mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel*" (Albergel et al., 1993). Il résulte des acquis du projet CORAF/R3S ayant réuni, avec les services nationaux de recherche agronomique du Sénégal, du Mali et du Burkina Faso, le CIEH, l'UAW, le CIRAD, l'ORSTOM et la FSAGx.

Le principal avantage des bas-fonds est de concentrer les écoulements superficiels et souterrains, favorisant ainsi leur mise en culture, soit avec des variétés plus exigeantes en eau, comme le sorgho et le riz dans les zones sahéliennes, soit avec des variétés à cycle plus long et à plus fort rendement dans les zones soudaniennes. Les aménagements hydrauliques dans les bas-fonds ont pour rôle de sécuriser l'alimentation hydrique des cultures, de les protéger contre les crues et d'augmenter les superficies cultivables sous maîtrise partielle ou totale de l'eau.

L'existence de nappes aquifères à faible profondeur dans les bas-fonds permet également le développement de l'arboriculture et de la culture maraîchère de contre-saison, alimentée en eau par une irrigation artisanale à partir de puisards peu profonds.

#### 3.1. Les contraintes naturelles

En zones sahélienne et nord-soudanienne, où la pluviométrie annuelle est inférieure à 1 000 mm, les fortes crues, couplées avec une pente assez forte des bas-fonds, d'environ 2 à 5 m/km, conduisent à des vitesses de courant supérieures à 0,6 m/s, qui provoquent, en début de saison des pluies, l'arrachage des jeunes plants et, en fin de saison, la verse des cultures. L'absence de pluies s'y traduit par l'absence de crues qui complètent ordinairement l'alimentation hydrique des cultures de bas-fond. Les risques de déficit hydrique y sont donc importants et l'intensification des cultures passe par une irrigation de complément en saison des pluies et une irrigation permanente en saison sèche.

En zones sud-soudanienne et guinéenne, où la pluviométrie annuelle est supérieure à 1 000 mm, des averses successives sur plusieurs jours peuvent submerger les cultures des zones basses et les asphyxier. En fin de cycle végétatif, pendant les phases de floraison, de fructification et de maturation, les besoins en eau des plantes deviennent élevés, supérieurs puis légèrement inférieurs à l'ETP ; les risques de stress hydrique sont alors importants, d'autant plus que la pluviométrie annuelle est faible. La faiblesse des pluies se traduit par un tarissement précoce des écoulements dans le bas-fond et par une baisse rapide du niveau des nappes aquifères, d'autant plus préjudiciable aux cultures que les sols sont plus sableux.

Une mention spéciale doit être faite pour les bas-fonds côtiers estuariens, où les contraintes principales à la mise en valeur agricole sont la sur-salure des sols et leur toxicité par acidification rapide et très poussée, consécutive à la longue sécheresse qui sévit depuis une vingtaine d'années en Afrique de l'Ouest.

This drought has contributed to a widespread fall in ground watertables and the exposure of mangrove soil resulting in hyper acidification and oxidation of sulfates. It has facilitated infiltration of salt water into aquifer of inland valley bottoms affected by the tide, sterilizing the most exposed soils through excessive salinization.

To the hydro-pedological constraints must be added the more general constraint relative to rapid growth of weeds on cultivated inland valley land. This constraint is an extremely important limiting factor to developing inland valley agriculture as it entails additional work for farmers, which is then translated into higher production cost for inland valley crops in terms of labor than for upland crops.

### 3.2. Human constraints

For various reasons, inland valley agriculture plays a marginal role in African cropping systems. This role is growing, however, as one moves from north to south, from regions with low rainfall toward more watered areas. This marginality translates into the use of a large proportion of female labor in inland valley cultivation and a lower proportion of land under cultivation. This situation may be explained by farmer strategies which seek to minimize risk and optimize labor investment that can be measured in numbers of days of work.

Exploiting a rice plot of 0.25 ha requires approximately 72 work days in Yatenga (northwestern Burkina Faso), 50 days in Comoé (southwestern Burkina Faso) and in southern Mali, and 92 days in Casamance (southern Senegal). Similarly, a plot of sorghum of the same size requires only 30 work days in Yatenga. In general, rainfed crops need 40 work days less for an area of 2.5 ha. As more days of work are needed for cultivating inland valleys and farmers can choose to cultivate cash crops in upland areas, such as peanuts in Senegal or cotton in Mali and in Burkina Faso, the modest interest given to rainy season valley bottom crops can be better understood. This part of landscape becomes more interesting when farmers can practice vegetable and fruit crops during the dry season.

Another important constraint to developing inland valley agriculture is related to the land tenure system. African farmers are rarely land owners in the Western definition of the term. They usually have usufruct of the land, with stronger constraints often attached to it the further the farmer is toward the end of a long chain of successive land loans that farmers give to each other. The person farming the land must consult with the rightful landowners to change any management practices on the land, which was given to him/her for a specific use and which is not possible to change.

### 3.3. Hydro-agricultural land development

Various types of development schemes have been tested within the context of the CORAF/R3S research project on the agricultural development of inland valleys in the Sahel:

- In the Sahelian zone: a semi-underground dike, a small dam with gates, a dam with water storage durations limited to a couple of months during the dry season,
- in the Sudanian zone: a part-underground dam, earth dikes, drainage canals with gates,
- in the estuary zone : anti-salt dams, with traditional paddy fields and leveled plots.

Cette sécheresse a provoqué une baisse généralisée des nappes aquifères et l'exondation des sols de mangrove, entraînant leur hyperacidification par oxygénation des sulfures. Elle a facilité la pénétration des eaux salées dans les nappes aquifères des bas-fonds sous l'influence de la marée, stérilisant par sur-salure les sols les plus exposés.

A ces contraintes hydro-pédologiques, on doit ajouter une contrainte générale qui concerne la croissance rapide des mauvaises herbes sur les terres cultivées dans les bas-fonds. Cette contrainte est un facteur limitant extrêmement important pour la mise en culture des bas-fonds, car elle entraîne un surcroît de travail, qui se traduit par un coût de production en main d'oeuvre plus élevé pour les cultures de bas-fonds que pour les cultures des terres hautes.

### 3.2. Les contraintes humaines

Pour des raisons diverses, la culture des bas-fonds tient une place marginale dans les systèmes de culture africains. Cette place est cependant croissante quand on se déplace du nord vers le sud, des régions à faible pluviosité vers les zones plus arrosées. Cette marginalité se traduit par une forte présence féminine et par une faible proportion de mise en culture. Cette situation s'explique en particulier par la stratégie paysanne qui vise à minimiser les risques et à optimiser l'investissement humain que l'on peut comptabiliser en journées de travail.

L'exploitation d'une parcelle de riz de 0,25 ha requiert environ 72 jours de travail au Yatenga (nord-ouest du Burkina Faso), 50 jours dans la Comoé (sud-ouest du Burkina Faso) et au sud du Mali, 92 jours en Casamance (sud du Sénégal). En comparaison, une parcelle de sorgho de même superficie ne requiert que 30 jours de travail au Yatenga. Plus généralement, une culture pluviale nécessite moins de 40 jours de travail pour 0,25 ha. Si, de plus, les paysans ont la possibilité de pratiquer des cultures de rente sur les terres hautes (arachide au Sénégal, ou coton au Mali et au Burkina Faso), on comprend le peu d'intérêt des cultures d'hivernage dans les bas-fonds. Cette partie du terroir retrouve un intérêt lorsque les paysans peuvent y pratiquer des cultures maraichères de contre-saison et des cultures fruitières.

Une autre contrainte importante à la mise en valeur agricole des bas-fonds est relative au régime foncier. Les paysans africains sont rarement propriétaires du sol au sens occidental du terme. Ils en ont le plus souvent l'usufruit, avec des contraintes d'autant plus fortes qu'ils se trouvent au bout de la chaîne des prêts successifs que les paysans ont l'habitude de s'octroyer. L'exploitant doit en référer aux maîtres de la terre pour modifier la gestion de sa parcelle, qui lui a été cédée pour un usage bien précis qu'il n'est pas possible de le modifier.

### 3.3. Les aménagements hydro-agricoles

Plusieurs types d'aménagements ont été testés dans le cadre du projet de recherche CORAF/R3S sur la mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel :

- En zone sahélienne : une digue filtrante, un petit barrage à batardeaux, un barrage avec une durée de stockage limitée à quelques mois en saison sèche,
- En zone soudanienne : barrage semi-souterrain, diguettes en terre, canaux de drainage avec batardeaux,
- En zone estuarienne : barrages antisel, avec casiers rizicoles traditionnels billonnés et casiers planés.

The final report for the CORAF/R3S project also provides qualitative elements of the advantages and disadvantages of water management development by extending the analysis to all known types of water management systems found in inland valleys. The simplest structures (permeable dikes in the Sahelian zone, earthen dikes in the Sudan-guinea zones) provide only a first level of water supply security for crops; with this type of system, this security remains closely dependent on climatic and local soil conditions.

Slightly more elaborate structures (partially-underground dam, mini-dam with gates, a central collector with gates, anti-salt dam) are far more expensive but insure, if well managed, better water supply security for crops and better protection against flooding. These structures require preliminary studies and a good technical level for controlling the water level.

The most sophisticated water management schemes require the addition of structures for storing water, a system of distributing water through irrigation canals and structures for protecting against flooding. This type of water management is far more expensive; it needs more in-depth studies, good farmer technical skills and good social organization for controlling irrigation water, maintenance of hydraulic works, agricultural diversification and intensification (the only solution for making the infrastructure cost effective).

Development assistance permits building water management systems that can be cost effective in the long run under certain conditions, the first one being that of a good appraisal study that takes into account not only natural constraints without minimizing their importance, but also human constraints, financial farm constraints and social constraints. Very few water management schemes take into account the need for farmers to limit their losses by allocating their plots as a function of risks they might incur; very few water management schemes are conceived to satisfy users' needs. They are most often conceived to limit construction costs and rarely take into account farming constraints.

#### **4. Characterizing Inland Valley Hydrologic Operations**

The Inland Valley Consortium seeks to characterize inland valleys:

- at the sub-continental level (West and Central Africa),
- at the national level (a country),
- at the regional level (a homogeneous physical or social unit),
- at the local level (an inland valley).

We will try to offer a list of parameters that need to be taken into account to understand inland valley hydrologic dynamics at the different levels, and provide the main sources of available information.

##### **4.1. At the Continental and National levels**

At these scales, the main information to be collected involves annual rainfall, maximum daily rains, underground and surface water resources. At the national level, the main sources of information are found with national services for meteorology and water resources.

Le rapport final du projet CORAF/R3S fournit également des indications qualitatives sur les avantages et les inconvénients des aménagements, en étendant l'analyse à tous les types connus d'aménagement de bas-fond. Les ouvrages les plus simples (digues filtrantes en zone sahélienne, diguettes en terre en zone soudanienne et guinéenne), ne fournissent qu'un premier niveau de sécurisation de l'alimentation hydrique des cultures ; celle-ci reste, avec ce type d'aménagement, étroitement dépendante des conditions climatiques et pédologiques locales.

Les ouvrages un peu plus élaborés (barrage semi-souterrain, micro-barrage à batardeaux, collecteur central à batardeaux, barrage anti-sel), sont beaucoup plus coûteux mais ils assurent, s'ils sont bien gérés, une meilleure sécurisation de l'alimentation hydrique des cultures et une meilleure protection contre les crues. Ces ouvrages nécessitent des études préalables et une bonne technicité pour le contrôle des niveaux d'eau.

Les aménagements les plus élaborés font intervenir des ouvrages de stockage, un système de répartition de l'eau par canaux d'irrigation et des ouvrages de protection contre les crues. Ces aménagements sont beaucoup plus coûteux ; ils nécessitent des études plus approfondies, une bonne technicité des agriculteurs et une bonne organisation sociale pour le contrôle des doses d'irrigation, l'entretien des ouvrages hydrauliques, la diversification et l'intensification des cultures (seule solution à la valorisation des équipements).

L'aide au développement permet la réalisation d'aménagements qui peuvent être rentabilisés à long terme sous certaines conditions, dont la première est une étude sérieuse prenant en compte non seulement les contraintes naturelles, sans les minimiser, mais aussi les contraintes humaines : contraintes financières d'exploitation et contraintes sociales. Bien peu d'aménagements tiennent compte de la nécessité, pour les paysans, de limiter leurs pertes en répartissant leurs parcelles en fonction des risques encourus ; bien peu d'aménagements sont conçus pour satisfaire les besoins des usagers. Ils sont le plus souvent conçus pour limiter les coûts de construction et tiennent rarement compte des contraintes d'exploitation.

#### **4. La caractérisation du fonctionnement hydrologique des bas-fonds**

Le Consortium Bas-Fonds se propose de caractériser les bas-fonds :

- à l'échelle sub-continentale (Afrique de l'Ouest et Afrique Centrale),
- à l'échelle nationale (un pays),
- à l'échelle régionale (un ensemble physique ou social homogène),
- à l'échelle locale (un bas-fond).

Nous allons tenter de faire la liste des paramètres à prendre en considération pour rendre compte du fonctionnement hydrologique des bas-fonds aux différentes échelles ainsi définies, en fournissant les principales sources d'information disponibles.

##### **4.1. Aux échelles continentale et nationale**

A ces échelles, les principales informations à collecter concernent la pluviométrie annuelle, les pluies maximales journalières, les ressources en eaux souterraines et superficielles. A l'échelle nationale, les principales sources d'information se situent au sein des directions nationales de la météorologie et des ressources hydrauliques.

National hydrologic evaluation reports of Sub-Saharan Africa for West Africa countries (Group III) also constitute important sources of information. This study was co-financed by the World Bank, the UNDP, the African Development Bank and the French Ministry of Cooperation. It was written by Mott MacDonald, BCEOM, SOGREAH and ORSTOM.

#### **4.1.1 Rainfall**

At the continental level, the main sources of information concerning the annual rainfall and rainfall intensities were listed in section 2. For annual rainfall, it is advised to take into consideration periods during which statistic measurements for means, medians, dry and wet decennial values were taken. Important differences may indeed occur depending on the reference periods.

#### **4.1.2. Underground resources**

Geological maps constitute an indispensable aid for analyzing water reserve status for groundwater tables. Regional studies for planning underground water resources and groundwater table refill are also likely to provide useful information at the continental level. We have found five bibliographical references useful at this level (CIEH-BRGM, 1969 and 1976; BRGM-GÉOHYDRAULIQUE-CIE, 1986 ; Foster, 1988 ; OACT, 1988).

#### **4.1.3. Surface resources**

At the continental level, the main bibliographical references concerning small watershed hydrology are the same as those listed in section 2. At the national level, samples on small experimental watersheds are very different from one country to the next and it is preferable to establish sets of watersheds by homogeneous climatic and geomorphological region.

Important progress can still be made in estimating flooding and water flows by taking into account the following physiographic and anthropic factors: vegetation cover and its evolution, human occupation rate and agricultural development in watersheds (Lamachère, 1994). These watershed factors evolve at season and at decennial scales.

#### **4.2. At the regional level**

At the scale of a province (1/200 000) or a part of a province (1/50 000), it is quite rare to find synthesis studies concerning rainfall, rainfall intensities, resources in surface and underground water resources. If they exist, these studies can be found at the national or regional meteorology and hydraulic services.

Les rapports nationaux d'évaluation hydrologique de l'Afrique Sub-Saharienne pour les pays d'Afrique de l'Ouest (Groupe III) constituent également des sources importantes d'informations. Cette étude a été cofinancée par la Banque Mondiale, le PNUD, la Banque Africaine de Développement et le Ministère Français de la Coopération. Elle a été réalisée par Mott MacDonald, le BCEOM, la SOGREA et l'ORSTOM.

#### 4.1.1. La pluviométrie

A l'échelle continentale, les principales sources d'information concernant la pluviométrie annuelle et les intensités pluviométriques ont été listées au paragraphe 2. Pour les pluviométries annuelles, il conviendra de prendre en considération les périodes sur lesquelles ont porté les calculs statistiques des valeurs moyenne, médiane, décennale sèche et décennale humide. Des différences importantes peuvent en effet apparaître en fonction des périodes de référence.

#### 4.1.2. Les ressources souterraines

Les cartes géologiques constituent un support indispensable à l'analyse des conditions de gisement des nappes aquifères. Les études régionales de planification des ressources en eaux souterraines et de recharge des nappes aquifères sont également susceptibles d'apporter des informations utilisables à l'échelle continentale. Nous avons relevé cinq références bibliographiques exploitables à cette échelle (CIEH-BRGM, 1969 et 1976, BRGM-GÉOHYDRAULIQUE-CIEH, 1986, Foster, 1988, OACT, 1988).

#### 4.1.3. Les ressources superficielles

A l'échelle continentale, les principales références bibliographiques concernant l'hydrologie des petits bassins versants sont les mêmes que celles listées au paragraphe 2. A l'échelle nationale, les échantillons de petits bassins expérimentaux sont très inégaux d'un pays à l'autre et il est préférable de constituer des lots de bassins par région climatique et géomorphologique homogène.

Des progrès sensibles peuvent être encore obtenus dans l'estimation des crues et des apports par la prise en compte des facteurs physiographiques et anthropiques suivants : couvert végétal et son évolution, taux d'occupation humaine et mise en culture des bassins versants (Lamachère, 1994). Ces facteurs évoluent sur les bassins versants à l'échelle de la saison des pluies et à l'échelle des décennies.

### 4.2. A l'échelle régionale

A l'échelle d'une province (1/200 000<sup>e</sup>) ou d'une partie de province (1/50 000<sup>e</sup>), il est assez rare de trouver des études de synthèse concernant la pluviométrie, les intensités pluviométriques, les ressources en eaux superficielles et souterraines. Si elles existent, ces études sont à rechercher auprès des directions nationales ou provinciales de la météorologie et de l'hydraulique.

#### **4.2.1. Rainfall**

At the regional scale with local daily rainfall series, hydrologic demand models for crops can be used to evaluate agricultural risks as a function of cultivated varieties and planting dates. Developing inter-annual isohyet maps does not seem necessary at this level and maps established at the national level may be sufficient by interpolating between isohyets. The calculation of mean rainfall at the watershed level used in the rainfall/run-off models can be performed by using Vuillaume's formula (1974).

#### **4.2.2. Underground resources**

First of all, it will be necessary to look for regional studies likely to provide general geological and hydrogeological information for the studied zone.

Complementary observations on underground water table depth at the end of the dry season and the end of the rainy season should be made. These observations would have to be coupled with rainfall data and would have to be associated with a survey at the end of the rainy season on the duration and the value of base flow of streams.

Chemical and bacteriological analyses may be conducted.

#### **4.2.3. Surface resources**

At the regional level, it appears first of all necessary to design a map of existing hydraulic management schemes and of the hydrographic network of the study zone. Physical characteristics of watersheds will be established from available topographic maps.

Information regarding observations made on water flows will be collected from the national or regional hydraulic services. Evaluation of annual water flows and decennial frequency flooding in watersheds will be performed by using benchmark watersheds chosen from a similar region taking into account the specific characteristics of each watershed. The FAO manual (1996) could be used for this purpose in dry tropical Africa, that is, for an annual rainfall less than 1 200 mm.

In humid tropical Africa, an equivalent study does not yet exist.

To enhance agricultural development in inland valleys, it is necessary to know where water flow remains longer after flooding to consider complementary hydrologic observations at the end of the rainy seasons by monitoring tours. These tours, spaced every 10 to 20 days, would permit detailing conditions under which water flow declines in inland valleys. The measurements could be coupled with piezometer data.

#### **4.2.1. La pluviométrie**

A l'échelle régionale, à partir de séries pluviométriques journalières locales, il peut être fait appel à des modèles de satisfaction hydrique des cultures pour évaluer les risques agricoles en fonction des variétés cultivées et des dates de semis. La confection de cartes d'isohyètes inter-annuelles ne paraît pas indispensable à cette échelle et l'on pourra se contenter des cartes établies à l'échelle nationale en interpolant entre les isohyètes. Le calcul des pluviométries moyennes à l'échelle des bassins versants, utilisées dans les modèles pluies-débits, pourra être fait en utilisant la formule de Vuillaume (1974).

#### **4.2.2. Les ressources souterraines**

En premier lieu, on recherchera les études régionales susceptibles d'apporter des informations géologiques et hydrogéologiques générales sur la zone étudiée.

Des observations complémentaires sur la profondeur des nappes aquifères en fin de saison sèche et en fin de saison des pluies pourront être effectuées. Ces observations devront être couplées avec les données pluviométriques et seront associées à des enquêtes, en fin de saison des pluies, sur la durée et la valeur de l'écoulement de base des marigots.

Des analyses chimiques et bactériologiques peuvent être réalisées.

#### **4.2.3. Les ressources superficielles**

A l'échelle régionale, il paraît tout d'abord indispensable d'établir une carte des aménagements hydrauliques existants et du réseau hydrographique de la zone étudiée. Les caractéristiques physiques des bassins versants seront établies à partir des cartes topographiques disponibles.

Les renseignements concernant les observations effectuées sur les cours d'eau seront collectés auprès des directions nationales ou provinciales de l'hydraulique. L'évaluation des écoulements annuels et des crues de fréquence décennale sur les bassins versants pourra être effectuée en utilisant des bassins de référence choisis dans une région identique en tenant compte des caractéristiques propres à chaque bassin versant. Le manuel FAO (1996) pourra être utilisé à cet effet en Afrique tropicale sèche, c'est à dire pour une pluviométrie annuelle inférieure à 1 200 mm.

En Afrique tropicale humide il n'existe pas encore d'étude équivalente.

Pour la valorisation agricole des bas-fonds, il est souhaitable, là où des écoulements sont observés longtemps après les crues, d'envisager des observations hydrologiques complémentaires en fin de saison des pluies en réalisant des tournées de jaugeage. Ces tournées, espacées tous les 10 à 20 jours, permettraient de préciser les conditions de tarissement des écoulements dans les bas-fonds. Elles pourraient être couplées avec des relevés piézométriques.

### **4.3. At a local scale**

For the local scale of an inland valley bottom or of a section of an inland valley bottom, hydrologic studies exist only if the valley bottom has already been the object of a water management intervention sufficiently important to justify a preliminary study, or if the watershed of this valley bottom is included in the sample of experimental watersheds already studied. The guide for hydrologic practices on rural small watersheds (Nouvelot, 1993) published by CIEH with funds from the Fund for Assistance and Cooperation (France) provides in its annexes 5 and 6 a bibliographical list of studies and an inventory of representative and experimental watersheds for 15 Francophone African countries. There is not yet to our knowledge a similar work for Anglophone African countries.

Be that as it may, it is extremely rare that previous observations correspond exactly to the inland valley bottom that is to be developed and could be directly applied. It is necessary, therefore, in most cases to perform an extrapolation of results. This extrapolation is possible only if the hydrologist is capable of analyzing the main factors determining run-off and water flow conditions in the watershed to be developed by comparing them to those of sites already observed (Rodier, 1982). We will provide here some general guidelines that would permit extrapolation and generation of complementary observations that could help to specify hydrologic dynamics of an inland valley at the local scale.

#### **4.3.1. Climatology**

One will focus on analyzing parameters having direct implications for the hydrologic balance: directions and speed of the wind, insolation, relative humidity, global radiation. These parameters are part of the calculation of the potential evapotranspiration according to Penman's formula. The evaporative requirement of crops has a direct relationship with potential evapotranspiration. An estimation of this evaporative requirement can also be obtained from evaporation measurements from a tank and coefficients chosen on the basis of the crop type and vegetation density.

#### **4.3.2. Rainfall**

At the local scale, it is useful to have long series of daily rainfall for evaluating drought and flooding risk. These series must be obtained therefore from long established rainfall stations closest to the study site. One of the first tasks is to verify the quality of the data by normalizing them in annual units over a common period. Statistical analysis is the second step. This permits determining the experimental distribution of annual rains and their recurrences. The accent will be placed on the following quantities: median, dry decennial and wet decennial, dry vicennial and wet decennial.

For a rapid diagnosis, regional and national maps of annual average rainfall and maximum daily rains of decennial frequency will be sufficient. For a more detailed study on rain-water flow relationships, it will be necessary to begin by installing a rain gauge network and some rainfall graphs within the watershed. Nouvelot's work (1993) provides guidelines on how to take precipitation measurements on the density of the network based on the watershed area (pp. 27-41).

### 4.3. A l'échelle locale

A l'échelle locale d'un bas-fond ou d'un de ses biefs, les études hydrologiques n'existent que si le bas-fond a déjà fait l'objet d'un aménagement assez important pour justifier une étude préalable, ou si son bassin versant est inclus dans l'échantillon des bassins versants expérimentaux déjà étudiés. Le guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux (Nouvelot, 1993), édité par le CIEH sur financement du Fonds d'aide et de coopération (France), fournit, en annexes 5 et 6, la liste des études et l'inventaire des bassins versants représentatifs expérimentaux de 15 pays d'Afrique francophone. Il n'y aurait, à notre connaissance, aucun ouvrage similaire pour l'Afrique anglophone.

En fait, il est extrêmement rare que les observations antérieures correspondent exactement au bas-fond à aménager et soient utilisables directement. Il faut donc, dans la plupart des cas, effectuer une transposition des résultats. Cette transposition n'est possible que si l'hydrologue est capable d'analyser les facteurs principaux relatifs aux conditions de ruissellement et d'écoulement des eaux sur le bassin versant à aménager en les comparant à celles de sites déjà observés (Rodier, 1982). Nous donnerons ici quelques indications générales permettant d'effectuer cette transposition et de réaliser les observations complémentaires susceptibles de préciser localement le fonctionnement hydrologique du bas-fond.

#### 4.3.1. la climatologie

On s'attachera à l'analyse des paramètres en relation directe avec le bilan hydrologique : températures, directions et vitesses du vent, insolation, humidité relative, radiation globale. Ces paramètres entrent dans le calcul de l'évapotranspiration potentielle par la formule de Penman.

La demande évaporative des cultures est en relation avec l'évapotranspiration potentielle. Une estimation de cette demande évaporative pourra également être obtenue à partir de mesures d'évaporation au bac et de coefficients cultureux choisis en fonction du type de culture et de sa densité de recouvrement.

#### 4.3.2. La pluviométrie

A l'échelle locale, il est utile, pour l'évaluation des risques de sécheresse ou d'inondation, de disposer de longues séries pluviométriques journalières. On recherchera donc ces séries auprès des stations pluviométriques de longue durée les plus proches du site étudié. Un premier travail consistera à vérifier la qualité des données en les homogénéisant, à l'échelle annuelle, sur une période commune. L'analyse statistique est la seconde étape. Elle permet de déterminer la distribution expérimentale des pluies annuelles et leurs récurrences. On mettra l'accent sur l'estimation des quantiles suivants : médiane, décennale sèche et décennale humide, vicennale sèche et vicennale humide.

Pour un diagnostic rapide, on se contentera des cartes régionales ou nationales des pluviométries annuelles moyennes et des pluies journalières maximales de fréquence décennale. Pour une étude détaillée des relations pluies-débits, il faudra procéder à l'installation d'un réseau de pluviomètres et de quelques pluviographes sur le bassin versant. L'ouvrage de Nouvelot (1993) fournit des indications sur les mesures des précipitations et sur la densité des réseaux en fonction des superficies des bassins versants (pp. 27-41).

For humid areas, where the Inland Valley Consortium is also operating, it seems appropriate to focus on rainfall episodes over several consecutive days. These can, in fact, generate in these areas important water flows due to land saturation which results from closely successive rains. In addition, knowing rainfall intensities is necessary for modelling water flows from a mapping of the watershed surface states (Casenave and Valentin, 1989; Lamachère and Puech, 1995).

#### 4.3.3. Underground resources

To establish a rapid diagnosis of the role of underground water tables in supplying water flow at the local level, a farmer survey to determine the date on which base flow in the stream stops may be sufficient. According to the annual rainfall and the underground water table refill, this date may vary from one year to another. We will try to indicate as precisely as possible these fluctuations and their corresponding years by linking them to annual rainfall.

A detailed study of underground resources and their influence on flows needs to associate piezometric observations on fluctuations in the ground water table level with flow measurements when the stream in the minor riverbed of the creek is low and rainfall measurements on an annual scale.

Piezometric observations must be made on the valley bottom and on the slopes on each side of the inland valley. They require most often the implantation of piezometers in lines placed perpendicularly to the valley bottom axis. Because these observations can only be made over multiple-year periods, they will have to be associated to rainfall observations to be useful for longer periods.

In the Sahelian zone, in the absence of base flow in the minor riverbed of the creek, piezometric monitoring permits identifying conditions related to access to underground resources as well as those related to refill and discharge of the groundwater tables. In fact, the refill of the groundwater table in Sahelian inland valley bottoms depends mainly on infiltration that occurs during flooding in the submerged part of the valley bottom.

#### 4.3.4. Surface resources

To do a rapid diagnosis, we will describe in general the watershed corresponding to the valley bottom to be developed by using available topographic maps, aerial photographs and satellite images. It may be necessary to make some field observations on the watershed itself. The objective of this description is to be able to compare the watershed to be developed to a type of watershed whose hydrologic characteristics are known. Transposing hydrologic data from a typical watershed to the unknown watershed is even more appropriate when physical and physiographical characteristics of the two watersheds are identical (Rodier, 1982).

A hydrologic detailed study will require the installation of a hydrologic station equipped with a limnigraph, a battery of limnimetric scales and, if possible, a footbridge or a cable way for taking measurements when water levels are high. Installation of the station will be done together with that of the rainfall network so that observations can be taken concurrently. Calibration requirements for the station means that a team of specialists in this type of calibration should be maintained in the field near the station.

Pour les régions humides, où le Consortium Bas-Fonds intervient aussi, il faut prendre en compte les épisodes pluvieux de plusieurs jours consécutifs. Ceux-ci peuvent en effet, dans ces régions, générer des écoulements importants dus à la saturation des sols qui résulte d'une succession d'averses rapprochées. En outre, la connaissance des intensités pluviométriques est nécessaire à la modélisation des ruissellements à partir d'une cartographie des états de surface des bassins-versants (Casenave et Valentin, 1989 ; Lamachère et Puech, 1995).

#### 4.3.3. Les ressources souterraines

Pour établir un diagnostic rapide du rôle des nappes dans l'alimentation des écoulements à l'échelle locale, on peut effectuer une enquête auprès des agriculteurs pour déterminer la date à laquelle s'arrêtent les écoulements de base du marigot. Selon la pluviosité de chaque année et la recharge des nappes, cette date risque de varier. On essaiera donc de préciser ces fluctuations et les années correspondantes en les rattachant à la pluviométrie annuelle.

Une étude détaillée des ressources souterraines et de leur influence sur les écoulements nécessite un couplage entre les observations piézométriques du niveau des nappes, les mesures de débit en basses eaux dans le marigot et les mesures pluviométriques à l'échelle annuelle.

Les observations piézométriques seront réalisées dans le bas-fond et sur les versants, de part et d'autre du bas-fond. Elles nécessitent le plus souvent l'implantation de piézomètres sur des lignes placées perpendiculairement à l'axe du bas-fond. Ces observations ne pouvant être réalisées que sur des périodes de quelques années, elles devront être rattachées à des observations pluviométriques pour être valorisées sur de plus longues périodes.

En zone sahélienne, en l'absence d'écoulement de base dans le lit mineur du marigot, le suivi piézométrique permet de préciser les conditions d'accès à la ressource souterraine, ainsi que les conditions de recharge et de décharge des nappes aquifères. En effet, la recharge des nappes aquifères des bas-fonds sahéliens dépend principalement des infiltrations qui se produisent pendant les crues dans la partie submergée du bas-fond.

#### 4.3.4. Les ressources superficielles

Pour établir un diagnostic rapide, on décrira sommairement le bassin versant correspondant au bas-fond à aménager en utilisant les cartes topographiques disponibles, les photographies aériennes ou les images satellitaires. Il pourra se révéler nécessaire de procéder à quelques observations de terrain sur le bassin versant lui-même. Le but de ces descriptions est de rattacher le bassin-versant à aménager à un bassin type dont les caractéristiques hydrologiques sont connus. La transposition des données hydrologiques, du bassin type au bassin sans observations, est d'autant meilleure que les caractéristiques physiques et physiographiques des deux bassins sont identiques (Rodier, 1982).

Une étude hydrologique détaillée nécessitera l'installation d'une station hydrologique équipée d'un limnigraphe, d'une batterie d'échelles limnimétriques et, le cas échéant, d'une passerelle de jaugeage ou d'un téléphérique pour les jaugeages de hautes eaux. L'installation de la station sera couplée avec celle d'un réseau pluviométrique afin que les observations soient effectuées de manière concomitante. L'étalonnage de la station implique le maintien sur place, près de la station, d'une équipe de jaugeurs, spécialisés dans ce type de mesures.

Nouvelot's work (1993) provides a practical set of guidelines on how to take these measurements (pp 42-90) and the data processing (pp 213-265). It provides also guidelines for implementing rainfall/run-off models(pp 230-240).

Current research in the area of modeling water flow is geared toward using new technologies (remote sensing, Geographical Information Systems - GIS, Field Numerical Models - FNM) in order to better take into account physical and physiographic characterization of watersheds (Lamachère and Puech, 1995).

## 5. Conclusion

Inland Valley agriculture is subject to many types of constraints: i) constraints associated with drought tied to climatic risk and irregularity of rains; ii) constraints associated with destruction due to prolonged flooding, washing away or lodging of crops. Understanding these constraints and evaluating risks associated with crop cultivation in inland valleys constitute two important objectives of a hydrologic program associated with the activities of the Inland Valley Consortium.

Evaluating the risks requires using long series of flow measurements that can only be generated by hydro-rainfall models using long series of rainfall measurements in a simulation phase and short series of hydro-rainfall measurements in the adjustment phase.

For this purpose, using spatial hydrologic models that integrate surface, subsurface, and underground hydraulic dynamics seems the most appropriate. Their fine-tuning on the experimental watersheds using remote sensing tools, GIS and FNM, and their extrapolation to unstudied watersheds constitute currently one of the principal hydrologic research objectives for small watersheds.

With the end of activities of the CIEH in 1994, West and Central Africa have lost an extremely valuable organization for collecting and analyzing rainfall, surface, and underground hydrologic data at the regional level. However, the CIEH has had little, if any, activity in the Anglophone zone : Gambia, Sierra Leone, Ghana, Liberia, Nigeria. Ghana and Nigeria, as members of the Inland Valley Consortium, could feed within the Consortium's activities, the hydrologic data base collected by the CIEH on small watersheds in West and Central Africa. They could also benefit from hydrologic data collected in neighboring countries.

For this, it appears important that the Consortium integrates hydrology in its research activities at the regional level.

L'ouvrage de Nouvelot (1993) fournit un ensemble de conseils pratiques pour la réalisation de ces mesures (pp 42-90) et le traitement des données (pp 213-265). Il fournit également des indications pour la mise en oeuvre de modèles de transformation des pluies en débits (pp 230-240).

Les recherches actuelles en matière de modélisation des écoulements s'orientent vers l'utilisation de nouvelles technologies (télé-détection, Systèmes d'Information Géographique - SIG -, Modèle Numérique de Terrain - MNT -) afin de mieux prendre en compte les caractérisations physique et physiographique des bassins versants (Lamachère et Puech, 1995).

## 5. Conclusion

L'agriculture de bas-fond est soumise à plusieurs types de contraintes hydrologiques : des contraintes de sécheresse liées aux aléas climatiques et à l'irrégularité des pluies, des contraintes de destruction par inondation prolongée, arrachage ou verse des cultures. Connaître ces contraintes, en évaluer les risques pour les cultures de bas-fond, constituent les objectifs essentiels d'un programme hydrologique associé aux activités du Consortium bas-fonds .

L'évaluation de ces risques nécessite l'utilisation de longues séries de débits qui ne peuvent être générées que par des modèles hydro-pluviométriques utilisant de longues séries pluviométriques en phase de simulation et de courtes séries hydro-pluviométriques dans la phase de calage.

A cet effet, l'utilisation de modèles hydrologiques spatialisés intégrant les fonctionnements hydriques de surface, de subsurface et du sous-sol paraissent les plus appropriés. Leur mise au point sur les bassins versants expérimentaux à partir des outils de télé-détection, des SIG et des MNT et leur transposition à des bassins versants non observés constituent actuellement un des objectifs principaux de la recherche hydrologique sur les petits bassins versants.

Avec l'arrêt en 1994 des activités du CIEH, l'Afrique de l'Ouest et l'Afrique Centrale perdent un organisme extrêmement précieux de collecte et d'analyse, à l'échelle régionale, des données hydrologiques pluviométriques, superficielles et souterraines. Cependant, le CIEH n'a pratiquement pas exercé ses activités dans la zone anglophone : Gambie, Ghana, Liberia, Nigéria, Sierra Leone. Le Ghana, le Nigéria et la Sierra Leone étant membres du Consortium Bas-Fonds, ces pays pourraient alimenter, dans le cadre des activités du Consortium, la banque de données hydrologiques collectée par le CIEH sur les petits bassins versants en Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale. Ils pourraient également bénéficier des données hydrologiques collectées dans les pays voisins.

Pour ce faire, il nous paraît souhaitable que le Consortium Bas-Fonds intègre l'hydrologie dans ses activités de recherche à l'échelle régionale.

**Bibliographical references classified by themes**  
**Références bibliographiques classées par thèmes.**

**Characterization of Inland Valleys / Caractérisation des bas-fonds**

- ALBERGEL J., LAMACHÈRE J.M., LIDON B., MOKADEM A., VAN DRIEL W., 1993. Mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel. Typologie, fonctionnement hydrologique, potentialités agricoles. Rapport final d'un projet CORAF/R3S. CIEH, Ouagadougou / CIRAD, Montpellier, 335 p.
- KILLIAN J., TEISSIER J., 1973. Méthode d'investigation pour l'analyse et le classement des bas-fonds dans quelques régions de l'Afrique de l'Ouest. Proposition de classification d'aptitude des terres à la riziculture. *Agro. Trop.* pp. 156-172.
- RAUNET M., 1985. Bas-Fonds et riziculture en Afrique. Approche structurale comparative. *Agro. Trop.* 40-3, pp. 181-200.
- RAUNET M., 1993. Bas-Fonds et riziculture. Actes du séminaire d'Antananarivo, Madagascar, 9-14 décembre 1991. CIRAD, Montpellier, 517 p.
- ZEPPENFELDT T., VLAAR J.C., 1990. Mise en valeur des bas-fonds en Afrique de l'Ouest : synthèse préliminaire de l'état des connaissances. CIEH-UAW, CIEH, Ouagadougou.

**Climatology, Rainfall / Climatologie, Pluviométrie**

- ALBERGEL J., 1986. Evolution de la pluviométrie en Afrique soudano-sahélienne. Exemple du Burkina Faso. Colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse. CIEH, Ouagadougou, 17 p.
- AGRHYMET, 1990. Cartes ETP Penman mensuelle en Afrique de l'Ouest, période 1951-1986. Niamey.
- AGRHYMET, 1992. Atlas agroclimatologique des pays du CILSS. Programme Agrhymet, Coopération française, PNUD, OMM. 11 volumes, Niamey.
- BRUNET-MORET Y., 1968. Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale : Bénin, Burkina Faso (ex Haute Volta), Nord Cameroun, Côte d'Ivoire, Mali, Mauritanie, Niger, Sénégal, Tchad, Togo. 1 fascicule de 20 à 25 p. par pays. ORSTOM, Montpellier.
- CIEH, 1980-85. Etude de synthèse des pluies journalières de fréquence rare. Ouagadougou, Burkina Faso.
- |  |   |
|--|---|
| a - Aspects théoriques, LAHAYE J.P., 1980  | b - Haute Volta, LAHAYE J.P., 1980            |
| c - Cameroun, COMET-BARTHE, 1980           | d - Gabon, COMET-BARTHE et DJITIK, 1980       |
| e - Niger, CADOT et PUECH, 1982            | f - Benin, Togo, PUECH et WOME, 1982          |
| g - Congo, DEGOULET, 1984                  | h - Mali, Mauritanie, Sénégal, DEGOULET, 1984 |
| i - Tchad, Centrafrique, CHABI-GONNI, 1984 | j - Rap. de synthèse, CHABI-GONNI, 1985       |
- DACOSTA H., 1989. Précipitations et écoulement sur le bassin de la Casamance. Thèse de l'Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal.
- HULME M. (1992). Rainfall changes in Africa (1931-60 to 1961-90). *Int. J. Climatol.* 12 : 685-700.
- LEROUX M., 1983. Le climat de l'Afrique Tropicale. Editions Champion, Paris, 633 p.
- MAHE G., 1993. Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité inter-annuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Collection Etudes et Thèses, ORSTOM, Paris, 439 p.
- NICHOLLS S.E. (1989). Long-term changes in African rainfall. *Weather* 44 : 46-56.
- OWEN J.A. & WARD M.N. (1989). Forecasting Sahel rainfall. *Weather* 44 : 57-64.
- RIEHL H. (1979) - Climate and weather in the tropics. *Academic Press.*

VUILLAUME G., 1974. L'abattement des précipitations journalières en Afrique intertropicale. Variabilité et précision de calcul. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., Vol. XI n°3, pp. 205-240.

#### **Hydrogeology / Hydrogéologie**

CIEH-BRGM, 1969. Etude géochimique des eaux souterraines de l'Afrique de l'Ouest.

BRGM-CIEH, 1976. Carte de planification des ressources en eau souterraine des états membres du CIEH.

BRGM-GÉOHYDRAULIQUE-CIEH, 1986. Notice d'explication et d'utilisation de la carte des potentialités des ressources en eau souterraine de l'Afrique Occidentale et Centrale au 1/5 000 000 ème.

FOSTER S.S.D., 1988. Quantification of groundwater recharge in arid regions. In : Estimation of natural groundwater recharge, NATO-ASI-Series C, vol. 22, D. Reidel Publ. Co.; 323-338.

OACT, 1988. Carte hydrogéologique internationale de l'Afrique. Programme de Cartographie Hydrogéologique de l'Afrique (PCHIA).

#### **Hydrology / Hydrologie**

CASENAVE A., GUIGEN N., SIMON J.M., 1984 - Etude des crues décennales des petits bassins forestiers en Afrique tropicale. Cah. ORSTOM, Sér. hydrol., Vol. XIX n°4, Paris pp. 229-252.

CASENAVE A., VALENTIN C., 1989 - Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Ed. de l'ORSTOM, Coll. Didactiques, 227 p.

DUBREUILP., 1972. Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux, 1951-1969, ORSTOM, Paris, 229 p.

FAO, 1996. Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugés d'Afrique sahélienne et tropicale sèche. CIEH-ORSTOM-CEMAGREF-FAO. Rome, bull. FAO d'irrigation et de drainage

LAMACHÈRE J.M., 1994. Variabilité spatio-temporelle des états de surface en zones sahélienne et soudanienne (Burkina Faso) : effets sur le ruissellement et sa modélisation. Communication aux journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, 13-14 septembre 1994, 11 p.

LAMACHÈRE J.M., PUECH C., 1995. Cartographie des états de surface par télédétection et prédétermination des crues des petits bassins versants en zones sahélienne et tropicale sèche. Comm. à la conférence à la mémoire de Jean Rodier, Paris, 3-4 mai 1995. ORSTOM, Montpellier, 11 p.

NOUVELOT J.M., 1993. Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique tropicale et équatoriale. CIEH-ORSTOM. 539 p.

PUECH C., CHABI-GONNI D., 1984. Méthode de calcul des débits de crue décennale pour les petits et moyens bassins versants en Afrique de l'Ouest et Centrale. CIEH, Ouagadougou, 91 p.

RODIER J., AUVRAY, 1965. Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km en Afrique Occidentale. CIEH-ORSTOM, Paris 46 p.

RODIER J., 1975. Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain; travaux et Documents de l'ORSTOM n°46, 121 p.

RODIER J., 1976. Evaluation de l'écoulement annuel dans les régions tropicales sèches d'Afrique Occidentale. Cah. ORSTOM, sér. hydrol., Vol. XVI n° 4, pp. 269-306.

RODIER J., 1976. Estimation des débits de crues décennales pour les petits bassins versants forestiers en Afrique tropicale. Cah. ORSTOM, Sér. hydrol., Vol. XIII n°4, Paris pp.243-267.

RODIER J., 1982. La transposition des résultats des bassins représentatifs et ses problèmes. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., Vol. XIX n° 2, Paris pp. 115-127.

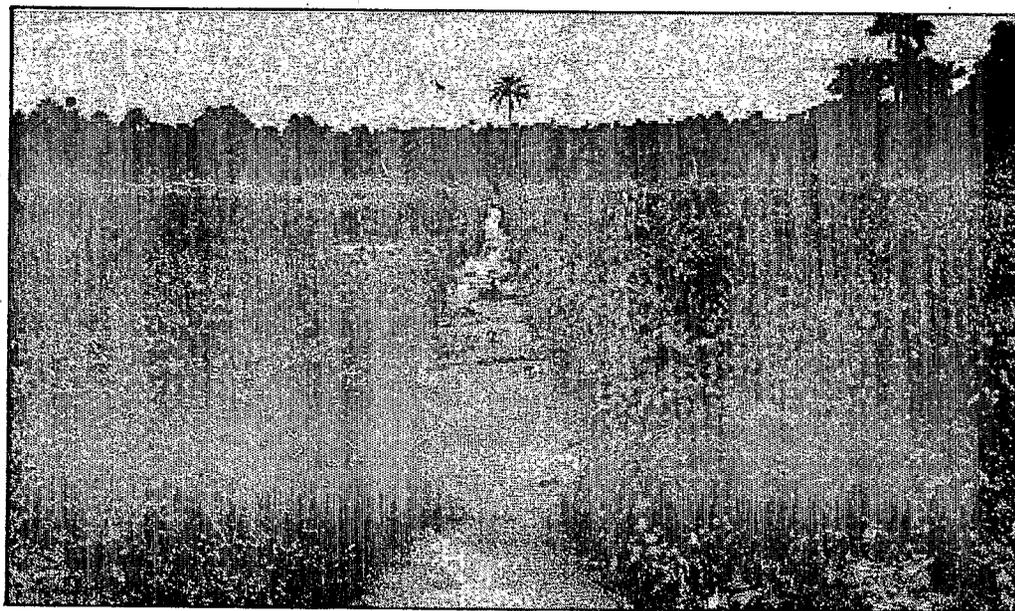
INLAND VALLEY  
CONSORTIUM



CONSORTIUM  
BAS-FONDS

Sustainable Use of Inland Valleys in Africa.  
First results of the Inland Valley Consortium

Mise en valeur durable des bas-fonds en Afrique.  
Premiers résultats du Consortium Bas-Fonds



Proceedings of the 3rd Annual Workshop of the Inland Valley Consortium  
WARDA, Bouaké, Côte d'Ivoire, March 23-24, 1995

Actes du 3ème atelier annuel du Consortium bas-fonds  
ADRAO, Bouaké, Côte d'Ivoire, 23-24 mars 1995



**Sustainable Use of Inland Valleys  
in West Africa.  
First results of the Inland Valley Consortium**

**La mise en valeur durable des bas-fonds  
d'Afrique de l'Ouest.  
Premiers résultats du Consortium Bas-Fonds**

**Proceedings of the 3rd Annual Workshop of the Inland Valley Consortium  
WARDA, Bouaké, Côte d'Ivoire, March 23-24, 1995**

**Actes du 3ème atelier annuel du Consortium bas-fonds  
ADRAO, Bouaké, Côte d'Ivoire, 23-24 mars 1995**

**Scientific Editors / Editeurs scientifiques :  
J.Y. Jamin, P.N. Windmeijer**

**INLAND VALLEY CONSORTIUM / CONSORTIUM BAS-FONDS  
c/o WARDA/ADRAO  
01 BP 2551, Bouaké 01, Côte d'Ivoire  
e-mail: [ivc@cgnet.com](mailto:ivc@cgnet.com)**

11

11



Cover photograph: an inland valley in Sierra Leone (humid forest zone)

Photo de couverture : bas-fond en Sierra Leone (zone forestière)

(photo J.Y. Jarr)

ISBN 92 9113 1318

Published and distributed by the Inland Valley Consortium

Publié et diffusé par le Consortium Bas-Fonds

c/o WARDÁ/ADRAO

01 BP 2551, Bouaké 01, Côte d'Ivoire

e-mail: [ivc@cgnet.com](mailto:ivc@cgnet.com)





n)

### Notice

*These proceedings are an account of the third annual workshop of the Inland Valley Consortium, held at WARDA headquarters in Bouaké (Côte d'Ivoire) in March 1995. The participants were scientists from various National and International Agricultural Research Institutes working in inland valleys in the seven West-Africa member countries of the Consortium (Benin, Burkina-Faso, Côte d'Ivoire, Ghana, Mali, Nigeria, Sierra Leone).*

*The working languages of the workshop were English and French. In this document, all activities concerning the whole group as well as the outcome of common discussions are given in both English and French. The reader will find the English text on the left-hand side and the French on the right. The presentations given by the participants are presented in the original language; a summary in English and French precedes the text.*

### Avertissement

*Ces actes rendent compte du troisième atelier annuel du Consortium bas-fonds, qui s'est tenu au siège de l'ADRAO à Bouaké (Côte d'Ivoire) en mars 1995. Les participants étaient des chercheurs des divers instituts nationaux et internationaux de recherche agricole qui travaillent dans les bas-fonds, dans les sept pays ouest-africains membres du Consortium (Bénin, Burkina-Faso, Côte d'Ivoire, Ghana, Mali, Nigéria, Sierra Leone).*

*Les travaux de l'atelier ont été conduits en anglais et en français. Dans ce document, toutes les parties concernant l'ensemble des participants, ou résultant des discussions communes, sont présentées à la fois en anglais (page de gauche) et en français (page de droite). Les communications faites par les participants sont présentées dans leur langue d'origine ; des résumés en français et en anglais sont fournis à chaque fois en début de texte.*



## Contents

## Sommaire

Introduction (E/F) <sup>1</sup> .....	4
Discussion synthesis (E/F) .....	8
Synthèse des débats (E/F) .....	9
GHANA <i>OTOO E., ASUBONTENG K.O.</i> (E/F-sm)	
Multidisciplinary Approach to Reconnaissance Characterization of Inland Valleys in Southern Ghana <i>Une approche pluri-disciplinaire pour la caractérisation de reconnaissance des bas-     fonds au Sud-Ghana</i> .....	25
BÉNIN <i>MAMA V.J.</i> (F/E-sm)	
Caractérisation des bas-fonds du département du Zou <i>Characterization of Inland Valleys in the Zou department</i> .....	41
WAGENINGEN <i>ANDRIESSE W., WINDMEIJER P.N., VAN DUIVENBOODEN N.</i> (E/F-sm)	
Classifying Inland Valley Agro-Ecosystems: a Modular Approach <i>Une approche modulaire pour la classification des bas-fonds</i> .....	47
BURKINA FASO <i>THIOMBIANO L., KABORÉ O., PODA N.</i> (F/E-sm)	
Caractérisation par une approche pluridisciplinaire d'un agro-écosystème de bas-fond : Cas de Thion <i>A Multidisciplinary Approach for Inland Valley     Agro-ecosystems Characterization: a case study in Thion</i> .....	63

<sup>1</sup> (E/F) in English and French (*en Anglais et en Français*)

(E/F-sm) in English with a summary in French (*en Anglais avec un résumé en Français*)

(F/E-sm) in French, with a summary in English (*en Français avec un résumé en Anglais*)

CIRAD

La mise  
un enje  
à la ma  
Inland  
an impi  
and ma

ORSTOM/C

Hydro  
L'Hydr

NIGERIA

Some F  
Inland  
Quelqu  
Conso

Annexes ...

Ann. 1 Lis

Ann. 2 Me  
Me

Ann. 3 Ac



CIRAD                      *LEGOUPI L. J. C., LIDON B.*                      (F/E-sm)

La mise en valeur des bas-fonds en Afrique Sub-Saharienne :  
un enjeu important lié à la connaissance et  
à la maîtrise de leurs régimes hydriques  
*Inland Valleys development in Sub-Saharan Africa:  
an important challenge related to knowledge  
and management of their water regimes* ..... 71

ORSTOM/CORAF                      <sup>2000</sup> *LAMACHÈRE J. M., DACOSTA H.*                      (E/F)

Hydrology in Inland Valleys of West and Central Africa  
L'Hydrologie des Bas-Fonds d'Afrique de l'Ouest et d'Afrique Centrale ..... 83

NIGERIA                      *AJAYI E. O.*                      (E/F-sm)

Some Results of the First National Workshop of the  
Inland Valley Consortium in Nigeria  
*Quelques résultats du premier atelier national du  
Consortium bas-fonds au Nigéria* ..... 107

Annexes ..... 111

Ann. 1 List of Participants / Liste des participants ..... 113

Ann. 2 Members of the Inland Valley Consortium  
Membres du Consortium Bas-Fonds ..... 114

Ann. 3 Acronyms / Sigles et abréviations ..... 117

