



ORSTOM – DEC
UR 2

ICCARE

**Identification et Conséquences d'une variabilité du Climat
en AfRIque de l'ouest non sahElienne**

Présentation du Programme

Eric SERVAT

ANTENNE HYDROLOGIQUE
ORSTOM-COTE D'IVOIRE

Février 1994

SOMMAIRE

LIMINAIRE	2
PHASE PREALABLE.....	4
PRECIPITATIONS.....	5
ECOULEMENTS.....	10
FACTEURS DE L'ECOULEMENT	14
CARTOGRAPHIE INFORMATISEE	16
HEP - Base.....	17
COLLABORATIONS	19
REALISATION.....	20
REFERENCES	22

ICCARE

LIMINAIRE

La sécheresse observée depuis une vingtaine d'années dans l'Ouest Africain a des conséquences souvent tragiques dans les pays sahéliens, ce qui explique et justifie l'intérêt constant porté à ces régions. Cependant, plus au sud, il semblerait que la sécheresse se fasse également ressentir (Sutcliffe et Knott, 1987; Nicholson et *al*, 1988; Mahé et Olivry, 1991; Olivry et *al*, 1993). C'est un sentiment unanimement partagé dans les pays situés en bordure du Golfe de Guinée. Si les conséquences de cette sécheresse sont moins sévères dans ces régions plus équatoriales, la baisse de la pluviométrie et la diminution des apports en eau de surface, tout comme le décalage dans le temps des saisons des pluies, sont de nature à pénaliser les projets de développement liés en particulier à l'agriculture, et à nuire au bon fonctionnement des aménagements réalisés à partir de données enregistrées lors de périodes beaucoup plus favorables. A titre d'exemple, une étude récente, menée dans le cadre du programme ERREAU (Servat et Sakho, 1993), a mis en évidence une importante instabilité de la ressource en eau dans le bassin du Sassandra (Ouest et sud-ouest de la Côte d'Ivoire) particulièrement sensible depuis le début des années 1970. Les conséquences de ce phénomène se sont révélées très inquiétantes en ce qui concerne le bon fonctionnement et la rentabilité des projets et des ouvrages réalisés.

Le programme ICCARE (Identification et Conséquences d'une variabilité du Climat en Afrique de l'ouest non sahélienne), qui s'inscrit dans la thématique "Régionalisation Hydrologique" du projet FRIEND AOC, a donc pour objet l'identification, dans toute la sous-région "Afrique de l'Ouest non sahélienne" (c'est à dire essentiellement les pays situés en bordure du Golfe de Guinée), d'une éventuelle fluctuation climatique. Celle-ci pourrait se traduire par des ruptures dans les séries chronologiques pluviométriques et hydrométriques, qui, si elles concordent avec ce que l'on observe en zone sahélienne, devraient se produire vers la fin des années 1960 (Hubert et Carbonnel, 1987; Sircoulon, 1987; Hubert et *al*, 1989; Demarrée, 1990). Les manifestations les plus sensibles de ces ruptures (diminution des précipitations et des écoulements, décalages dans le temps et rééquilibrages entre saisons des pluies, etc.) seront étudiées ainsi que les modifications apportées par la sécheresse aux facteurs de l'écoulement des eaux de surface, c'est à dire les modifications de réponse des bassins versants aux facteurs atmosphériques du cycle de l'eau.

Ce programme sera mené par l'Antenne Hydrologique de l'ORSTOM en Côte d'Ivoire, dans le cadre de l'UR 2 du DEC, en collaboration avec le Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM à Montpellier; le Laboratoire d'Hydrologie et de Modélisation de l'Université Montpellier II et le Département Mathématiques-Informatique de l'Université du Québec à Trois Rivières. En Côte d'Ivoire, ce projet sera mené avec l'aide et la participation du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique, de la Direction de l'Eau et de l'Agence Nationale pour l'Aviation Civile et la Météorologie.

Dans la mesure des données qu'il sera possible de réunir, les pays concernés par ce programme seront donc: le Sénégal (zone Sud), le Mali (zone Sud), le Burkina Faso (zone Sud), la Guinée, la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Togo, le Bénin. On s'efforcera de rassembler une information la plus complète possible de l'origine des postes de mesure jusqu'à la fin des années 1980.

Afin de donner à ce programme une dimension qui ne soit pas uniquement celle de l'Afrique de l'ouest, nous proposons d'étendre notre démarche aux états d'Afrique centrale qui se trouvent dans la même "bande" de latitude. Une extension du projet pourrait donc être faite en direction du Cameroun, de la Centrafrique et du Sud Tchad.

Le document qui suit n'a pas la prétention d'être exhaustif tant en ce qui concerne les objectifs que les méthodes. Il serait totalement illusoire, dans le cadre d'un domaine de recherche aussi vaste, d'espérer figer une fois pour toutes un cadre d'étude. Il est évident que certains objectifs seront recadrés ou redéfinis en cours de programme, et que certaines méthodes, voire certaines analyses, qui n'ont pas été évoquées ici viendront s'ajouter à ce qui a été défini. L'analyse bibliographique approfondie qu'il conviendra de mener en début de programme apportera, dans ce domaine, des éléments importants. Il a cependant semblé nécessaire de définir une orientation générale qui précise la nature des problèmes que nous souhaiterions aborder dans le cadre d'ICCARE. C'est l'ambition de ce document qui est le fruit des réflexions de plusieurs des intervenants potentiels du programme.

Ce document est constitué de plusieurs parties. Chacune d'elles traite d'un thème ou d'une application particulière:

- Phase préalable
- Précipitations
- Ecoulements
- Facteurs de l'écoulement
- Cartographie et valorisation des résultats
- HEP-Base

A l'issue de cette présentation du contenu du projet, nous proposons un calendrier pour sa réalisation, et nous récapitulons les collaborations prévues.

ICCARE

PHASE PREALABLE

Dans le cadre de cette première phase du programme ICCARE, préalable incontournable à la réalisation du projet, plusieurs opérations doivent être réalisées:

- Collecte la plus complète possible des données pour l'ensemble de la zone étudiée. Cette collecte couvrira la période comprise entre l'origine des postes de mesure et la fin des années 1980.
- Intégration et mise en forme des données sous PLUVIOM et HYDROM.
- Inventaire exhaustif des données pluviométriques mensuelles (si possible par décades).
- Inventaire exhaustif des données hydrométriques mensuelles (débits moyens pour différents pas de temps).
- Développement de HEP-Base (Cf., au sein de ce document, la partie relative à cette Base de données) et intégration des données pluviométriques, hydrométriques et d'évapotranspiration dans cette base.
- Production des statistiques de base pour chaque poste et chaque station :
 - * **Pluviométrie:**
 - tracés des histogrammes des pluies annuelles et des nombres de jours de pluie annuels.
 - statistiques de base pour ces différents éléments.
 - * **Hydrométrie:**
 - tracés des histogrammes des modules annuels.
 - statistiques de base pour ce type de données.
- Acquisition des fonds de carte des différents pays de la zone concernée. Importation en vue d'une utilisation sous Map-Info, logiciel de cartographie, fonctionnant sur PC et sous environnement Windows, retenu pour le projet. Etude approfondie des capacités de cet outil, qui offre également les possibilités d'un S.I.G.
- Tracés de quelques séries d'isohyètes permettant de représenter les modifications constatées.

Cette phase préalable donnera lieu à la rédaction d'un rapport présentant la zone d'étude, les données réunies et les résultats des premiers traitements élémentaires.

ICCARE

PRECIPITATIONS

Concernant les précipitations, on cherchera à vérifier les points suivants:

1) Constate-t-on véritablement une diminution des précipitations depuis la fin des années 1960 et le début des années 1970 ? Peut-on démontrer une réelle modification des isohyètes ? Cette modification est-elle uniforme dans l'espace ?

Afin de vérifier la réalité de ces assertions, on procédera de la façon suivante:

- Sur l'ensemble des postes pluviométriques de la zone étudiée, on commencera par identifier les 4 périodes suivantes :
1950 – 1959 / 1960 – 1969 / 1970 – 1979 / 1980 – 1989.
- On étudiera, pour chaque poste pluviométrique, la variabilité de la moyenne interannuelle des hauteurs précipitées sur chaque décennie. L'utilisation d'une variable de type "indice de pluviosité", exprimée par Nicholson et al (1988) sous la forme $(x_i - x_m)/s$, peut permettre une caractérisation et une cartographie de cette variabilité.
- Chacune de ces périodes sera caractérisée plus précisément par comparaison et analyse à partir de séries longues. Il conviendra donc d'identifier avec soin les stations de référence.
- Pour chacune des périodes on tracera les isohyètes moyennes interannuelles :
 - pays par pays,
 - par groupe de pays,
 - pour la zone.
- On analysera, à partir de ces tracés, l'éventuelle variabilité spatiale, depuis 1950, des isohyètes moyennes interannuelles.
- Si l'ensemble de ces tests se révèle positif, c'est à dire si l'on peut mettre en évidence un changement dans les séries, on cherchera à caractériser la "date" de la rupture par des méthodes non paramétriques et bayésiennes. Un important et préalable travail bibliographique puis méthodologique sera donc nécessaire pour déterminer les méthodes qui pourront être utilisées dans un tel cas.

2) La saison des pluies est-elle décalée dans le temps: début de la saison des pluies plus tardif dans l'année et précipitations qui se prolongent plus tard ?

Cette partie sera réalisée à partir des données pluviométriques décennales.

Le problème essentiel consiste en la définition de la saison des pluies à partir des données observées. Une étude bibliographique et méthodologique sera effectuée pour déterminer la méthodologie la mieux adaptée à la définition des dates clés que sont le début et la fin de la saison des pluies.

Une méthode simple pourrait être d'admettre:

- pour le début de la saison des pluies: la première décennie présentant plus de X1 mm de pluie, suivie de deux décennies totalisant au moins Y1 mm. Ce pourrait être ainsi une manière de décrire les deux conditions nécessaires à l'établissement du régime de saison des pluies qui sont: démarrage et continuité des précipitations.
- pour la fin de la saison des pluies: la dernière décennie présentant plus de X2 mm de pluie précédée de deux décennies totalisant au moins Y2 mm.

D'autres méthodes doivent certainement pouvoir être envisagées, notamment en relation avec l'ETP. L'étude bibliographique et méthodologique devra permettre de les cerner.

Il conviendra cependant d'adapter la ou les méthodes retenues aux différentes zones climatiques qui présentent selon les cas une ou deux saisons des pluies. Dans le cas de la méthode exposée ci-dessus, les valeurs de X1, Y1, X2 et Y2 varieront du Nord au Sud, et, pour cette dernière zone, en fonction de la saison des pluies considérée.

Une fois la méthodologie définie, on pourra étudier par poste et par décennie, la date "moyenne" du début et de la fin de la saison des pluies, ainsi que la durée moyenne de cette saison.

Les représentations graphiques et cartographiques de l'évolution du phénomène permettront une analyse des résultats dans un contexte régional.

L'utilisation des séries longues des stations de référence préalablement sélectionnées permettra, ensuite, d'étudier année par année, et de manière plus précise, les fluctuations éventuelles des variables date début, date fin et durée. Dans l'hypothèse d'une rupture dans les séries, on cherchera à caractériser cette rupture et on s'intéressera à sa concordance avec les résultats précédents.

3) Existe-t-il une modification de la répartition des quantités précipitées dans l'année: rééquilibrage de la petite saison des pluies aux dépens de la grande en zone à 2 saisons des pluies, répartition plus homogène sur plusieurs mois en zone à saison des pluies unique, recul vers le Sud depuis le début des années 1970 de la "limite" séparant les zones à une et à deux saisons des pluies ?

La réalisation, par poste et par décennie, d'un profil pluviométrique moyen permettra de préciser les contours des zones à une et deux saisons des pluies, et de caractériser les fluctuations de ces limites dans le temps. Ce profil pluviométrique moyen sera défini empiriquement. On proposera une représentation graphique du phénomène.

L'étude des modifications des quantités précipitées dans l'année sera ensuite abordée par zone climatique, et à partir des données décennales :

ZONE A DEUX SAISONS DES PLUIES.

- Etude par décennie depuis 1950, et par poste, de la proportion moyenne interannuelle de la quantité des précipitations de la "petite" saison des pluies (la seconde) par rapport à la "grande" (la première).
- Etude sur les séries longues des stations de référence de la proportion annuelle de la quantité des précipitations de la "petite" saison des pluies par rapport à la "grande".
On proposera une représentation graphique des phénomènes (par exemple des tracés de lignes d'isovaleurs).
Dans l'hypothèse d'une rupture, on cherchera à caractériser cette rupture, et on s'intéressera à sa concordance avec les résultats précédents.

ZONE A UNE SAISON DES PLUIES.

- Etude par décennie depuis 1950, et par poste, du rapport moyen interannuel du maximum de pluie identifié sur 3 décades pluvieuses consécutives au total précipité sur les 9 décades définies autour du maximum (3 avant, les 3 du maximum, 3 après).
Cette étude sera envisagée dans les deux cas suivants:
 - les 3 décades de référence sont fixées a priori à la suite d'une étude statistique permettant de les situer avec une probabilité maximale.
 - les 3 décades de référence varient d'une année sur l'autre et correspondent effectivement au maximum annuel.
- Etude du rapport précédent sur les séries longues des stations de référence.
On proposera une représentation graphique des phénomènes (par exemple des tracés de lignes d'isovaleurs).
Dans l'hypothèse d'une rupture, on cherchera à caractériser cette rupture, et on s'intéressera à sa concordance avec les résultats précédents.

4) Caractérisation des pluies des périodes "hors saison des pluies": fréquences, hauteurs précipitées, répartition dans le temps. Ces caractéristiques ont-elles subi une modification depuis le début des années 1970 ?

Le terme "hors saison des pluies" est directement lié à la définition de la saison des pluies telle qu'elle aura été précisée au point (2). Ce qui sous-entend qu'en zone à deux saisons des pluies, il conviendra de s'intéresser aux précipitations des deux saisons sèches.

On s'intéressera alors aux variables suivantes, dont on suivra l'évolution:

- nombre de décades pluvieuses et nombre de jours pluvieux.
- total précipité.
- centre de gravité des décades pluvieuses. Le centre de gravité sera calculé ainsi :

$$C.G. = \frac{\sum H_i * t_i}{\sum H_i}$$

avec

i : indice de la décade (i= 1 pour la première décade après la fin de la saison des pluies).

t : temps, en décades, écoulé depuis la fin de la saison des pluies.

H : hauteur précipitée durant la décade i.

- distance du centre de gravité au début de la saison des pluies suivante.
- distance du centre de gravité à la fin de la saison des pluies précédente.

Les valeurs moyennes interannuelles des variables ci-dessus seront traitées par décennie.

On étudiera également, année par année, et sur les séries longues des stations de référence, les fluctuations de ces variables. On proposera une représentation graphique des phénomènes. Dans l'hypothèse d'une rupture, on cherchera à caractériser cette rupture, et on s'intéressera à sa concordance avec les résultats précédents.

5) Constate-t-on une diminution effective des événements importants ?

On s'intéressera à cette question que la rupture dans les séries pluviométriques ait été mise en évidence ou pas au point (1). On peut, en effet, envisager l'existence d'une diminution effective des événements importants sans rupture formellement identifiée.

Cette étude sera menée séparément sur chacune des deux zones pluviométriques (une et deux saisons des pluies).

Les hauteurs de pluie journalières moyennes interannuelles correspondant à un nombre moyen annuel de dépassements de 1, 2, 3, 4, et 5 seront déterminées pour chaque décennie. Leurs variations seront analysées et interprétées.

Une analyse similaire mais plus détaillée sera réalisée pour les séries longues des stations de référence.

On proposera une représentation graphique des phénomènes. Dans l'hypothèse d'une rupture, on cherchera à caractériser cette rupture, et on s'intéressera à sa concordance avec les résultats précédents.

6) Observe-t-on une diminution du nombre de jours de pluie : par an, par mois ?

La marche à suivre sera la même que pour le point (5), à la différence près que l'on s'intéressera ici au nombre de jours de pluie par an, d'une part, et pour chacun des mois de l'année, d'autre part.

7) Cartographie et analyse régionale

Pour l'ensemble des variables étudiées précédemment on procédera, si cela n'a pas déjà été fait, à une représentation graphique et cartographique la plus complète possible.

Cette représentation devra avoir une dimension locale (pays par pays) mais aussi, et surtout, régionale.

L'utilisation d'un outil tel que Map-Info, logiciel de cartographie, doit permettre une représentation cartographique croisée des résultats acquis lors des points précédents. Ceci permettra certainement une analyse plus fine des manifestations des modifications climatiques qui auront éventuellement été identifiées.

On pourra, par exemple, s'intéresser à l'existence de gradients de variation des variables étudiées, ou à la délimitation de zones présentant un caractère particulier (sécheresse très marquée ou persistance d'une certaine homogénéité de part et d'autre de la date de l'éventuelle rupture).

On cherchera également à vérifier l'influence de certains facteurs comme le relief qui semble avoir un effet "pluviogène".

ICCARE

ÉCOULEMENTS

Les données d'écoulements disponibles sont celles des réseaux de mesure nationaux. C'est à dire que les premiers enregistrements remontent au début des années 50 pour les plus anciennes d'entre elles, mis à part les quelques stations hydrométriques de référence suivies depuis le début du Siècle sur certains grands fleuves.

Si beaucoup de ces stations hydrométriques se situent dans des zones où la pression anthropique est faible, il sera cependant pratiquement impossible de reconstituer les débits naturels de celles pour lesquelles ce n'est pas le cas. Toutes les données nécessaires (nombre et fonctionnement hydraulique des retenues collinaires, déforestation, etc.) ne sont, en effet, généralement pas disponibles.

Ceci devra donc être pris en compte lors de l'interprétation des résultats acquis sur certains grands fleuves très fortement exploités et aménagés tels que le Bandama en Côte d'Ivoire.

1) Existe-t-il une diminution des volumes écoulés annuels depuis la fin des années 1960 et le début des années 1970 ? Si cette modification existe, est-elle uniforme dans l'espace ?

Afin de vérifier la réalité de ces assertions, on procédera de la façon suivante:

- Sur l'ensemble des stations de la zone étudiée, on commencera par identifier les 4 périodes suivantes :
1950 – 1959 / 1960 – 1969 / 1970 – 1979 / 1980 – 1989.
- On étudiera, pour chaque station hydrométrique et pour chaque décennie, la variabilité de la moyenne interannuelle des débits moyens annuels. L'utilisation d'une variable de type "indice d'hydraulicité" peut permettre une caractérisation et une cartographie de cette variabilité.
- Chacune de ces périodes sera caractérisée plus précisément par comparaison et analyse à partir de séries longues. Il conviendra donc d'identifier avec soin les stations de référence.
- A l'aide de différents types de représentations graphiques et cartographiques, on analysera l'éventuelle variabilité spatiale du phénomène depuis 1950: pays par pays, par groupe de pays, pour la zone.

Si l'ensemble de ces tests se révèle positif, c'est à dire si l'on peut mettre en évidence un changement dans les séries, on cherchera à caractériser la "date" de la rupture par des méthodes non paramétriques et bayésiennes, et on s'intéressera à la concordance de cette "date" avec les résultats précédents.

2) Observe-t-on un décalage des crues dans le temps ? Peut-on constater un renforcement de la crue de Septembre – Octobre aux dépens de la crue de Juin dans les régions à deux saisons des pluies (rééquilibrage) ? Les formes des crues ont-elles évolué, les hydrogrammes sont-ils plus aplatis ou plus pointus ?

Une telle étude devra être réalisée pour l'ensemble des stations hydrométriques disponibles sur la période considérée.

L'éventuel décalage des crues dans le temps sera estimé par l'étude des dates d'occurrence des variables VCX5 et VCX10 (débits moyens maximum de 5 et 10 jours). Cette étude sera menée pour les deux types de crues dans les régions à deux saisons des pluies. Comme pour la pluviométrie, on procédera par décennie et par comparaison avec des séries de longue durée enregistrées à quelques stations de référence.

L'étude de la variation des rapports suivants :

$$\frac{\text{VCX5Juin}}{\text{VCX5(Sept - Oct)}} , \frac{\text{VCX10Juin}}{\text{VCX10(Sept - Oct)}} , \frac{\text{VCX20Juin}}{\text{VCX20(Sept - Oct)}} \text{ et } \frac{\text{VCX30Juin}}{\text{VCX30(Sept - Oct)}}$$

doit permettre d'apprécier l'éventuel rééquilibrage entre les crues dans les régions à deux saisons des pluies.

Pour juger des modifications des formes des hydrogrammes de crues (dans les régions à une comme à deux saisons des pluies), on pourra s'intéresser aux rapports suivants :

$$\frac{\text{VCX5} - \text{VCX10}}{\text{VCX10}} , \frac{\text{VCX10} - \text{VCX20}}{\text{VCX20}} \text{ et } \frac{\text{VCX10} - \text{VCX30}}{\text{VCX30}}$$

Ces rapports tendent vers zéro lorsque les crues étudiées sont très aplaties.

D'autres indices relatifs aux formes de crues et caractérisant plus particulièrement montée de crue ou décrue pourront également être définis.

L'étude de ces différents rapports sera réalisée par décennie et pour les séries de longue durée des stations de référence.

On proposera une représentation graphique des phénomènes. Dans l'hypothèse d'une rupture, on cherchera à caractériser cette rupture, et on s'intéressera à sa concordance avec les résultats précédents.

3) Existe-t-il une diminution des crues et une modification des caractéristiques des hautes eaux ?

On définira, pour chaque station hydrométrique, un ensemble de variables VCXn (avec n = 1, 5, 10, 20, 30, 60, 90), débits moyens maximum de n jours consécutifs. Ces variables permettent de caractériser le débit de pointe journalier (VCX1) mais aussi les débits moyens sur des périodes plus longues.

Les variations des valeurs moyennes interannuelles de ces différents indices seront étudiées par décennie.

Des stations de longue durée seront retenues pour permettre une étude année par année des variations des indices VCXn.

On proposera une représentation graphique des phénomènes. Dans l'hypothèse d'une rupture, on cherchera à caractériser cette rupture, et on s'intéressera à sa concordance avec les résultats précédents.

4) Existe-t-il une modification dans les phénomènes de décrue ? Les tarissements sont-ils plus rapides aujourd'hui que par le passé ?

Les variations des coefficients de tarissement calculés pour les décrues (Olivry, 1987; Olivry et al, 1993) seront étudiées ici. La détermination de ces coefficients devra faire l'objet d'une méthodologie rigoureuse permettant des comparaisons interannuelles à une même station, mais aussi des comparaisons entre station.

La décrue sera étudiée à différentes échelles de temps (mensuelle, décadaire et journalière) afin de juger de la sensibilité du coefficient de tarissement, et donc de sa représentativité, aux différents pas de temps.

Les variations des valeurs moyennes interannuelles de ces coefficients seront étudiées par décennie.

Des stations de longue durée seront retenues pour permettre une étude année par année des variations des coefficients de tarissement.

On proposera une représentation graphique des phénomènes. Dans l'hypothèse d'une rupture, on cherchera à caractériser cette rupture, et on s'intéressera à sa concordance avec les résultats précédents.

5) Assiste-t-on à un renforcement des étiages : durée, sévérité ?

On définira, pour chaque station hydrométrique, un ensemble de variables VCNn (avec $n = 1, 5, 10, 20, 30, 60$ voire 90 dans certains cas), débits moyens minimum de n jours consécutifs. Ces variables permettent de caractériser l'étiage maximum (VCN1) mais également les débits d'étiage moyens sur des périodes plus longues.

Les variations des valeurs moyennes interannuelles de ces différents indices seront étudiées par décennie.

Des stations de longue durée seront retenues pour permettre une étude année par année des variations des indices VCNn.

On proposera une représentation graphique des phénomènes. Dans l'hypothèse d'une rupture, on cherchera à caractériser cette rupture, et on s'intéressera à sa concordance avec les résultats précédents.

6) Cartographie et analyse régionale.

Pour l'ensemble des variables étudiées précédemment on procédera, si cela n'a pas déjà été fait, à une représentation graphique et cartographique la plus complète possible.

Cette représentation devra avoir une dimension locale (pays par pays) mais aussi, et surtout, régionale.

Comme dans le cas de la pluviométrie, on aura recours à l'utilisation d'un SIG. Ceci permettra certainement une analyse plus fine des manifestations des modifications climatiques qui auront éventuellement été identifiées.

On pourra, par exemple, s'intéresser à l'existence de gradients de variation des variables étudiées ou à la délimitation de zones présentant un caractère particulier.

ICCARE

FACTEURS DE L'ÉCOULEMENT

On s'intéressera ici aux modifications qu'ont pu subir les facteurs de l'écoulement. C'est à dire que l'on cherchera à vérifier si un changement climatique, préalablement identifié, a pu modifier ces facteurs, de sorte que la réponse des bassins versants soit désormais différente de ce qu'elle était auparavant.

Cette étude nécessitera le recours à la modélisation pluie-débit et à différents types d'interprétation. On s'intéressera à un grand nombre de bassins versants pour tenter d'expliquer et de généraliser les phénomènes. Cependant, la mise en évidence d'un comportement homogène implique l'étude de bassins versants qui ne soient pas eux-mêmes trop hétérogènes, notamment d'un point de vue physiographique. Il convient donc d'envisager une approche qui serait, a priori, limitée à des bassins versants de quelques milliers de km² uniquement.

Si une attention particulière doit être portée aux modifications des facteurs de l'écoulement éventuellement intervenues et identifiables après le changement climatique, on s'intéressera également à la mise en évidence de phénomènes semblables de part et d'autre des années 1983 – 1984, années de sécheresse extrême (Servat et Dezetter, 1993).

Deux types de modèles pluie-débit seront principalement utilisés: un modèle conceptuel simple à deux paramètres et un modèle de type gestion d'une réserve utile. La démarche sera la suivante:

- A l'aide du modèle pluie-débit conceptuel simple du type GR2M (Kabouya, 1990), les modifications des facteurs de l'écoulement pourront être étudiées de la manière suivante:
 - * On s'intéressera tout d'abord à l'évolution des paramètres du modèle obtenus en procédant à des calages "glissants" sur des périodes de 4 ans environ. Le recours à ce recouvrement partiel des périodes de calage sera utilisé afin de mieux cerner une éventuelle tendance dans l'évolution des paramètres calés. On procédera également à une analyse statistique destinée à mettre en évidence des différences significatives (Vandewiele et al, 1991)
 - * Le modèle retenu sera ensuite calé et validé sur des périodes suffisamment longues antérieures au changement climatique. Puis le modèle sera appliqué à des périodes postérieures à ce changement. On procédera alors à l'étude et à l'analyse des écarts entre écoulements annuels observé et calculé sur les années postérieures au changement climatique. La même méthodologie sera appliquée de part et d'autre des années 1983 – 1984 afin de vérifier si ces années de sécheresse extrême ont eu, elles aussi, une influence sur les facteurs de l'écoulement.
- Le modèle de type gestion d'une réserve utile consiste simplement en un réservoir qui a pour entrée la pluie, et dont le seul paramètre est la capacité. Si la pluie est supérieure à l'ETP, le complément alimente le réservoir; si la pluie est inférieure à

l'ETP, la pluie est reprise par ETR et un éventuel complément se voit soutiré du réservoir (ce complément peut être pris proportionnel au rapport S/A avec S, niveau du réservoir, et A, capacité du réservoir. On procédera alors ainsi:

- * On effectuera le calage de la réserve utile de 1950 à 1959, puis la validation de ce modèle sur la période 1960 – 1969. Il sera alors possible d'étudier et d'analyser les écarts entre écoulements annuels observé et calculé sur les décennies supposées postérieures à la rupture climatique : 1970 – 1979 et 1980 – 1989.
- * Cette même méthodologie sera appliquée de part et d'autre des années 1983 – 1984 afin de juger de l'influence de ces années de sécheresse extrême sur les facteurs de l'écoulement.

D'autres algorithmes de relation pluie-débit pourront être utilisés à ce niveau du programme.

Par la suite, à l'aide de l'un ou l'autre des modèles utilisés jusqu'à lors, on se livrera à quelques essais de prospective concernant les écoulements et les facteurs de l'écoulement à partir de différents scénarios :

- continuation de la sécheresse sous sa forme actuelle.
- aggravation de la sécheresse.
- retour à des conditions plus humides.

Cette partie de l'étude pourra nécessiter la mise au point d'un modèle de génération de chroniques de données pluviométriques simultanées à l'échelle d'espace qui aura été retenue. Le recours à la modélisation pluie-débit permettra de simuler les écoulements dans chacun des cas, et donc de quantifier les modifications, en terme de ressources disponibles, issues des différents scénarios envisagés.

ICCARE

CARTOGRAPHIE INFORMATISEE

Les résultats acquis durant cette étude, tant en ce qui concerne la pluie que les débits ou les facteurs de l'écoulement, devront être rendus accessibles pour les aménageurs et les gestionnaires sous la forme d'une "base de connaissances cartographiée", qui se révélera un outil supplémentaire d'aide à la décision. Une telle base intégrera certaines des représentations graphiques et cartographiques utilisées dans les phases d'analyse qui précèdent. Mais d'autres représentations devront être imaginées pour permettre un accès direct, en tout point de la zone étudiée, aux résultats simples et à leurs différentes combinaisons.

Un tel objectif de valorisation des résultats de cette étude pourra être atteint par l'utilisation d'un logiciel de cartographie performant. Un important travail de présentation devra être réalisé. Il faudra, en effet, avoir un accès simple et direct aux données et aux résultats bruts, mais également être en mesure de formuler une requête permettant d'accéder à des représentations plus complexes combinant différents types de résultats.

Ce produit de valorisation, pour être réellement accessible au plus grand nombre d'utilisateurs possibles dans la région étudiée, devra être réalisé sur micro-ordinateur de type P.C. Le logiciel avec lequel nous nous proposons de travailler est Map-Info, logiciel fonctionnant sous environnement Windows et possédant son propre langage de programmation, Map-Basic. Il s'agit d'un produit performant, très ouvert et largement répandu.

Cette phase de valorisation demandera un travail important mais apparaît aujourd'hui incontournable.

Elle devrait, en outre, constituer la vitrine d'un certain savoir-faire tout en permettant la diffusion et la présentation originale des résultats de ce programme de recherche.

ICCARE

HEP - BASE

HEP - Base (pour Hydrométrie, Evaporation, Pluviométrie) est une base conçue pour gérer l'ensemble des données qui se révéleront nécessaires au déroulement du programme ICCARE. L'objectif majeur de HEP - Base est de constituer un interface entre des fichiers de données de nature différente et les outils d'analyse, de modélisation et de représentation qui seront utilisés dans ICCARE.

Développée sous Paradox Windows 4.5, HEP - Base ne se limitera pas au programme ICCARE. Elle pourra, ultérieurement, être distribuée et permettra, à partir des banques de données que sont HYDROM et PLUVIOM, une gestion facilitée des données hydroclimatologiques sous environnement Windows (Cf. EMILE, Map-Info, etc.). Sa conception devrait également en permettre une utilisation en réseau.

- HEP - Base sera alimentée en données :
 - journalières à partir d'HYDROM 3.
 - journalières, décadaires et mensuelles à partir de PLUVIOM.
 - journalières, décadaires et mensuelles à partir de fichiers ASCII d'évapotranspiration.
- Il existera différents modules permettant une exploitation complète des données : saisie, visualisation, correction, inventaire, calculs, représentation graphique et impression.
- Les données seront gérées par enregistrements mensuels dans différentes tables. En outre, il existera des tables pour les pays, les bassins, les rivières, les zones (essentiellement pour l'évapotranspiration), les postes pluviométriques, les stations hydrométriques, les postes de mesure de l'évapotranspiration, etc.
- Les requêtes formulées par les utilisateurs de HEP - Base pourront l'être avec une ou plusieurs options :
 - type de données.
 - pas de temps,
 - période,
 - numéro de station ou de poste,
 - pays,
 - bassin,
 - rivière,
 - zone,
 - latitude,
 - longitude,
 - altitude,
 - superficie,
 - valeur minimale,
 - valeur maximale,

- Les sorties de HEP – Base consisteront en la production de fichiers de données préalablement sélectionnées, en des inventaires, des graphiques et des statistiques simples. Mais il sera également possible d'exporter des données en direction de logiciels tels que EMILE, Map-Info, Surfer sous Windows ou encore EXCEL.

ICCARE

COLLABORATIONS

Les collaborations envisagées dans le cadre de ce programme sont internes et externes à l'ORSTOM.

Internes à l'ORSTOM:

H. LUBES, ORSTOM Montpellier.

Hydrologues ORSTOM affectés dans les pays de la zone d'étude.

Externes à l'ORSTOM:

J. M. MASSON et C. BOCQUILLON, L.H.M. Université Montpellier II.

A. PARADIS, A. CHALIFOUR, B. ABDOUS, Département Mathématiques–
Informatique de l'Université du Québec à Trois Rivières.

M. HULME, Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich

Prof. VANDEWIELE, Laboratoire d'Hydrologie de la Vrije Universiteit Brussel.

Ministère de la Recherche Scientifique de Côte d'Ivoire.

Direction de l'Eau, Côte d'Ivoire.

Agence Nationale pour l'Aviation civile et la Météorologie, Côte d'Ivoire.

La collaboration de l'UQTR sera particulièrement recherchée pour les compétences en statistiques, cartographie et S.I.G. qu'elle peut apporter, notamment par le biais de son laboratoire de géomatique (S.I.G. et télédétection).

Etudiants et stagiaires (en particulier issus de l'Université et des Grandes Ecoles ivoiriennes) viendront occasionnellement renforcer l'équipe travaillant sur le programme ICCARE à Abidjan. Cette équipe est actuellement constituée de :

E. SERVAT, CR1 ORSTOM, Coordonnateur du Projet.

J.E. PATUREL, CR2 ORSTOM

J.F. BOYER, ASIN ORSTOM

B. KOUAME, Attaché de recherches, MESRS Côte d'Ivoire

ICCARE

REALISATION

La réalisation du programme ICCARE est prévue en plusieurs phases successives.

- **Phase préalable**

La réalisation de cette première phase, dont le contenu est décrit plus haut, donnera lieu à la production d'un rapport d'inventaire de données en cours de réalisation. Elle nécessitera un important travail dans le domaine de la collecte et de la mise en forme des données, et comprendra une analyse bibliographique et méthodologique poussée.

Cette phase se déroulera à Montpellier et à Abidjan, et devrait se terminer en Juin 1994, date à laquelle il est prévu une mission d'H. LUBES à Abidjan pour faire le point. Les aspects "base de données" seront traités prioritairement à Abidjan.

A l'issue de cette phase les aspects méthodologiques seront précisés et rédigés.

- **Précipitations et écoulements**

L'étude des précipitations et des écoulements sera menée de front.

L'équipe montpelliéraine aura essentiellement un rôle de soutien méthodologique, les traitements étant principalement effectués à Abidjan. L'analyse des résultats sera menée conjointement à Abidjan et à Montpellier.

Les développements relatifs à HEP-Base et Map-Info seront effectués à Abidjan où sera gérée la base de données du programme.

La fin de cette phase est prévue dans le courant du 2ème semestre 1995. Un rapport d'avancement fera la synthèse des résultats obtenus.

- **Facteurs de l'écoulement**

Durant la phase précédente l'équipe montpelliéraine aura affiné, en accord avec l'Antenne Hydrologique d'Abidjan, les aspects méthodologiques de cette troisième phase du programme.

Traitements (principalement effectués à Abidjan) et analyses (menées conjointement à Abidjan et à Montpellier) sont prévus pour se terminer dans le courant du 2ème semestre 1996. Un rapport d'avancement fera la synthèse des résultats obtenus.

- **Cartographie informatisée et valorisation du programme ICCARE**

L'ensemble des traitements informatiques nécessaires à l'élaboration d'un produit fini permettant une large diffusion des résultats du programme sera effectué durant cette phase, et principalement à Abidjan (en particulier en collaboration avec l'UQTR).

Durant cette phase, un rapport de synthèse présentant les méthodes et les résultats du programme ICCARE sera rédigé.

A l'issue de cette dernière phase, soit dans le courant du 2ème semestre 1997, un séminaire de présentation des résultats sera organisé à Abidjan pour un public régional.

REFERENCES

- Demarrée G., 1990. An indication of climatic change as seen from the rainfall data of a Mauritanian station. *Theor. Appl. Climatol.*, 42: 139–147.
- Hubert P. et Carbonnel J.P., 1987. Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of hydrology*, 95 (1987) 165–183.
- Hubert P., Carbonnel J.P. et Chaouche A., 1989. Segmentation des séries hydrométriques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of hydrology*, 110 (1989) 349–367.
- Kabouya M., 1990. Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse. Université Paris Sud. Décembre 1990.
- Mahé G. et Olivry J.C., 1991. Changements climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale du mensuel à l'interannuel. In: *Hydrology for the Water Management of Large River Basins* (Proc. Vienne Symp. August 1991), 163–172. IAHS Publ. n°201.
- Nicholson S.E., Kim J. et Hoopingarner J., 1988. *Atlas of African rainfall and its interannual variability*. Department of Meteorology, Florida State University Tallahassee, Florida, USA.
- Olivry J.C., 1987. Les conséquences durables de la sécheresse actuelle sur l'écoulement du fleuve Sénégal et l'hypersalinisation de la basse Casamance. In: *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources* (Proc. Vancouver Symp. August 1987), 501–512. IAHS Publ. n°168.
- Olivry J.C., Bricquet J.P. et Mahé G., 1993. Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide. In: *Hydrology of Warm Humid Regions* (Proc. Yokohama Symp. July 1993), 67–78. IAHS Publ. n°216.
- Servat E. et Dezetter A., 1993. Rainfall-runoff modelling and water resources assessment in northwestern Ivory Coast. Tentative extension to ungauged catchments. *Journal of hydrology*, 148 (1993) 231–248.
- Servat E. et Sakho M., 1993. Incidences de l'instabilité des ressources en eau sur la gestion d'un système d'eau aménagé. Cas du Sassandra en Côte d'Ivoire. In: *Hydrology of Warm Humid Regions* (Proc. Yokohama Symp. July 1993), 107–116. IAHS Publ. n°216.
- Sircoulon J., 1987. Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'Ouest depuis le début du 20^{ème} siècle. In: *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources* (Proc. Vancouver Symp. August 1987), 13–25. IAHS Publ. n°168.

- Sutcliffe J.V. et Knott D.G., 1987. Historical variations in African water resources. In: *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources* (Proc. Vancouver Symp. August 1987), 463-475. IAHS Publ. n°168.
- Vandewiele G.L., Xu C.-Y. et Ni-Lar-Win, 1991. Methodology for constructing monthly water balance models on basin scale. Laboratory of hydrology and Interuniversity Postgraduate Program in Hydrology. V.U.B. - Hydrologie (20) 1991. Vrije Universiteit Brussel.