

FONCTIONNEMENT D'UN SYSTÈME D'EAU SOUS DIFFÉRENTES HYPOTHÈSES DE RESSOURCES EN EAU. CAS DU BASSIN DU SASSANDRA EN CÔTE D'IVOIRE

E. SERVAT¹, M. SAKHO²

RÉSUMÉ

Après avoir constaté la diminution des ressources en eau de surface observée depuis une vingtaine d'années en Afrique de l'ouest, on décrit les aménagements projetés sur le bassin du Sassandra, zone d'étude retenue. Les méthodes utilisées pour générer les chroniques de deux cents ans d'apports aux différents ouvrages sont ensuite présentées. Ces chroniques permettent de procéder à des simulations de fonctionnement sur de longues durées dans des cas de figures correspondant aux contextes climatiques observés avant et depuis la sécheresse de la fin des années soixante. Les résultats montrent une nette baisse des performances du système d'eau en relation avec les conditions qui règnent depuis le début de la sécheresse. Les conclusions tirées de ces comparaisons et analyses mettent en évidence que, si la situation actuelle devait se prolonger en Afrique de l'ouest, les ressources en eau de surface ne seraient plus en correspondance avec des besoins déterminés et planifiés à partir de chroniques de données présentant des caractéristiques différentes de celles observées aujourd'hui. Les fréquences de défaillances seraient alors beaucoup plus élevées provoquant d'importantes chutes de production des aménagements réalisés. Les modifications apportées au fonctionnement du barrage de Buyo sont également analysées.

¹Orstom, antenne hydrologique, 06 BP 1203, cedex 1, Abidjan, Côte d'Ivoire.

²Direction de l'eau, Ministère des Travaux Publics, BP V161, Abidjan, Côte d'Ivoire.

INTRODUCTION

L'activité économique de la Côte d'Ivoire est principalement liée à l'agriculture, et à un degré moindre à une relative industrialisation dont l'énergie est tirée à 60 % de l'hydro-électricité. C'est dire l'importance considérable que revêt la disponibilité des ressources en eau. Parallèlement, les études réalisées dans les domaines de l'aménagement et de la gestion de cette ressource tablent, en général, sur l'hypothèse de stationnarité des chroniques de données climatologiques et hydrologiques. Or, l'analyse de ces données (SIRCOULON, 1990) montre qu'en certains endroits, et en Afrique de l'ouest en particulier, cette hypothèse pourrait ne plus être vérifiée ; les effets tangibles en étant la persistance des déficits pluviométriques aux conséquences dramatiques. Une telle instabilité, si elle se vérifie, pose alors le problème de ses conséquences sur les performances des équipements et conduit à envisager une nouvelle démarche en matière de planification des aménagements et de gestion de la ressource. En nous basant sur les projets agricoles et hydro-électriques envisageables à moyen terme sur le bassin du Sassandra en amont de Buyo, aujourd'hui très faiblement équipé, nous avons cherché à évaluer quelle pourrait être l'incidence de cette instabilité des ressources en eau sur le fonctionnement d'un système d'eau aménagé.

SCHÉMA D'AMÉNAGEMENT RETENU ET DONNÉES GÉNÉRÉES

SCHÉMA D'AMÉNAGEMENT RETENU POUR LE BASSIN DU SASSANDRA

Le bassin versant du Sassandra en amont de Buyo, importante retenue de quelques 9 milliards de mètres cubes à vocation exclusivement hydro-électrique, couvre près de 45 000 km². C'est une zone qui, aujourd'hui encore, est très faiblement aménagée et dont les données hydrométriques disponibles peuvent être considérées comme représentatives de l'état naturel. À partir des reconnaissances de sites de retenues qui avaient été effectuées par EDF dans les années 1970, et des projets de développement envisageables à moyen terme, nous avons élaboré un schéma réaliste d'aménagement hydraulique de cette région.

Le nord du bassin, situé en zone de savane et pour lequel on observe une saison des pluies unique est une zone à vocation agropastorale. Les trois ouvrages que nous y avons situés sont donc de capacité relativement réduite et à utilisation principalement agricole. Le sud du bassin, quant à lui, est déjà en zone de forêt et présente deux saisons des pluies dans l'année. Les aménagements retenus pour cette zone sont d'une dimension beaucoup plus importante, et à vocation hydro-électrique en priorité.

Le tableau 1 présente les différentes caractéristiques et contraintes de gestion de ces ouvrages. Un premier essai avait été effectué avec un barrage supplémentaire portant le numéro 4, mais cette hypothèse, peu réaliste, a été abandonnée. Par contre, la numérotation des retenues n'a pas été modifiée par la suite. Les relations fonctionnelles des ouvrages, entre eux, ont été représentées en figure 1.

Tableau 1
Caractéristiques du système d'eau aménagé

Retenue	Capacité (Mm ³)	Module interann.	Objectif	Débit réservé	Besoins en irrigation	Production hydro-élec.
1	62	5m ³ /s	Agricole	0,32 m ³ /s	12000 ha soja en amont	—
2	32,5	35 m ³ /s	Agricole	2,3 m ³ /s	10000 ha de canne à sucre en amont	—
3	30	65 m ³ /s	Agri/Élec	3m ³ /s	500 ha de riz 2 cultures/an 250 ha vivrier	2 turbines Q = 40 m ³ /s
5	5000	247 m ³ /s	Électricité	10m ³ /s	—	2 turbines Q = 160 m ³ /s
6	1450	65m ³ /s	Agri/Élec	3,5 m ³ /s	1000 ha de riz 200 ha vivrier	2 turbines Q = 50 m ³ /s

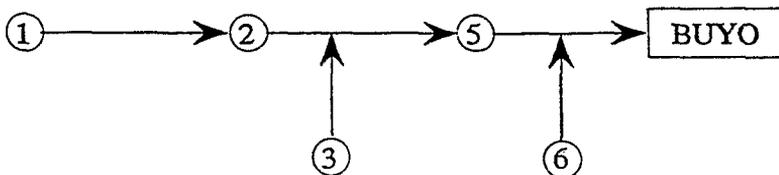


Figure 1

Relations fonctionnelles des différents ouvrages composant le schéma d'aménagement retenu pour le bassin du Sassandra en amont de Buyo

DONNÉES GÉNÉRÉES

Pour simuler le fonctionnement de ce système d'eau, nous avons été amenés à générer deux séries de deux cents ans de données décennales de pluies et de débits en différents points du bassin versant, correspondant à cinq postes pluviométriques du réseau ivoirien et aux stations hydrométriques contrôlant les sites potentiellement aménagés. La génération de ces données a été précédée d'une étude visant à confirmer l'instabilité des chroniques de précipitations et à fixer l'année de la « rupture » observée dans ces séries chronologiques. Nous étions alors en mesure de générer une série de deux cents ans ayant les caractéristiques observées avant cette date, et une autre série, de même longueur, représentative de ce qui est observé depuis.

ÉTUDE DE L'INSTABILITÉ DES SÉRIES PLUVIOMÉTRIQUES

Les travaux de NICHOLSON *et al* (1988) permettent d'apprécier commodément les variations pluviométriques depuis le début du siècle en zone sahélienne, en s'appuyant simplement sur les écarts pluviométriques annuels standardisés. Nous avons utilisé la même méthode pour tenter de détecter une éventuelle rupture des séries climatiques dont nous disposons et qui concernent les postes d'Odiénné, Man, Touba, Guiglo et Duékoué dont la période d'observation commune débute en 1957. Sur la période 1957-1987, nous avons donc calculé pour chaque poste et annuellement, la variable $(x_i - \bar{x})/s$ (x_i : pluviométrie de l'année i , \bar{x} : pluviométrie annuelle moyenne, s : écart-type). L'examen des tracés qui en résultent fait apparaître des « ruptures » qui varient entre 1968 et 1971. Ces ruptures apparaissent plus nettement encore lorsque les variables sont lissées par l'utilisation d'une moyenne mobile. La figure 2 présente, à titre d'exemple, le cas de la station de Touba. À l'issue de cette étude, nous distinguerons donc la période « avant 1969 » et la période « après 1969 », ce qui est en accord avec les résultats présentés par SIRCOULON (1990) et HUBERT *et al* (1989).

GÉNÉRATION DE LA PLUVIOMÉTRIE DÉCADAIRE

Notre objectif n'était pas de mettre au point un modèle stochastique complet de génération de chroniques de données pluviométriques décennales, mais de fabriquer des chroniques d'apports réalistes. Nous avons donc opté pour une procédure simplifiée dont les résultats se sont montrés suffisamment représentatifs.

Pour chacun des postes pluviométriques, une loi des fuites a été ajustée pour chaque décennie à partir des données observées. Puis, par tirage au hasard dans ces différentes lois ajustées, nous avons généré deux cents ans de pluviométrie décennale. De manière à conserver au système une certaine cohérence (une année à tendance sèche est ressentie de façon à peu près identique sur l'ensemble

de la région, et il en va de même pour les années pluvieuses), ce sont les mêmes séries de nombres tirés au hasard qui ont été utilisées en chacun des postes pour générer les chroniques de données par tirage dans les lois des fuites. De même, pour respecter l'alternance des périodes sèches et humides et n'avoir à juger que de l'incidence de la diminution de la ressource, les mêmes séries ont été utilisées « avant 1969 » et « après 1969 ». En procédant ainsi, nous avons obtenu des séries générées dont les caractéristiques sont très voisines des séries observées tout en offrant un éventail de situations variées (SAKHO, 1991).

GÉNÉRATION DES APPORTS NATURELS AUX STATIONS HYDROMÉTRIQUES DE RÉFÉRENCE

Disposant des séries pluviométriques générées, nous avons choisi de représenter la relation pluie-débit à l'aide de modèles autorégressifs et corrélatifs, fonctionnant au pas de temps décennal. Les coefficients de corrélation des différentes équations établies pour générer les chroniques de débits étaient tous supérieurs à 0,80, voire à 0,90 pour les stations aval du Sassandra, ce qui est satisfaisant au vu des objectifs visés par cette étude.

L'ensemble des hypothèses qui ont été faites, tant au niveau de la génération des pluies qu'au niveau des débits n'a pas pour effet de « dénaturer » le régime des eaux au point de lisser les écarts ou au contraire de créer des différences fictives. Elles permettent, en fait, de reconstituer des chroniques « plausibles », qui sont compatibles avec ce que l'on connaît, et qui se résume à une information pluie-débit concomitante très réduite.

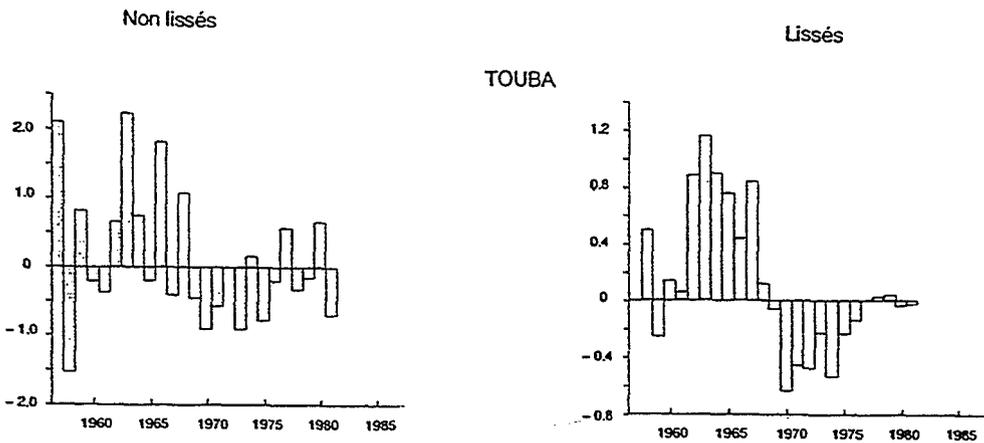


Figure 2
Indices pluviométriques réduits $((x_i - \bar{x})/s)$ à la station de Touba

LE MODÈLE DE SIMULATION DE FONCTIONNEMENT

Le modèle de simulation de fonctionnement du système d'eau aménagé doit prendre en compte, essentiellement, deux types de besoins, tout en tenant compte d'un débit garanti aval :

(a) irrigation : en amont de la retenue (le pompage est alors effectué directement dans la retenue), ou en aval de la retenue avec, cette fois, un pompage au fil de l'eau dans le bief aval ;

(b) hydro-électricité : certaines des retenues envisagées devant en effet être équipées de turbines.

En établissant un bilan complet sur chacune des retenues, le modèle doit être en mesure de fournir, à chaque pas de temps (donc à chaque décade), l'état de chacun des ouvrages et les niveaux de satisfaction des différentes contraintes de gestion. Il sera alors possible de mettre en évidence et de mesurer l'incidence de ressources en eau moins abondantes sur les performances de ces ouvrages en établissant, par exemple, des comparaisons en terme de défaillances.

ORGANISATION GÉNÉRALE ET FONCTIONNEMENT DU MODÈLE DE SIMULATION

Nous ne donnerons ici qu'une rapide description de l'organisation du modèle, décrit par ailleurs (SAKHO, 1991). À chaque pas de temps, les six retenues sont traitées successivement, de l'amont vers l'aval. Pour un ouvrage donné, le modèle effectue un bilan complet des entrées-sorties sur la retenue au pas de temps considéré. Il détermine, selon les cas, les volumes fournis à l'agriculture amont, la lâchure (qui est la somme du débit garanti et du volume fourni par l'agriculture aval), les éventuels débordements et la production électrique. À l'issue de cet ensemble de calculs, on connaît l'état de la retenue (c'est-à-dire la cote du plan d'eau) à la fin du pas de temps.

ANALYSE DES RÉPONSES DU SYSTÈME D'EAU AMÉNAGÉ AUX SIMULATIONS DE FONCTIONNEMENT

Le fonctionnement du système d'eau aménagé a été simulé au pas de temps décadaire durant deux cents années dans les conditions de type « avant 1969 » et « après 1969 ». L'analyse des résultats s'est effectuée selon des niveaux de complexité et de détails croissants :

- (a) analyse globale des réactions du système dans chacun des cas ;
- (b) analyse globale par ouvrage ;

(c) analyse de quelques cas particuliers de défaillances.

Notre étude nous a également conduits à considérer l'impact de l'aménagement de ce système d'eau sur le barrage de Buyo existant, à vocation hydro-électrique, et dont le fonctionnement est aujourd'hui satisfaisant.

ANALYSE GLOBALE DES RÉACTIONS

Le modèle de simulation permet de calculer les apports à chaque retenue en l'état aménagé du système d'eau pour chacune des situations. Les différences sont très marquées et, bien entendu, à l'avantage de la série « avant 1969 ». Elles s'accroissent en valeur absolue avec la superficie des bassins, et du nord vers le sud. Sur les barrages 5 et 6, ces écarts entre apports « avant 1969 » et « après 1969 » peuvent atteindre jusqu'à plusieurs centaines de millions de mètres cubes par an. Les volumes annuels de déversement s'inscrivent également dans la logique de la diminution de la ressource « après 1969 », puisque les débordements constatés pour cette simulation sont systématiquement les plus faibles. Dans le cas du barrage 6, par exemple, on n'y observe pratiquement jamais de déversement alors qu'ils oscillaient régulièrement autour de 150 millions de mètres cubes par an « avant 1969 ». L'algorithme utilisé permet d'estimer, par une méthode simplifiée (SAKHO, 1991), des volumes de pertes dans le bief situé en aval de la retenue. Elles apparaissent plus importantes pour la série « après 1969 » que pour la série « avant 1969 », et ce pour les barrages à faible capacité (barrages 1 et 2), indiquant par là que la diminution des ressources induit une baisse du niveau des lâchures au sens large ; ce qui entraîne une diminution des volumes qui transitent dans les biefs situés en aval des retenues à faible capacité. Ces pertes restent cependant relativement faibles en valeur absolue.

ANALYSE DES DÉFAILLANCES AU REGARD DES CONTRAINTES

SATISFACTION DE LA DEMANDE AGRICOLE

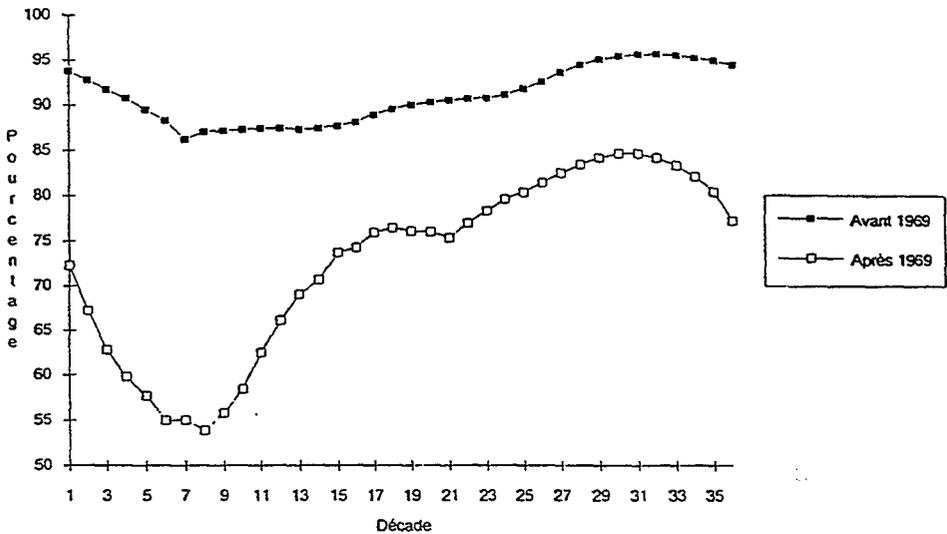
L'évaluation des performances du système par rapport à cette contrainte est faite à partir des moyennes décennales des 200 années de simulation et exprimée en pourcentage de satisfaction. Les ouvrages du nord du bassin (1, 2 et 3), dont la vocation est hydro-agricole, présentent des défaillances vers fin mars/début avril. Ces défaillances prennent beaucoup d'ampleur pour la série des apports « après 1969 ». Les retenues situées en tête de bassin ont des réactions brutales à la diminution des apports, la cote du plan d'eau chutant très rapidement. Cela est dû à la faible capacité de ces ouvrages, ce qui ne leur permet pas de jouer un rôle tampon lorsque les apports diminuent au plus fort de la saison sèche.

DÉBIT GARANTI

La satisfaction de la contrainte débit garanti est liée à celle des besoins agricoles. Cependant, le niveau de défaillance est moindre (seuls les barrages 1 et 2 montrent des défaillances) dans la mesure où, dans le modèle de simulation, une priorité a été affectée au débit garanti par rapport aux besoins hydro-agricoles. La gestion de la pénurie se fait donc au détriment de l'agriculture, mais plus sévèrement « après 1969 » qu'« avant 1969 ».

PRODUCTION HYDRO-ÉLECTRIQUE

La production d'hydro-électricité est grande consommatrice des ressources en eau. Par comparaison avec l'agriculture, on peut donc s'attendre à une plus grande sensibilité du système face à la diminution des ressources. Sur les trois barrages équipés de turbines (3, 5 et 6), des déficits de production hydro-électrique apparaissent de façon beaucoup plus accentués dans la période « après 1969 ». Le barrage 3 a la production la plus stable et la plus proche de son niveau nominal tout au long de l'année. En effet, c'est de janvier à fin mars, que l'on assiste aux défaillances de cet ouvrage qui peuvent atteindre 25 % sur la période « après 1969 » au plus fort de la saison sèche, alors qu'elles dépassent à peine 10 % « avant 1969 ». Le barrage 5 présente une baisse de performance systématique, de l'ordre de 5 % en moyenne par décennie sur toute l'année, de la série « après 1969 » par rapport à la série « avant 1969 ». Le barrage 6 illustre, quant à lui, le cas le plus criant de contre-performance due à la diminution de la ressource (figure 3). « Avant 1969 », la production est plus ou moins constante et se situe autour de 90 % de satisfaction de la contrainte hydro-électrique. « Après 1969 », à la fin de la saison sèche, on se trouve, en moyenne, à peine à 55 % de satisfaction de la production décennale nominale, ce qui représente un déficit de l'ordre de 30 % par rapport à la série d'« avant 1969 ». En outre, la courbe de production hydro-électrique de la série « après 1969 » ne dépasse que très rarement les 80 % de la production nominale. On observe également, et toujours pour cette série, aux alentours de la 21^{ème} décennie, une légère diminution de la production, conséquence de la petite saison sèche qui s'observe dans le sud du pays. De plus, la production montre une grande variabilité tout au long de l'année, pouvant atteindre une amplitude de 25 % entre les valeurs les plus basses et les valeurs les plus élevées, alors qu'elle n'est que de 10 % « avant 1969 ».

**Figure 3**

Niveau moyen décadaire de satisfaction de la production électrique pour le barrage 6 (niveau nominal 100 %)

ÉTUDE DE QUELQUES DÉFAILLANCES PARTICULIÈRES

Nous nous sommes particulièrement intéressés à certaines années des séries chronologiques générées afin de tenter de mieux appréhender les situations pouvant conduire à des défaillances du système. Elles ont été choisies parmi celles qui présentent le plus grand nombre de décades défaillantes consécutives, ce qui a pour effet d'augmenter leur sévérité. Cette étude était possible dans la mesure où le système que nous avons mis en place offre « avant 1969 » et « après 1969 » les mêmes successions d'années sèches et humides du fait de la génération des données à partir des mêmes séries de nombres au hasard. Cette analyse a montré (SAKHO, 1991) que pour les barrages à faible capacité la différence est très minime qui fait passer d'une situation satisfaisante à une défaillance. Généralement la chute est brutale, les retenues ne pouvant jouer un véritable rôle de tampon. En cas d'apports déficitaires prolongés, la situation persiste, occasionnant principalement de sérieuses difficultés à l'agriculture irriguée. Pour les barrages à capacité plus importante, la progressivité des défaillances est plus accentuée, les retenues pouvant compenser quelques temps la faiblesse des apports. Cependant, aucun seuil d'apports minimum sur une période donnée, en-dessous duquel se produisent rupture et défaillance, n'a pu réellement être mis en évidence.

IMPACT DE L'AMÉNAGEMENT AMONT SUR BUYO

La réalisation d'un aménagement du type de celui que nous venons de décrire pourrait avoir un sérieux impact sur le fonctionnement du barrage de Buyo (9 milliards de mètres cubes et un productible garanti de 610 GWh). Les apports de cette retenue avaient été évalués à partir des données des stations du N'Zo à Guiglo et du Sassandra à Guessabo sur la période 1955-1974, c'est-à-dire avant la période de sécheresse. Dans le cadre du système d'eau aménagé, les sorties des barrages 5 et 6 correspondent respectivement à ces deux stations. Ne disposant pas des consignes de turbinage propres à Buyo, nous n'avons pas pu évaluer l'impact de l'aménagement à partir de la production électrique correspondant aux différents cas envisagés : pas d'aménagement amont, aménagement amont et apports type « avant 1969 », aménagement amont et apports type « après 1969 ». Nous avons donc fait porter la comparaison sur les apports, cherchant à évaluer et à chiffrer l'impact de l'aménagement sur la régularité et l'abondance des ressources disponibles pour Buyo dans les différents cas de figure.

Les apports au barrage de Buyo, issus des aménagements, ont été calculés pour les années décennales sèches et humides (tableau 2). Ils ont ensuite été comparés aux conditions moyennes de fonctionnement de Buyo. L'aménagement du bassin versant du Sassandra en amont de Buyo entraînerait d'une manière générale une forte diminution de la variabilité des apports annuels, ce que confirment les figures 4 et 5. La série de type « avant 1969 » entraîne, en effet, une nette régularisation des apports mensuels, en particulier en saison sèche, pour un niveau de performance global comparable, voire légèrement supérieur, à celui de l'état naturel. La série de type « après 1969 » conduit, quant à elle, à un déficit d'apports de près d'un milliard de mètres cubes en année moyenne, ce qui ne serait pas sans conséquences sur le fonctionnement de l'ouvrage. Cette analyse de l'impact sur Buyo montre l'incidence que pourrait avoir, sur des aménagements déjà existants, une sécheresse qui irait en se prolongeant.

Tableau 2

Apports annuels à Buyo, en milliers de mètres cubes, pour différents cas de figure

	Apports moyens annuels (Mm ³)	Année décennale humide (Mm ³)	Année décennale sèche (Mm ³)
Situation naturelle	9 681	14 037	6 100
Situation aménagée «avant 1969»	9 858	11 528	8 468
Situation aménagée «après 1969»	8 790	9 732	7 594

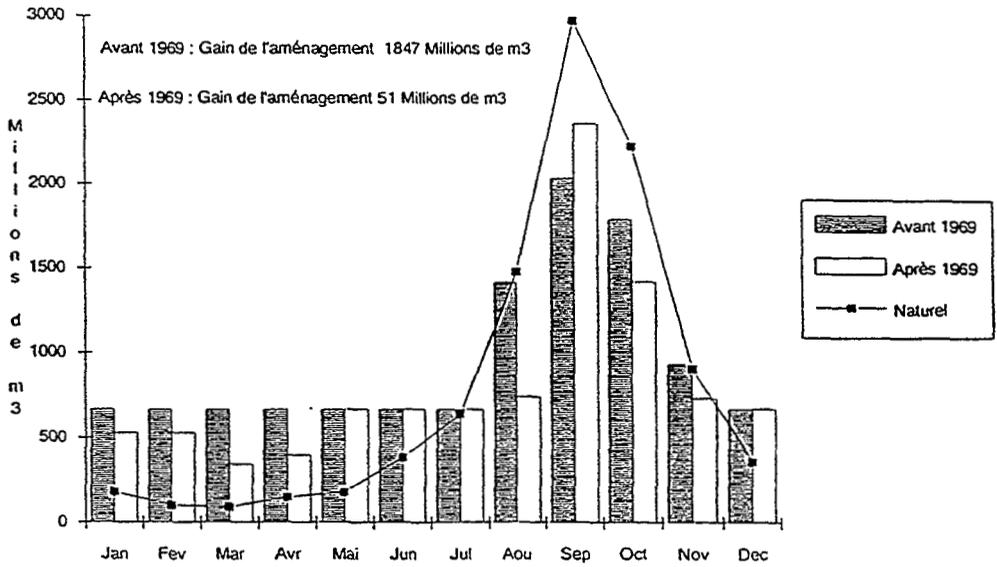


Figure 4

Apports, dans le barrage de Buyo, de l'année décennale humide en situation de système d'eau aménagé comparés aux apports « naturels » moyens

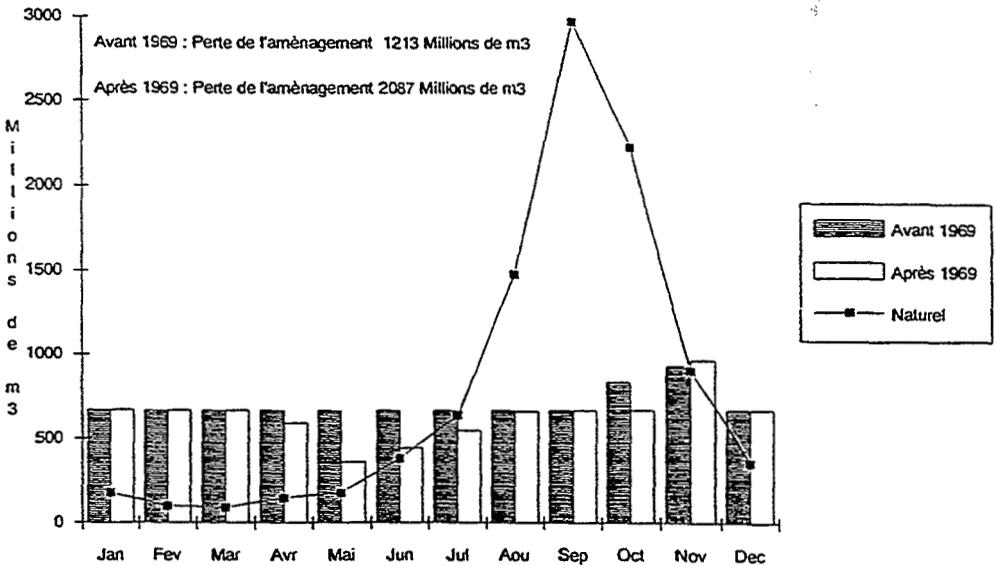


Figure 5

Apports, dans le barrage de Buyo, de l'année décennale sèche en situation de système d'eau aménagé comparés aux apports « naturels » moyens

CONCLUSION

Cette étude menée à partir d'une situation réelle, s'est appuyée sur la nette diminution des ressources en eau constatée depuis la fin des années 1960 dans toute la zone intertropicale africaine. L'exemple choisi pour en mesurer l'impact a le mérite de figurer au nombre des futurs projets d'équipement de la Côte d'Ivoire, ce qui lui confère une forte connotation d'utilité dans le cadre de la gestion des ressources naturelles ivoiriennes.

Certes, pour pallier l'absence de données, des moyens qui ont pu paraître audacieux ont été utilisés (génération de la pluviométrie, modélisation pluie-débit) ; leur pertinence est peut-être discutable, mais en l'occurrence, la rigueur la plus absolue a dû laisser la place à la nécessité.

On a alors pu montrer que la diminution des ressources, comme on l'observe depuis la fin des années 1960, entraîne des défaillances plus sévères et plus longues au regard de contraintes qui, par contre, sont satisfaites lorsque les chroniques d'apports ont les caractéristiques des séries observées avant 1969. Ainsi, bien que la pluviométrie reste plus abondante et mieux répartie que plus au nord en région sahélienne, la zone forestière humide présente, elle aussi, des situations critiques vis-à-vis de ressources en baisse, reflet de la tendance climatique générale observée aujourd'hui dans toute la région. Si la situation actuelle devait se prolonger en Afrique de l'ouest, les ressources en eau de surface ne seraient plus en correspondance avec des besoins déterminés et planifiés à partir de chroniques de données présentant des caractéristiques différentes de celles observées aujourd'hui. Les fréquences de défaillances seraient alors beaucoup plus élevées provoquant d'importantes chutes de production des aménagements réalisés.

Au vu de ces fluctuations et des difficultés d'adaptation présentées par les ouvrages, il faudrait pouvoir développer une réflexion allant dans le sens d'une conception dynamique des systèmes d'eau qui intégrerait, en partie, cette instabilité. On s'orienterait, ainsi, vers une reformulation de la notion de « normes hydrologiques » dont le caractère figé apparaît aujourd'hui comme un sérieux handicap à la réalisation de nouveaux aménagements.

BIBLIOGRAPHIE

HUBERT P., CARBONNEL J.P. et CHAOUCHE A., 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'ouest. *Journal of hydrology*, n°110, 349-367.

NICHOLSON S.E., KIM J., HOOPINGARNER., 1988. Atlas of african rainfall and its interannual variability. Department of Meteorology, the Florida State University, 237 p.

SAKHO M., 1991. Incidences de l'instabilité des ressources en eau de surface sur les performances simulées d'un système d'eau. Exemple du Sassandra en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat. Université de Montpellier II, novembre 1991.

SIRCOULON J., 1990. Impact possible des changements climatiques sur les ressources en eau des régions arides et semi-arides. WMO/TD - n°380.