**Conférence Internationale sur l’hydrologie des grands bassins Africains**

**Hammamet, Tunisie 26-30 Octobre 2015**

**Etat et perspectives d’aménagement du bassin du Sassandra en Côte d’Ivoire**

**Pierre-Yves BOURGIN1, Marine RIFFARD-CHENET1**

1Tractebel Engineering Coyne-et-Bellier, Le Delage – 5 rue du 19 mars 1962, 92622 Gennevilliers Cedex, France

pierre-yves.bourgin@gdfsuez.com

**Résumé**

Le fleuve Sassandra draine un bassin versant d’environ 75 000 km² à l’ouest de la Côte d’Ivoire. S’étirant des savanes du nord à la forêt dense au sud, il subit l’influence successive des régimes pluviométriques du climat tropical de transition et du climat équatorial de transition.

L’aménagement du Sassandra a commencé au début des années 1980 avec la construction du barrage-réservoir et de l’usine hydroélectrique de Buyo (environ 8 milliards de m3 de retenue et 165 MW de puissance installée). Il se poursuit actuellement avec la construction du barrage de Soubré en aval, un aménagement au fil de l’eau de 275 MW qui va bénéficier de la régularisation des débits réalisée par Buyo et pour lequel Tractebel Enginnering/Coyne-et-Bellier a réalisé les études de conception et supervise actuellement la construction.

Placé au cœur de la stratégie de développement du potentiel hydroélectrique national, le bassin du Sassandra suscite de nouvelles perspectives d’aménagement, autant à l’amont qu’à l’aval du barrage-réservoir de Buyo.

Dans un contexte d’instabilité des ressources en eau (Servat et Sakho, 1993) et d’accès limité aux données d’observation hydrométéorologique, l’estimation des apports hydrologiques constitue un défi majeur pour les planificateurs et les bureaux en charge des études. Les méthodes hydrologiques mises en œuvre seront présentées ainsi qu’une tentative d’évaluation de la justesse et la robustesse des résultats obtenus.

Ces apports hydrologiques constituent les principaux forçages d’un modèle intégré de gestion des ressources en eau et de planification de l’aménagement du bassin du Sassandra. Les caractéristiques et les principaux bénéfices tirés de l’utilisation de ce modèle sont discutés.

**Mots-clefs :** Côte d’Ivoire ; Sassandra ; modélisation hydrologique ; GR2M ; hydroélectricité ; aménagement ; planification ; conception ; impacts ; variantes

# Introduction

Près de 5 ans après la crise post-électorale d’octobre 2010, la Côte d’Ivoire a repris le chemin de la croissance économique avec des taux établis entre 8 et 10% pour les années 2012 à 2014 et des perspectives du même ordre pour les années à venir. Les besoins en énergie pour soutenir de tels niveaux de croissance économique sont immenses. Le taux de croissance prévisionnelle de la consommation électrique intérieure brute est évalué entre 8 et 10 % à court et moyen terme.

Une augmentation de la capacité installée de 100 à 150 MW par an est nécessaire pour assurer l’équilibre entre l’offre et la demande en électricité. Cette augmentation correspond à 6 à 9% de la capacité installée du parc de production en 2014 soit 1 630 MW, dont 37% est constitué par les centrales hydroélectriques.

La Côte d’Ivoire mise sur son fort potentiel hydroélectrique pour augmenter la capacité de son parc de production et ainsi assurer l’équilibre entre l’offre et une demande en forte augmentation. Le bassin du fleuve Sassandra est au cœur de cette stratégie de développement hydroélectrique avec l’ambition de faire de ce territoire le plus grand pôle énergétique de la Côte d’Ivoire.

Tractebel Engineering/Coyne et Bélier accompagne la Compagnie Ivoirienne d’Electricité (CIE) depuis de nombreuses années dans la réalisation de ce développement à travers des missions de planification, de faisabilité et conception, et d’exécution, comme pour le barrage de Soubré (275 MW) actuellement en construction.

Identifiés lors de l’inventaire du potentiel hydroélectrique national réalisé entre 1977 et 1979 par Electricité de France (EDF), certains sites potentiels suscitent aujourd’hui des perspectives d’investissement et donc un regain d’attention des planificateurs et bureaux d’étude en charge de la réalisation des études de faisabilité.

La multiplication et l’interaction des projets d’aménagement nécessitent une approche de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) à l’échelle du bassin versant du fleuve Sassandra. Par ailleurs, le bassin du Sassandra a connu une forte baisse de la pluviométrie et des écoulements de surface avec une rupture identifiée au passage des années 1960 à 1970 (Servat & Sakho, 1993) (Aka, et al., 1996) (Ardoin-Bardin, 2004) (Yao, et al., 2012). La baisse des ressources en eau a provoqué des contre-performances dramatiques des ouvrages dimensionnés sur la base des apports en eau antérieurs à 1970, comme à Buyo et davantage encore à Kossou sur le fleuve Bandama. La variabilité hydrologique constitue un défi pour la planification des aménagements. L’élaboration de longues séries hydrologiques couvrant la variabilité naturelle des écoulements est nécessaire pour l’analyse statistique des défaillances et le dimensionnement des ouvrages.

L’objectif de cet article est d’illustrer avec l’exemple du bassin du Sassandra comment les outils de la GIRE sont au service de la planification des ressources en eau et de la conception des aménagements. L’accent sera mis sur la préparation des données hydrologiques qui constituent le principal forçage du modèle de gestion intégré du bassin versant, en particulier la modélisation hydrologique des sous-bassins versants d’intérêt.

# Présentation du bassin du fleuve Sassandra

## Hydrographie et climat

Le bassin versant du Sassandra (Fig. 1) s’étend du nord au sud dans l’ouest ivoirien, entre les coordonnées latitude 9°45’et 4°55’nord et longitude 8°45’et 5°45’ouest. Le Sassandra prend sa source en Guinée, au sud-est de Beyla, au nord-ouest des Monts Tetini, vers 700 m d’altitude. Après un parcours de 300 km orienté ouest-est et caractérisé par une pente moyenne de 0.14% et la présence de nombreux rapides, il oblique brutalement vers le sud après avoir reçu son premier affluent important en rive gauche, le Boa.

S’écoulant plein sud sur environ 200 km, il reçoit respectivement en rive droite les affluents Bafing, qui vient de Guinée, et N’zo qui draine les régions montagneuses de Man. La pente moyenne sur ce bief est de 0.04%. Depuis la construction du barrage de Buyo, le lac de retenue ennoie la confluence du Sassandra et du N’zo et étend ses bras le long de ces deux vallées.

A l’aval de Buyo, le Sassandra coule vers le sud-est. Il reçoit en rive gauche successivement le Lobo et, quelques kilomètres avant son embouchure, le Davo. La pente s’est redressée, le lit s’encombre de nombreuses îles et plusieurs rapides se succèdent entre Soubré et l’embouchure, comme ceux de Soubré (chûtes de la Nawa), Gribo-Popoli, Bouloubré ou Louga. Le Sassandra totalise une longueur de 840 km environ et un bassin versant de 75 000 km².

Le bassin versant du Sassandra est soumis à différentes influences climatiques. Le nord du bassin délimité par la latitude 8°N est caractérisé par le régime tropical de transition avec une saison des pluies bien marquée de juin à octobre et une saison sèche de novembre à avril. La végétation y est caractéristique du domaine soudanais, dominée par la savane arbustive à la forêt claire sèche avec présence d’enclaves de forêt dense sèche. Il s’agit d’une région principalement à vocation agro-pastorale.

La région entre les latitudes 8°N et 5°45’N (au niveau de Soubré) est caractérisée par un régime équatorial de transition atténué. Une première saison des pluies est observée de mars à juin, suivie d’un ralentissement entre juillet et août et enfin d’une seconde saison des pluies de septembre à octobre. La saison sèche, entre novembre et février, est assez bien marquée. Le couvert végétal est celui du domaine guinéen avec un mix de savane et forêt plus ou moins dégradée.

Dans la région du bas-Sassandra, au sud de Soubré, domine le régime équatorial de transition caractérisé par l’alternance de deux saisons sèches (août à septembre et décembre à mars) et deux saisons humides (avril à juillet et octobre à novembre). Cette zone forestière est largement dédiée aux cultures à forte valeur ajoutée comme le cacao et le café.

Enfin, la région de Man est soumise à un régime climatique spécifique lié au relief: le régime de montagne. Il est caractérisé par une saison des pluies assez longue de mars à octobre et une courte saison sèche de novembre à février.

Pour finir, il faut souligner la présence à l’intérieur du bassin versant du fleuve Sassandra des parcs nationaux du Mont Sangbé et du Mont Péko, ainsi qu’une partie du parc national de la forêt de Tai à la lisière ouest du bas-Sassandra.

## Aménagement

L’aménagement hydroélectrique du bassin du fleuve Sassandra a commencé au début des années 1980 avec la construction du barrage-réservoir de Buyo à vocation énergétique. Il est doté d’une retenue d’un volume total de 8 milliards de m3, dont 6.5 milliards de m3de capacité utile, soit environ la moitié de l’apport brut moyen annuel. L’usine hydroélectrique située en pied de barrage est équipée de trois groupes Kaplan de puissance nominale 55 MW, soit une puissance totale installée de 165 MW. Le productible moyen annuel s’élève à 800 GWh/an.

La valorisation du potentiel hydroélectrique du fleuve Sassandra se poursuit avec la construction initiée en 2013du barrage de Soubré, au niveau des chutes de la Nawa, dans le cours inférieur du Sassandra. Il s’agit d’un aménagement au fil de l’eau doté d’une usine principale équipée de trois groupes Francis de puissance nominale 90 MW. Une mini-centrale de capacité 5.3 MW est également prévue pour valoriser le débit réservé de 50 m3/s. Lui-même dépourvu d’une capacité significative de stockage, l’aménagement de Soubré bénéficie de la régularisation saisonnière des débits du Sassandra effectuée à l’amont par le barrage-réservoir de Buyo. Le productible moyen annuel attendu à Soubré est estimé à environ 1 200 GWh/an.

Identifiés lors de l’inventaire EDF de 1979, les sites qui suscitent aujourd’hui des perspectives d’investissement sont situés en partie à l’amont de Buyo (Gao et Koulikoro sur la Bafing, Tayaboui sur le Sassandra) et en partie à l’aval de Soubré (Gribo-Popoli, Boutoubré et Louga), dans le cours inférieur du Sassandra.

Ces projets interagissent entre eux et avec les ouvrages existants et en construction. Les projets situés à l’amont de Buyo nécessitent une capacité de stockage et pourraient donc modifier la répartition saisonnière des débits entrants dans la retenue du Buyo. Il convient donc d’en analyser les conséquences sur le mode de gestion actuel du réservoir de Buyo et ses performances énergétiques. Les projets situés dans le cours inférieur du Sassandra seraient, à l’image de Soubré, des aménagements au fil de l’eau. Les apports hydrologiques à ces sites sont en partie contrôlés par les débits relâchés par Buyo et en partie dus à la contribution naturelle du bassin versant intermédiaire entre Buyo et les sites de projets.

# Données et méthodes

## Données météorologiques

Les données de pluie de d’évapotranspiration potentielle (ETP) proviennent de la base de données de la Climatic Research Unit (CRU) de l’Université d’East Anglia à Norwich (New, et al., 2000). Il s’agit des grilles de pluies et d’ETP mensuelles au pas d’un demi-degré carré pour la période 1951-2013. Leurs principales sources de données sont les agences météorologiques nationales, le National Climatic Data Center (NCDC), la World Meteorological Organisation (WMO) et d’autres sources publiées (New, et al., 2000).

Les grilles de pluie ont été obtenues par interpolation selon la longitude et la latitude (fonction Spline) d’une sélection de stations pluviométriques retenuees pour la qualité et la longueur des séries d’observation. Les grilles d’ETP ont été calculées de façon similaire sur la base de la formule de Penman-Monteith (Smith, 1992).

## Données hydrométriques

Les données hydrométriques proviennent de la Sous-Direction de l’Hydrologie, sous tutelle de la Direction de l’Hydraulique Humaine (DHH) par l’intermédiaire de la CIE. Ces données sont traitées directement par le service national ivoirien de l’hydrologie depuis la fin des années 1980 et l’étaient par l’Orstom auparavant. Les débits journaliers ont été collectés aux stations de Bafingdala (6 195 km²), Guiglo (6 983 km²), Piebli (32 462 km²), Dakpadou (6 600 km²), Loboville (12 693 km²), Sémien (29 757 km²), Soubré (62 000 km²) et Gaoulou Pont (70 550 km²).

Les données ont été agrégées au pas de temps mensuel lorsque qu’au moins 20 données journalières étaient disponibles. Ce critère a pu être assoupli certaines années pour les mois de saison sèche afin de tirer un meilleur parti des séries de données observées. Les périodes d’observation varient d’une station à l’autre.

## Données d’exploitation à Buyo

Les données d’exploitation de l’aménagement de Buyo ont été fournies par la CIE. Il s’agit pour chaque mois de la période 1981-2014 de la cote du réservoir au 1er jour du mois, du cumul de pluie observé au poste de Buyo, du volume évaporé (1998-2014 uniquement), du volume d’eau turbiné, du volume vidangé, du volume déversé, et du volume d’apports bruts.

Les volumes déversés et vidangés sont estimés grâce à des abaques donnant le volume en fonction de la cote et de l’ouverture des vannes. Le volume turbiné est obtenu par le produit de l’énergie brute produite (GWh) et d’un coefficient énergétique (m3/GWh) fourni par l’abaque reliant la puissance des groupes à la côte de retenue. Le volume évaporé est déduit de la superficie de la retenue et d’un coefficient saisonnier. Enfin, le volume d’apports bruts est déduit du bilan en eau de la retenue, soit la somme algébrique des volumes turbinés, déversés, vidangés, évaporés et de la variation du stock dans le réservoir. La variation de stock est déduite de la différence des niveaux après passage dans l’abaque reliant niveau et volume. Le calcul du bilan en eau est réalisé au pas de temps journalier puis cumulé mensuellement.

## Modèle hydrologique

Dans la mesure où la longueur des chroniques hydrologiques n’est pas suffisante pour appréhender la variabilité interannuelle des écoulements dans le bassin du Sassandra, il a été nécessaire de procéder à une reconstitution et une extension des séries hydrométriques. La disponibilité des séries de pluies (données du C.R.U) permet d’envisager une modélisation hydrologique pluie-débit. Le modèle hydrologique retenu est le modèle GR2M de l’IRSTEA (Institut de Recherche Scientifique et Technique pour l’Environnement et l’Agriculture) dans la version de Mouelhi (Mouelhi, 2006). Il s’agit d’un modèle conceptuel à deux réservoirs et deux paramètres au pas de temps mensuel. Le modèle n’est pas détaillé dans cet article, mais sa structure associe un réservoir de production, un réservoir de routage ainsi qu’une ouverture sur l’extérieur autre que le milieu atmosphérique (Perrin, 2007). Les paramètres du modèle sont obtenus après optimisation d’un critère de qualité des débits simulés. Le critère retenu est le critère de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970) qui est défini par:

Avec le débit estimé, le débit observé, i le mois considéré, la moyenne des débits observés sur l’ensemble de la période d’observation. Plus le critère de Nash est proche de 100, plus les débits estimés sont proches des débits observés.

Le contrôle des performances du modèle hydrologique est réalisé à chaque bassin grâce à une procédure de calage-contrôle suivant le principe du *differential* *split-sample test* (Klemes, 1986). La période d’observation des débits est scindée en deux sous-périodes constituées chacune d’au moins cinq années consécutives. Le calage des paramètres est réalisé sur la première sous-période et le contrôle des performances sur la deuxième sous-période. Puis, les rôles des sous-périodes sont inversés et le critère de Nash est obtenu par la moyenne des critères de Nash calculés successivement sur les deux sous-périodes.

Le modèle GR2M a déjà montré des performances satisfaisantes dans le bassin du Sassandra (Ardoin-Bardin, 2004) (Ardoin-Bardin, 2009) (Yao, et al., 2012).

## Modèle intégré du bassin versant

Le logiciel retenu est MIKE HYDRO Basin du Danish Hydraulic Institute (DHI). Il fournit une représentation mathématique simplifiée du bassin versant (rivières, réservoirs et usages de l’eau) sous forme de branches et de nœuds. Lors d’une simulation, il réalise le bilan en eau à chaque nœud du système et à chaque pas de temps compte-tenu des forçages hydrologiques et des spécifications des aménagements et des usages de l’eau.

La construction du modèle intégré du bassin versant du Sassandra (Fig. 2) est réalisée en introduisant sur le réseau hydrographique, puis en paramétrant les aménagements existants (Buyo), en construction (Soubré) et en projet (Gao, Koulikoro, Tayaboui, Gribo-Popoli, Boutoubré et Louga). Les paramètres concernent le réservoir (courbes hauteur-superficie-volume), l’usine hydroélectrique (débit d’équipement, capacité installée, niveau de prise d’eau usinière, rendement des machines, pertes de charges, relation débit hauteur de la restitution) ainsi que l’ensemble des consignes de gestion qui régissent le fonctionnement de l’aménagement, telles que la cote de retenue normale, le niveau minimum d’exploitation ou le débit réservé.

La construction du modèle fait apparaître les sous-bassins versants pour lesquels il est nécessaire d’introduire la série mensuelle des débits. A l’exception de Gao, il s’agit des Bassins Versants Intermédiaires (BVI) entre deux aménagements successifs, par exemple, le bassin versant entre Buyo et Soubré, qui est constitué en grande partie par le bassin versant de l’affluent Lobo.

# Résultats

## Variabilité des pluies et évolution des débits

La pluviométrie des sous-bassins versants du Sassandra est déduite des grilles de précipitations mensuelles du CRU par intersection du tracé du bassin versant et des mailles des grilles. La variabilité de la pluviométrie annuelle des bassins est analysée grâce à une variable centrée réduite lissée sur 5 ans:

Avec Pi la pluie annuelle, i l’année considérée, Pmoy la pluviométrie moyenne calculée sur l’ensemble de la période 1951-2013 et *s* l’écart-type.

Les pluies varient de manière très importante dans le bassin du Sassandra sur la période 1951-2013 (Fig. 3). L’évolution de la pluviométrie diffère sensiblement d’un sous-bassin à l’autre, mais tous ont un commun une période de fort déficit entre les années 1970 et la fin des années 1990. Cette sécheresse a touché l’ensemble de l’Afrique de l’Ouest soudano-guinéenne et a été largement documentée dans le bassin du Sassandra (Servat & Sakho, 1993) (Aka, et al., 1996) (Ardoin-Bardin, 2004) (Yao, et al., 2012). Une reprise de la pluviométrie semble avoir lieu depuis les années 2000. Cependant cette reprise ne permet pas de retrouver la pluviométrie préalable à la sécheresse et devra être confirmée par les observations des années à venir.

L’évolution des débits dans le bassin versant du Sassandra est analysée de façon similaire (Fig. 4). L’analyse porte sur les périodes d’observation de débits disponibles. Sur l’ensemble des sous-bassins versants jaugés, les débits diminuent drastiquement au passage des années 1960 à 1970. A l’exception du Davo, le sous-bassin le plus méridional, les déficits en écoulement sont maximaux au cours des années 1971 à 1977 et 1982 à 1993.

## Calcul des apports nets à Buyo

Les apports bruts à Buyo sur la période 1981-2014 sont donnés par les données d’exploitations transmises par la CIE. Par construction, ces apports bruts incluent les apports de rivière et les précipitations directes sur le lac de retenue. La connaissance des cumuls mensuels de pluie à Buyo permet de déduire de la série mensuelle des apports bruts la série mensuelle des apports nets par simple soustraction du volume mensuel de pluie tombé sur le lac de retenue.

La qualité de ces données est jugée médiocre. En effet, le processus de calcul qui permet d’établir ces données est parsemé d’incertitudes de mesure et d’hypothèses qui se répercutent à travers l’ensemble du calcul. Ainsi, il n’est pas rare pour les mois de saison sèche de faire apparaître par le calcul des apports nets négatifs. Ces biais peuvent être corrigés sans incidences significatives sur le bilan en eau du réservoir de Buyo. Les principaux termes du bilan en eau du réservoir de Buyo sont donnés dans le Tableau 1.

## Extension des séries de débits par modélisation hydrologique

Le modèle hydrologique GR2M est utilisé pour reconstituer les débits mensuels aux stations hydrométriques sur les périodes où les données d’observation sont manquantes.

Les résultats du contrôle des performances du modèle GR2M pour chaque sous-bassin versant sont donnés dans le Tableau 2 . Le critère de Nash en contrôle est très élevé pour les bassins du Bafing à Bafingdala et du Sassandra à Semien, respectivement 83.1 et 84.6. Il est bon à Guiglo (75.8), mais se dégrade sur les bassins du Lobo à Loboville et du Davo à Dakpadou, respectivement égal à 45.3 et 57.2. Cette dégradation pourrait s’expliquer d’une part par la période d’observation des débits plus faible sur le bassin de la Lobo, seulement 9 années complètes, d’autre part par la plus grande difficulté du modèle sur les bassins dont le régime hydrologique saisonnier présente deux maxima.

La série des débits retenue pour le calage du bassin versant du Sassandra à Buyo est celle des apports nets établie précedemment sur la période 1981-2014 grâce aux données d’exploitation. En dépit des réserves concernant la qualité de ces données, le critère de Nash est élevé, égal à 82.1.

L’application du modèle hydrologique GR2M aux différents sous-bassins versants jaugés du Sassandra permet la reconsitution et l’extension des séries mensuelles complètes des débits sur la période 1954-2013. Les principales caractéristiques hydrologiques de ces bassins sont données dans le Tableau 3.

Les sous-bassins présentant les lames d’eau écoulées annuelles les plus élevées sont le N’zo à Guiglo et le Bafing à Bafingdala avec respectivement 360 mm et 327 mm. Le Sassandra à Semien atteint 230 mm. Les affluents Lobo et Dakpadou présentent des lames d’eau plus faibles, respectivement 97 mm et 177 mm. Ceci s’explique par une pluviométrie plus faible et par le régime pluviométrique équatorial de transition qui domine ces sous-bassins. La répartition saisonnière des pluies en deux saisons des pluies y est moins favorable pour la génération du ruissellement que dans le régime tropical à une seule saison des pluies.

## Estimation des séries de débits des bassins versants d’intérêt

**Méthode de transposition**

Les sous-bassins versants du modèle de gestion intégrée sont des bassins versants non jaugés. Les contraintes opérationnelles en bureau d’étude ne permettent pas de mettre en place des méthodes complexes de régionalisation. Appliquée avec une station hydrométrique de référence choisie avec attention, la méthode de transposition des débits par ratio de la pluviométrie et de la superficie des bassins versants montre en général des résultats satisfaisants.

La justesse de la méthode de transposition dans le bassin du Sassandra est testée. Pour cela les débits observés du Sassandra à Piebli sont comparés aux débits estimés au même endroit par application de la méthode de transposition avec la station de Semien comme station de référence. Les résultats sont donnés dans le Tableau 4 . La pertinence de ce test est limitée par la faible disponibilité des données d’observation à la station de Piebli: de mai 1981 à décembre 1982 et l’année 1985.

Les débits estimés à Piebli sont très similaires aux débits observés (Fig.5a et 5b). La lame d’eau cumulée sur la période d’observation vaut respectivement 5 089 mm et 5 066 mm. Le critère de Nash vaut 99.7.

**Estimation des séries de débits**

La série mensuelle des débits sur la période 1954-2013 est établie pour chaque sous-bassin versant du modèle de gestion intégrée. Le mode de calcul de ces séries est détaillé dans le Tableau 5.

La méthode de transposition est utilisée en cherchant le bassin versant de la station hydrométrique de référence le plus similaire du point du vue hydrologique au sous-bassin versant étudié. La station de Bafingdala sur le Bafing sert de référence à la transposition des débits à Gao et Koulikoro situés aussi sur le Bafing. La station de Semien sert de référence à la transposition des débits à Tayaboui situé environ 50 kilomètres à l’aval. La station de Guiglo sur le N’zo est utilisée comme référence pour le sous-bassin versant intermédiaire entre Tayaboui et Buyo. Le bassin versant du N’zo à Guiglo constitue la plus grande partie de ce sous-bassin, puisqu’il couvre 6 983 km² sur un total de 11 653 km², soit 60%. La station de Loboville sur le Lobo est utilisée comme référence pour le sous-bassin versant intermédiaire entre Buyo et Soubré. Le bassin versant du Lobo à Loboville constitue la plus grande partie de ce sous-bassin, puisqu’il couvre 12 693 km² sur un total de 15 750 km², soit 81%. Enfin, la station hydrométrique du Davo à Dakpadou est retenue pour l’estimation des apports des sous-bassins versants entre Soubré et Louga. Ce bief est en effet soumis à un climat équatorial de transition que l’on retrouve sur le bassin versant du Davo.

Les principaux résultats de l’estimation des apports hydrologiques aux différents sous-bassins versants sont donnés dans le Tableau 6. La lame d’eau écoulée moyenne annuelle présente une forte variabilité spatiale. Elle est maximale (257 à 339 mm/an) au centre ouest du bassin du Sassandra, c’est-à-dire la région la plus arrosée et où les conditions sont les plus favorables au ruissellement. A l’inverse, la contribution de la partie centre orientale du bassin, en particulier de l’affluent Lobo, est assez modeste. La lame d’écoulée y est en moyenne de moins de 100 mm/an. Enfin, dans le cours inférieur du Sassandra à l’aval de Soubré, la lame d’eau écoulée est estimée à environ 200 mm. Dans cette région forestière, le cumul annuel de pluie est élevé, mais le coefficient de ruissellement est inférieur à celui que l’on trouve plus au nord.

Un contrôle des résultats de l’estimation des apports hydrologiques aux sous-bassins versants est réalisé. Pour cela, la série obtenue par la somme des apports des sous-bassins à l’amont de Buyo est comparée à la série des apports hydrologiques à Buyo obtenue par modélisation hydrologique du bassin versant total du Sassandra à Buyo (1954-1980) et bilan en eau du réservoir (1981-2014). Cette série elle-même issue d’un calcul hydrologique ne peut pas être considérée comme représentative des débits réels du Sassandra à Buyo. Cependant, la comparaison permet d’éprouver l’homogénéité de deux séries obtenues de façon indépendante (Fig. 6a et 6b). Calculée sur la période 1954-2013, la lame d’eau écoulée vaut respectivement 255 mm et 246 mm, soit une différence inférieure à 4%.

De façon similaire, la série obtenue par la somme des apports des sous-bassins à l’amont de Soubré est comparée à la série des débits observés à la station hydrométrique de Soubré (Fig. 7a et 7b). Comme les débits observés à Soubré sont régularisés depuis la mise en service de Buyo au début des années 1980, la comparaison est limitée à la période 1954-1979. Calculée sur la période 1954-1979, la lame d’eau écoulée vaut respectivement 242 mm et 260 mm, soit une différence inférieure à 7%. Le critère de Nash vaut 89.9.

L’analyse des différences entre les deux séries montre que les plus gros biais sont observés pour le mois d’octobre. Par rapport aux débits observés, les débits obtenus en sommant les débits des sous-bassins à l’amont de Soubré sous-estiment en moyenne les débits du mois d’octobre de 24%. Ce sont les bassins soumis au régime pluviométrique équatorial de transition qui présentent un maximum de débit en octobre. L’important biais observé au mois d’octobre pourrait donc s’expliquer en partie par une sous-estimation des apports du bassin versant intermédiaire entre Buyo et Soubré. En effet, ces apports sont déduits de la série des débits du Lobo à Loboville. Or la disponibilité des débits observés à cette station est faible (1998-2007) et la modélisation hydrologique de ce sous-bassin a posé des difficultés (période de calage réduite, score de Nash le plus faible des bassins étudiés).

## Discussion et conclusion

Le modèle intégré du fonctionnement hydraulique du bassin du Sassandra est forcé par les séries mensuelles des débits 1954-2013 établies pour l’ensemble des sous-bassins versants.

La simulation du fonctionnement de l’aménagement Buyo est requise pour reproduire sur l’ensemble de la période de simulation la régularisation des débits du Sassandra à l’aval de Buyo. La reproduction parfaitement fidèle du fonctionnement de Buyo est impossible à atteindre. En effet, les règles d’opération paramétrées dans le modèle relèvent d’un niveau de gestion stratégique. Ces règles suivent la même logique chaque année de la période de simulation :

1. satisfaire la demande en énergie tant que le niveau d’eau dans le réservoir se maintient au-dessus du niveau minimum d’exploitation ;

2. les excès d’eau (lorsque les apports totaux sont supérieurs à la demande en eau à turbiner) sont stockés dans le réservoir jusqu’à ce que le niveau d’eau atteigne la cote de retenue normale. Au-delà, les excès d’eau sont turbinés dans la limite du débit d’équipement de l’usine hydroélectrique, puis déversés.

Or la gestion réelle de l’aménagement de Buyo relève de la gestion opérationnelle qui est réalisée en intégrant des prévisions hydrologiques, des contraintes de production d’énergie (fournir l’énergie que le marché demande) et des contraintes liées à l’utilisation de l’outil de production telles que la maintenance, l’usure des machines.

Les règles de gestion paramétrées à Buyo permettent cependant de reproduire fidèlement le fonctionnement saisonnier réel du réservoir de Buyo tel qu’il peut être observé à travers les données d’exploitation depuis 1981 (Fig. 8).

Le modèle intégré de fonctionnement hydraulique permet de simuler le bassin versant du Sassandra sur la période 1954-2013 pour une infinité de configurations d’aménagement. La situation de référence est décrite par la simulation incluant uniquement l’ouvrage de Buyo.

Le modèle intégré du Sassandra constitue donc un outil utile à la planification de l’aménagement du bassin versant et à la conception des ouvrages en projet. Il permet en particulier d’analyser comment les ouvrages interagissent entre eux et de quantifier leurs impacts cumulatifs.

Par exemple, l’utilisation du modèle permet de programmer le planning du remplissage du réservoir de Tayaboui, à l’amont de Buyo, de façon à ne pas impacter négativement les apports hydrologiques donc le productible à Buyo. De la même façon, l’exploitation du modèle montre qu’en moyenne, le productible garanti à Buyo pourrait être augmenté jusqu’à 20% avec la mise en service de l’aménagement de Tayaboui. Cette augmentation résulte de la régularisation saisonnière des débits du Sassandra opérée par le réservoir de Tayaboui. L’augmentation de la distribution saisonnière des apports à Buyo qui en résulte permet une opération optimisée avec une hauteur moyenne de chute disponible plus élevée et la diminution des volumes déversés.

Le modèle permet également d’analyser sur une longue période les bénéfices liés à la régularisation des débits du Sassandra à l’aval de Buyo, en particulier sur le productible des ouvrages du cours inférieur : Soubré, Gribo-Popoli, Bouloubré et Louga.

Enfin, le modèle peut être utilisé à des fins de conception des aménagements. Chaque aménagement peut être configuré selon une infinité de variantes. Ces variantes portent par exemple sur la cote de retenue normale, le niveau minimum d’exploitation, le débit d’équipement de l’usine hydroélectrique, ou encore sur les règles de gestion (débit réservé). La comparaison des résultats de simulation des différentes variantes permet d’analyser de façon intégrée et systématique les bénéfices et impacts de tels ou tels choix de conception.

**Conclusion**

Cette étude a montré comment les outils de la gestion intégrée des ressources en eau étaient au service de la planification et de la conception des aménagements dans le bassin du fleuve Sassandra. La pertinence du modèle intégré du fonctionnement hydraulique du bassin repose sur l’élaboration de longues séries d’apports hydrologiques homogènes. Pour pallier l’absence de données, des moyens qui peuvent paraître audacieux ont été utilisés (grille de précipitations mensuelles du CRU, modélisation hydrologique de sous-bassins versants peu jaugés, méthode de transposition des lames d’eau écoulées). Adaptés au contexte opérationnel, ces moyens nécessitent la plus grande vigilance vis-vis du contrôle des résultats.

Cette concession sur la rigueur absolue est justifiée par les avantages qui sont tirés du modèle de gestion intégrée en termes de planification et de conception. L’utilisation du modèle permet une analyse multicritères (énergétiques, socio-économiques et environnementaux) d’un nombre illimité de variantes d’aménagements dans un environnement de travail évolutif et pouvant servir de support didactique et de communication auprès des décideurs.

# Remerciements

Les auteurs remercient la Compagnie Ivoirienne d’Electricité (CIE) et la Sous-Direction de l’Hydrologie pour la mise à disposition des données hydrométriques et des données d’exploitation de l’aménagement hydroélectrique de Buyo.

# Références

Aka, A. et al., 1996. Analyse statistique de l'évolution des écoulements en Côte d'Ivoire. *L'hydrologie tropicale: géoscience et outil pour le développement* (Actes de la conférence de Paris, mai 1995). IAHS Publ. no. 238, 238.

Ardoin-Bardin S., 2004. Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse, USTL-UM II, Montpellier, France.

Ardoin-Bardin S., Dezetter A., Servat E., Paturel J.E., Mahé G., Niel H., Dieulin C, 2009. Using general circulation model outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 54, 77-89.

Klemes, V., 1986. Operational testing of hydrologic simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31, 13-24.

Mouelhi, S., 2006. Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318, 200-214.

Nash & Sutcliffe, 1970. River flow forecasting trough conceptual models. Part 1 - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 27 (3), 282-290.

New, M., Hulme, G. & Jones, P., 2000. Representing 20th century space-time climate variability. II: Development of 1901-1996 monthly terrestrial climate fields. *Journal of Climate*, 13, 2217-2238.

Perrin, C., 2007. Les modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). Rapport technique

Servat, E. & 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. *Hydrology of Warm Humid Regions*, 216.

Smith, M., 1992. Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. Report, Land and Water Development Division, UN FAO, Rome, Italy.

Yao, A. et al., 2012. Analyse de la variabilité climatique et quantification des ressources en eau en zone tropicale humide : cas du bassin versant de la Lobo au centre-ouest de la Côte d'Ivoire. *Rev. Ivoir. Sci. Technol*, 19, 136-157.

Tableau 1 : Bilan en eau du réservoir de Buyo calculé sur la période 1981-2014

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Bilan en eau réservoir de Buyo | Volume turbiné | Volume vidangé et déversé | Volume évaporé | Apports bruts | Pluie directe | Apports nets |
| Moyenne annuelle sur la période 1981-2014, (millions de m3) | 9 545 | 1 106 | 931 | 11 621 | 955 | 10 631 |

Tableau 2 : Calage-contrôle du modèle hydrologique GR2M aux sous-bassins versants jaugés : paramètres, période de calage-contrôle et critère de Nash

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Bassin | Station | Période d'observation des débits | Période calage | Paramètre X1 | Paramètre X2 | Nash Calage | Période contrôle | Nash contrôle |
| Bafing | Bafingdala | 01/1961-12/2001 | 01/1962-12/1981 | 7.493 | 0.624 | 84.1 | 01/1982-12/2001 | 82.9 |
| 01/1982-12/2001 | 7.496 | 0.645 | 83.6 | 01/1962-12/1981 | 83.2 |
|  | | | | | **83.1** |
| Sassandra | Semien | 01/1954-12/1999 | 01/1955-12/1977 | 7.086 | 0.648 | 84.4 | 01/1978-12/1999 | 87.1 |
| 01/1978-12/1999 | 6.835 | 0.604 | 89.8 | 01/1955-12/1977 | 82.0 |
|  | | | |  | **84.6** |
| N'zo | Guiglo | 01/1958-12/1980 | 01/1959-12/1968 | 6.877 | 0.690 | 83.3 | 01/1969-12/1980 | 71.2 |
| 01/1969-12/1980 | 6.666 | 0.632 | 75.0 | 01/1959-12/1968 | 80.3 |
|  | | | | | **75.8** |
| Sassandra | Barrage Buyo | - | 01/1982-12/1997 | 6.971 | 0.585 | 87.7 | 01/1998-12/2013 | 79.7 |
| 01/1998-12/2013 | 6.974 | 0.625 | 82.5 | 01/1982-12/1997 | 84.4 |
|  | | | | | **82.1** |
| Lobo | Loboville | 01/1998-12/2007 | 01/1999-12/2003 | 7.888 | 0.439 | 54.9 | 01/2004-12/2007 | 39.0 |
| 01/2004-12/2007 | 8.491 | 0.443 | 44.5 | 01/1999-12/2003 | 51.5 |
|  | | | | | **45.3** |
| Davo | Dakpadou | 01/1969-12/2005 | 01/1970-12/1987 | 6.604 | 0.579 | 73.4 | 01/1988-12/2004 | 45.7 |
| 01/1988-12/2004 | 7.414 | 0.602 | 48.8 | 01/1970-12/1987 | 68.7 |
|  | | | | | **57.2** |

Tableau 3 : Principales caractéristiques hydrologiques des sous-bassins jaugés sur la période 1954-2013

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Bassin | Station | Superficie (km²) | Pluviométrie moyenne annuelle (mm) | Lame d’eau écoulée annuelle (mm) | Coefficient de ruissellement (%) |
| Bafing | Bafingdala | 6 195 | 1 785 | 327 | 18% |
| Sassandra | Semien | 29 757 | 1 590 | 230 | 14% |
| N'zo | Guiglo | 6 983 | 1 773 | 360 | 20% |
| Lobo | Loboville | 12 693 | 1 469 | 97 | 7% |
| Davo | Dakpadou | 6 600 | 1 466 | 177 | 12% |

Tableau 4 : Résultats du test de la méthode de transposition des débits entre les stations hydrométriques de Semien et Piebli

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Bassin | Station | Superficie (km²) | Pluviométrie moyenne annuelle (mm) | Lame d’eau écoulée – cumul sur la période d’observation (mm) | Nash |
| Sassandra | Semien | 29 757 | 1 590 | 5 154 | - |
| Sassandra | Piebli (observé) | 32 462 | 1 570 | 5 066 | - |
| Sassandra | Piebli (estimé) | 32 462 | 1 570 | 5 089 | 99.7 |

Tableau 5 : Mode de calcul pour l’estimation des séries mensuelles des débits aux sous-bassins versants du modèle de gestion intégrée du bassin du Sassandra

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Sous-bassin versant | Superficie (km²) | Pluviométrie moyenne annuelle (mm) | Mode de calcul | Station hydrométrique de référence |
| Gao | 8 067 | 1 709 | Méthode de transposition | Bafingdala |
| BVI Gao Koulikoro | 758 | 1 395 | Méthode de transposition pour les apports à Koulikoro, puis différence entre les apports à Koulikoro et les apports à Gao | Bafingdala |
| BVI Koulikoro Tayaboui | 25 775 | 1 510 | Méthode de transposition pour les apports à Tayaboui, puis différence entre les apports à Tayaboui et les apports à Koulikoro | Semien |
| BVI Tayaboui Buyo | 11 653 | 1 651 | Méthode de transposition | Guiglo |
| BVI Buyo Soubré | 15 750 | 1 475 | Méthode de transposition | Loboville |
| BVI Soubré Gribo-Popoli | 743 | 1 576 | Méthode de transposition | Dakpadou |
| BVI Gribo-Popoli Boutoubré | 3 167 | 1 583 | Méthode de transposition | Dakpadou |
| BVI Boutoubré Louga | 1 972 | 1 641 | Méthode de transposition | Dakpadou |

Tableau 6 : Principales caractéristiques hydrologiques des sous-bassins du modèle de gestion intégrée sur la période 1954-2013

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Sous-bassin versant | Superficie (km²) | Pluviométrie moyenne annuelle (mm) | Lame d’eau écoulée annuelle (mm) | Volume moyen annuel d’apports (millions de m3) | Coefficient de ruissellement (%) |
| Gao | 8 067 | 1 709 | 314 | 2 536 | 18% |
| BVI Gao Koulikoro | 758 | 1 395 | 257 | 195 | 18% |
| BVI Koulikoro Tayaboui | 25 775 | 1 510 | 199 | 5 125 | 13% |
| BVI Tayaboui Buyo | 11 653 | 1 651 | 339 | 3 953 | 21% |
| BVI Buyo Soubré | 15 750 | 1 475 | 97 | 1 537 | 7% |
| BVI Soubré Gribo-Popoli | 743 | 1 576 | 190 | 142 | 12% |
| BVI Gribo-Popoli Boutoubré | 3 167 | 1 583 | 191 | 606 | 12% |
| BVI Boutoubré Louga | 1 972 | 1 641 | 198 | 391 | 12% |

\*BVI : Bassin Versant Intermédiaire

Fig. 1 Bassin versant du Sassandra et principales caractéristiques hydrologiques des sous-bassins versants jaugés, calculées sur la période 1954-2013.

Fig. 2 Représentation du modèle intégré du bassin du Sassandra.

Fig. 3 Evolution de la pluviométrie annuelle sur le bassin du Sassandra.

Fig. 4 Evolution des débits moyens annuels sur le bassin du Sassandra.

Fig. 5 (a) Débits moyens mensuels du Sassandra à la station de Piebli graphique débit-débit (b) Débits moyens mensuels du Sassandra à la station de Piebli graphique des débits en fonction du temps.

Fig. 6 (a) Débits moyens mensuels du Sassandra à Buyo graphique débit-débit (b) Débits moyens mensuels du Sassandra à Buyo graphique des débits en fonction du temps.

Fig. 7(a) Débits moyens mensuels du Sassandra à Soubré graphique débit-débit (b) Débits moyens mensuels du Sassandra à Soubré graphique des débits en fonction du temps.

Fig. 8 Moyennes saisonnières des niveaux du réservoir, des débits turbinés et des débits sortants à Buyo comparaison entre les données historiques d’exploitation et les résultats de la simulation sur la période 1981-2013.