

# PREDETERMINATION DES DEBITS DE CRUE PAR UN MODELE HYDROLOGIQUE : CAS BASSIN DU FLEUVE NIGER A KOULIKORO

## PREDETERMINATION OF FLOOD FLOWS USING A HYDROLOGICAL MODEL: CASE OF THE NIGER RIVER BASIN AT KOULIKORO

KADAOUYE DAMBA<sup>1</sup>, LASSINA SOUMANO<sup>2</sup>, SOUMAILA A. KONE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ecole Nationale d'Ingénieurs Abderrahmane Baba TOURE (ENI-ABT)

<sup>2</sup>Institut Polytechnique de Katibougou (IPR/ISFRA). MALI

### Résumé

Pour une connaissance des ressources en eau du fleuve Niger à Koulikoro, une longue série de mesure de débits est nécessaire à analyser. La propagation de l'onde des crues du bassin du fleuve Niger à Koulikoro (station hydrométrique) appelée station de référence du Bassin du Fleuve Niger d'une superficie de 120000 km<sup>2</sup> jusqu'à l'embouchure peut être un outil d'aide de décision de l'atteinte des cotes d'admission des offices de développement agricole en période de décrue. Pour évaluer les ressources-en eau de ce sous-bassin –versant, nous allons traiter les débits Observés et les hauteurs d'eau enregistrées à la station hydrométrique de Koulikoro, Sélingue et Banankoro par des méthodes statistiques sur une période d'observation de 2014 à 2017, qui s'ajustent au mieux aux séries chronologiques. A partir des droites d'ajustement, on calcule ou détermine des débits probables pour la journée en aval. Pour atteindre notre objectif qui est l'atteinte des cotes d'admission des offices agricoles et le barrage de Markala, on vérifie la corrélation Débit- Hauteur par la méthode de la corrélation linéaire. La méthode a montré l'existence d'une relation linéaire simple avec des coefficients de corrélation respectivement de 0,97 à 0,99. les formules utilisées pour prédire les ondes de propagation ont abouti à des résultats identiques à celles mesurés au niveau de la station hydrométrique de Koulikoro. La propagation des débits à la station de référence de Koulikoro n'est pas ni dans les mêmes proportions en période des basses et en période des hautes eaux. Ces phénomènes de rétention saisonnière qui ont évalué l'influence du barrage-réservoir de Sélingue.

**Mots clés :** Débits, cotes d'admission, corrélation, fleuve Niger, Koulikoro, Mali.

### Abstract

For an understanding of the water resources of the Niger river at Koulikoro, a long series of flow measurements is necessary to analyze. The propagation of the flood wave from the Niger River basin to Koulikoro (hydrometric station) called the Niger River Basin reference station with an area of 120,000 km<sup>2</sup> up to the mouth can be a decision support tool for the attainment of the admission ratings of agricultural development offices during periods of recession. To evaluate the water-resources of this sub-watershed, we will process the Observed flows and the water heights recorded at the hydrometric station of Koulikoro, Sélingue and Banankoro by statistical methods over an observation period from 2014 to 2017, which best fit the time series. From the adjustment lines, we calculate or determine the probable flows for the downstream day. To achieve our goal of reaching the admission ratings of the agricultural offices and the Markala dam, we verify the Flow-Height correlation by the linear correlation method. The method showed the existence of a simple linear relationship with correlation coefficients of 0.97 to 0.99, respectively. the formulas used to predict propagation waves produced results identical to those measured at the Koulikoro hydrometric station. The propagation of flows at the Koulikoro reference station is not in the same proportions during low and high water periods. These seasonal retention phenomena which assessed the influence of the Sélingue dam-reservoir.

**Keywords:** Flow rates, admission ratings, correlation, Niger river, Koulikoro, Mali.

## 1. Introduction :

Le bassin versant du Sankarani comprenant le système hydraulique du Lac de Sélingué d'une capacité de plus deux milliards de mètre cube, constitue une importante ressource en eau. Cette ressource assure d'une part la production d'électricité de quelques grandes villes du Mali. Elle permet d'autre part l'irrigation de vastes périmètres agricoles qui sont en constante augmentation du fait du développement de la riziculture. Cette production irriguée est à l'origine du développement d'activités économiques de transports, transformations et commerce qui font l'essor des périmètres irrigués de Baguineda, de l'office riz de Ségou, l'office du Niger.

Ces exploitations multiformes des ressources en eau du bassin du fleuve Niger entraînent, un déséquilibre au niveau de la satisfaction des besoins en eau. Les événements extrêmes enregistrés en 1970, 1974-1984, 1996, 2017 et la grande variabilité climatique sur le fleuve Niger ont des impacts directs sur les ressources en eau, parfois entre les parties en amont et en aval du bassin. De nombreuses recherches sont consacrées à la propagation de l'onde des crues dans le temps et dans l'espace. Les écoulements dus aux hauteurs d'eau lus sont loin d'être maîtrisés alors que la maîtrise des débits d'écoulement est nécessaire pour caractériser la propagation de l'onde des crues vers l'aval immédiat du bassin-versant considéré.

D'après les études menées sur le bief Koulikoro-Ké-Macina : Koulikoro-Kirango (200 km) et Kirango- Ké-Macina (200 km) différents facteurs influencent le régime du Niger alors que les apports pluviométriques locaux se font sur la section de Koulikoro-Kirango pour un bassin intermédiaire de 1700 km<sup>2</sup> où s'effectuent les prélèvements de l'office du Niger. Certaines études ont démontrées que les prélèvements représentent en moyenne 10% des apports d'eau à Koulikoro et qu'en période d'étiage jusqu'à 80% (Zwarts et al ; en 2005). Les débits observés à Koulikoro ont un impact très important sur toutes les activités agricoles de contre saison à cause de sa situation géographique entre le barrage-réservoir et les périmètres irrigués.

La présente recherche se propose d'évaluer les ressources en eau du fleuve Niger à Koulikoro en utilisant un outil hydrologique dans le contexte de satisfaction des besoins en eau des usagers en aval suscite les objectifs suivant : 1) démontrer les variations des débits observés pour la période d'étude dans le temps ; 2) étudier les débits observés sur les stations hydrométriques dans le bassin versant considéré ; 3) calculer le débit journalier prévisionnel pour les stations hydrométriques en aval et le débit journalier à turbiner à Sélingué.

L'objectif de cette étape est d'appréhender l'application de la méthode de régression linéaire au bassin du fleuve Niger à Koulikoro en comparant les résultats des calculs à ceux observés.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1 Présentation de la zone d'étude.

Le bassin-versant du fleuve Niger à Koulikoro a une superficie de 120 000 km<sup>2</sup>, il fait partie du grand Bassin du fleuve Niger long de 4180 km. Il est entre la latitude 12° 52' 00'' N et la longitude 07° 33' 00'' W. Le bassin du fleuve Niger à Koulikoro est situé dans une zone de transition à nuance soudano-sahélien entre les isohyètes 700 et 500 mm. Le climat est caractérisé par une longue saison sèche et une saison de pluie de trois à quatre mois (juin-

juillet à août-septembre). Il a d'innombrables surfaces sableuses, d'importants plans d'eau et des vallées inondables.

### La position géographique

Koulikoro, dans le bassin du Niger supérieur, est soumis à un climat tropical de type guinéen avec un pic de crue vers septembre,

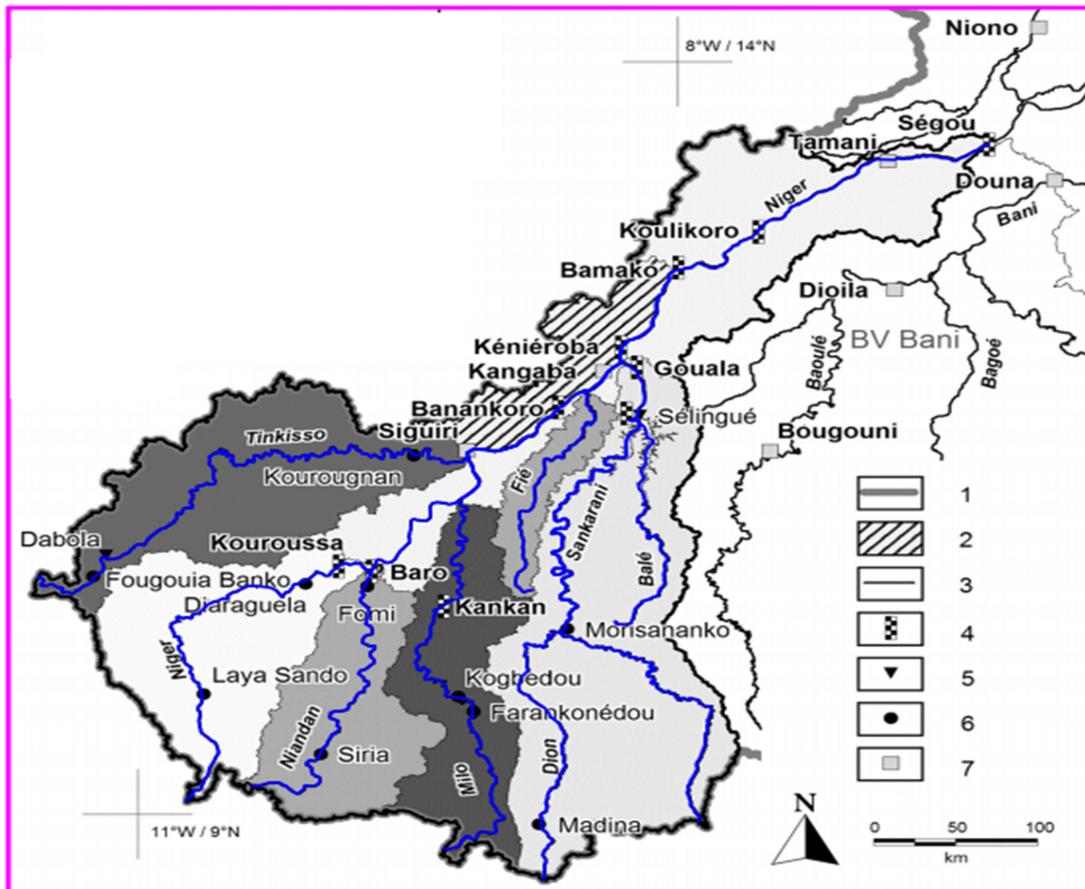


Figure 1 : Le bassin versant du Niger supérieur en amont de Ségou : les principaux sous-bassins et les stations hydrométriques du Niger supérieur guinéen et malien.  
Source : projet GIRENS au MALI

Actuellement, la seule structure importante de contrôle hydraulique située sur le cours supérieur du fleuve est le barrage de Sélingué sur le Sankarani, un affluent du fleuve Niger. Le lac de barrage a une capacité de 2 milliards de m<sup>3</sup> et permet de produire de l'énergie hydroélectrique, de soutenir la production rizicole, et d'améliorer la navigation en aval de Koulikoro. Il faudra aussi rappeler la présence dans le bassin du barrage de Sélingué sur l'affluent Sankarani au Mali (2×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> de retenue), est utilisé prioritairement pour la production hydroélectrique. et on peut admettre qu'il ne modifie que le régime intra-annuel alors que l'on s'intéresse au régime interannuel, donc son influence négligeable.

Les observations hydrologiques faites au niveau de la station de Koulikoro et les stations de Sélingué aval, de Banankoro et de Kirango permettent d'étudier la propagation des débits en aval. Ainsi les débits observés à Koulikoro entre 2014-2017 sont analysés pour évaluer les débits propagés en aval car la zone Office du Niger avec plus 85 000 ha (ABN et BRLi, 2007)

a un impact sur les écoulements du fleuve Niger et il est recommandé de garantir un débit minimum environnemental de 40 m<sup>3</sup>/s à l'aval du barrage de Markala.

## 2.2 Collecte des données

Pour mener notre étude sur la prévision des crues journalières probables à Koulikoro, nous avons fait la :

*Constitution des séries de données hydrométriques*: le protocole adopté est le suivant :

- a) Choix des stations suivant la longueur de la série, absence de lacunes ;
- b) Analyse de la variabilité interannuelle à l'aide des graphiques ;
- c) Constitution des séries de données de débits journaliers observés : à ce niveau, nous avons fait l'inventaire des données disponibles, leur critique.

*Modélisation* : elle comporte les suivants :

Préparation et transfert des données vers les méthodes de calculs ;

- a) Le choix du jeu de paramètres optimaux pour la propagation de l'onde de crues vers l'aval ;
- b) La simulation va consister à déterminer à l'aide du modèle calé les débits journaliers prévisionnels.

*Calcul de débit journalier à turbiner* : les résultats des simulations ci-dessus évoquées vont nous permettre de faire le calcul de débits journalier à lâcher pour satisfaire les besoins des usagers en aval en année moyenne ou sèche.

Nous avons retenu quatre stations dans le sous-bassin pour l'étude.

## 2.3 Méthode de calcul

Après la constitution de la base des données disponibles sur les stations hydrométriques, nous avons les débits prévisionnel par la régression linéaire et on fait intervenir d'abord les informations sur le débit entrant (amont) prise à l'instant (t) étant en gros le temps de propagation le long du tronçon, on peut écrire la formule suivante :

$$Q(t) = a Q(t-1) + b Q(t-1) + c ;$$

Avec :

Q(t) – le débit calculé à la station aval où l'on fait la prévision ;

a, b ; c sont les coefficients de régression qui seront prédéterminés à partir de l'étude des crues observées antérieures (1983-2014) pour cerner les corrélations entre les variables hydrologiques.

Ainsi, les données observées sont :

- représenter graphiquement pour analyser la variation temporelle des débits observés au niveau des stations hydrométriques dans le bassin étudié ;
- enregistrées dans le « Logiciel EXCEL » option : Compléments d'application actifs « Analysis ToolPak ».

- les calculs ont été faits en appliquant les formules suivantes

La formule obtenue par régression multiple est la suivante :

$$Q_{mjkkro} = a * Q_{mjséling} + b * Q_{mjbanankoro} + c;$$

$$Q_{mjkirango} = a * Q_{mj}(Sélingue + banankoro) + b * Q_{mjkkoro} + c$$

D'où :

$Q_{mjkkro}$  : débit journalier prévisionnel à observer à la station de Koulikoro,

$Q_{mjsélingue}$  : débit journalier turbiné à la station de sélingué,

$Q_{mjbanankoro}$  : débit journalier observé à la station de Banankoro,

a, b: coefficients de régression calculés et c, la constante ; tous obtenus à partir des paramètres des fonctions d'ajustement par l'option EXCEL COMPLEMENT « ANALYSIS TOOL PAK ».

## 2.4 Etude de la variation des hauteurs enregistrées et les débits du sous-bassin considéré.

Les variations annuelles des débits des stations (Sélingue, Banankoro et Koulikoro) montre que les débits d'eau de Koulikoro dépendent beaucoup des débits observées en amont (voir graphique ci-dessous).

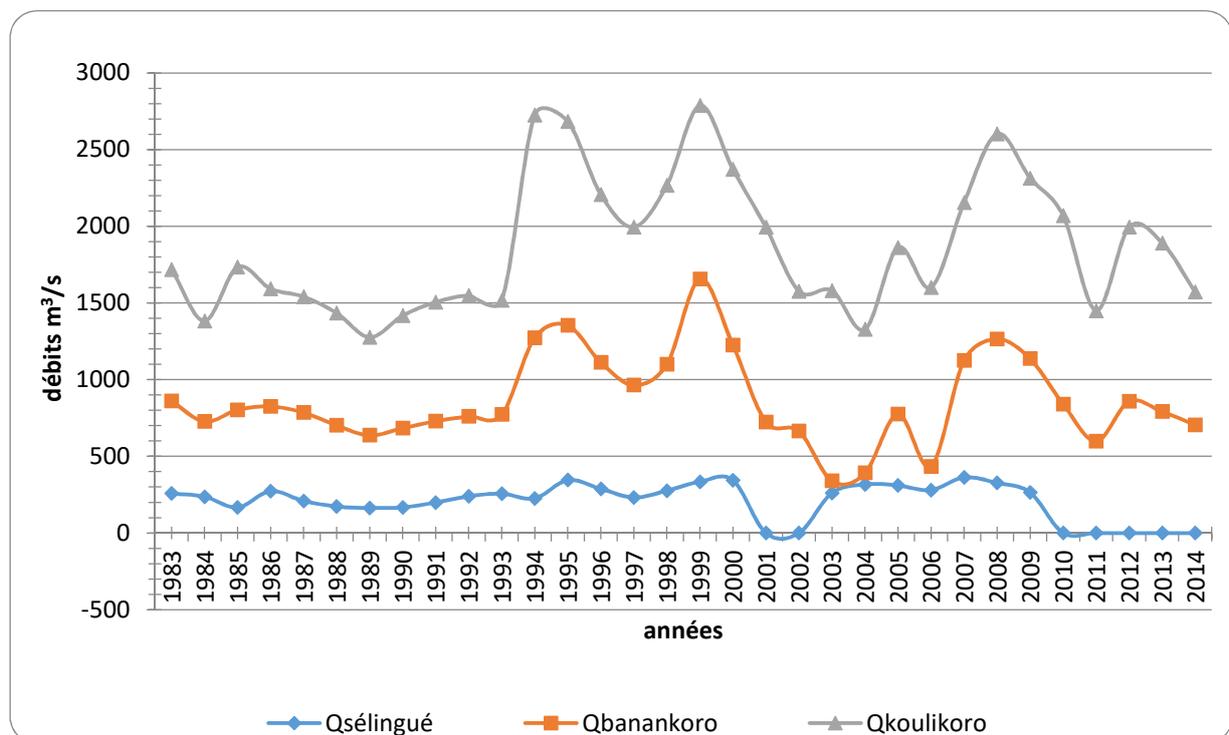


Figure 2: Hydrogramme des débits observés de 1983-2017 sur le Sankarani et le fleuve Niger de 1983-2017  
Source : résultats de la recherche en 2020.

L'analyse de hydrogramme (fig. N° 2) démontre que les apports d'eau de Koulikoro sont les réponses hydrologiques des apports d'amont du sous bassin considéré.

## 2.5 La variation journalière des cotes d'eau de Koulikoro

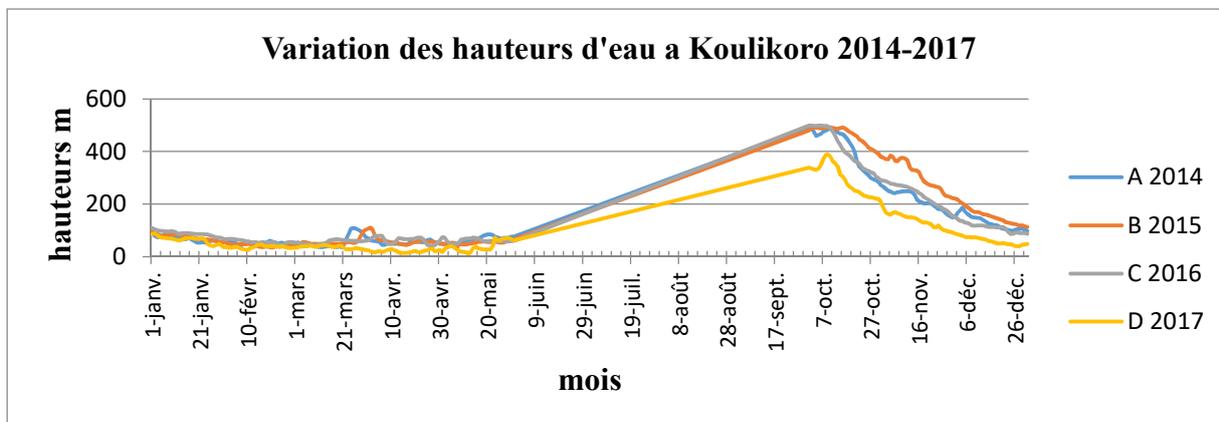


Figure 3 : Variation des hauteurs d'eau à Koulikoro 2014-2017

Source : résultats de la recherche en 2020

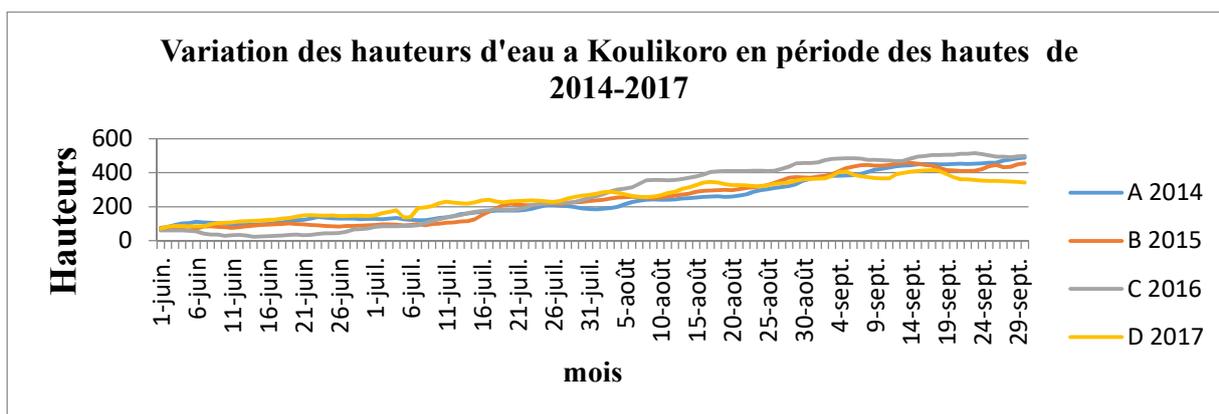


Figure 4 : Variation des hauteurs d'eau à Koulikoro 2014-2017

Source : résultats de la recherche en 2020

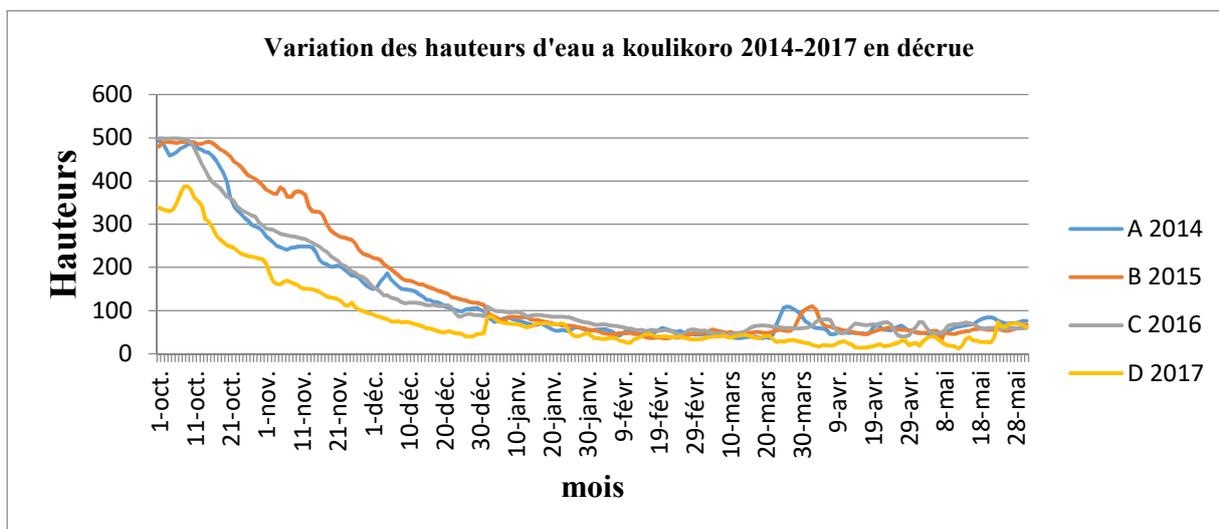


Figure 5 : Variation des hauteurs d'eau à Koulikoro 2014-2017 en décrue

Source : résultats de la recherche en 2020

## 2.6 Etude de la variation des débits des stations hydrométriques

De l'analyse de la situation hydrologique sur le bief, il ressort que les débits moyens journaliers de Koulikoro sont la résultante des débits turbinés de Sélingué et de Banankoro.

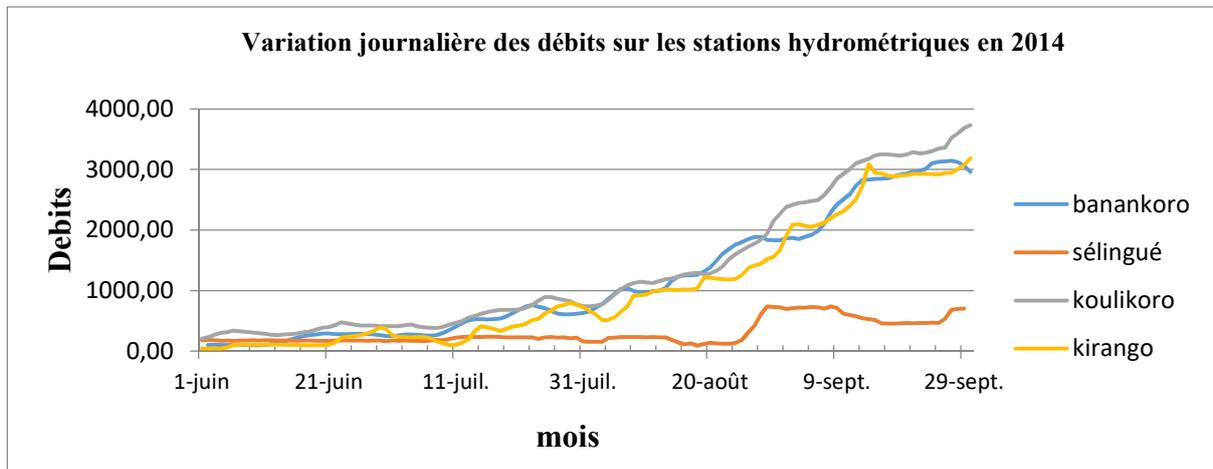


Figure 6 : Variation journalière des débits sur les stations hydrométriques en 2014

Source : résultats de la recherche en 2020

Afin de prédire des débits en aval par la méthode de la régression linéaire, des séries de variables hydrologiques comme des débits : « d'entrée » et « de sorti » ont été utilisées.

La formule du modèle de régression multiple est la formule suivante :

$$Q_{mj\ kkro} = a * Q_{mj\ Sélingué} + b * Q_{mj\ Banankoro} + c.$$

Le tronçon considéré est schématisé comme suit :

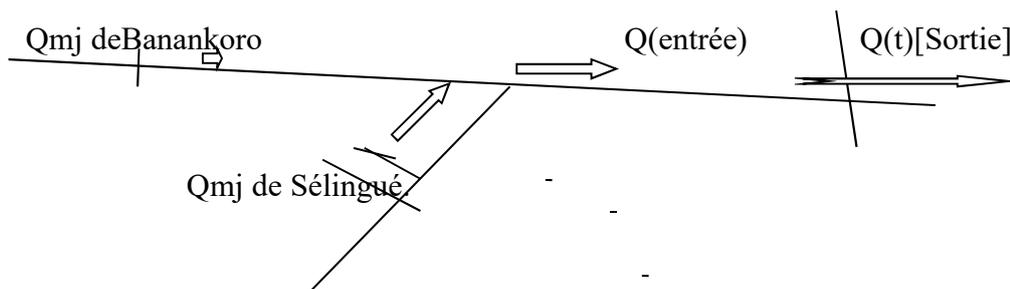


Figure 7: Schéma d'une cellule de prévision hydrologique sur le fleuve Niger

## 2.7 Calcul des constantes de l'équation de la régression linéaire.

Les corrélations entre les débits des trois stations sont très significatives : les coefficients de détermination ( $R^2$ ) sont supérieurs à 0,9 et quant aux valeurs moyennes résiduelles, elles sont plus importantes (inférieures à 20%). La performance du modèle hydrologique utilisé a un seuil de 95% par la méthode statistique visant à normaliser la comparaison entre les débits journaliers observés et les débits journaliers simulés. Ainsi, la méthode de la régression linéaire a été réalisée afin de prédire les débits journaliers à Koulikoro.

Dans ce travail, les séries de mesures hydrométriques (2014-2017) de débits maximum journaliers pour le mois Mars ont été constituées. Ces derniers sont ajustés à la corrélation linéaire afin de ressortir les débits de crue les plus probables dans la journée.

### 3. Résultats

Les calculs des constantes de l'équation de la régression linéaire à pas de temps journaliers pour le mois mars ont donné des valeurs de a, b, c, pour chaque jour qui nous permettent de prédire les débits à la station hydrométrique de Koulikoro.

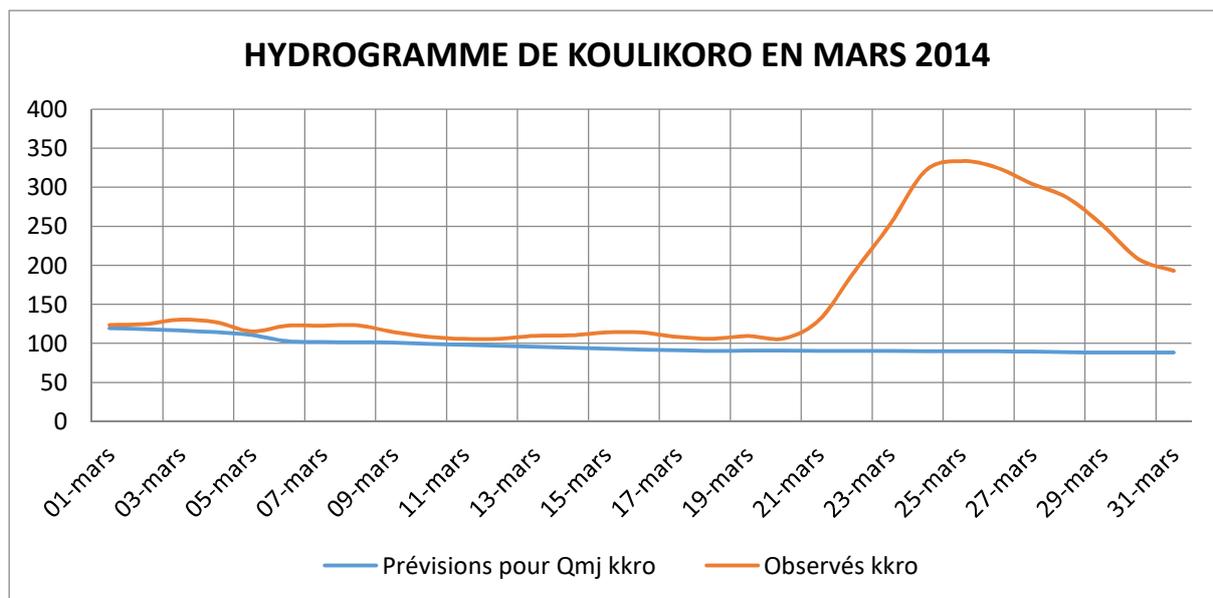


Figure 8 : Hydrogramme de Koulikoro en mars 2014  
Source : recherche en 2021

La figure 9 pour le mois mars 2015 nous montre pour la première et la deuxième une faible variation entre le débit observé et le débit prévisionnel. A partir de la troisième decade les débits prévisionnels sont moins élevés. C'est le debut de la decrue.

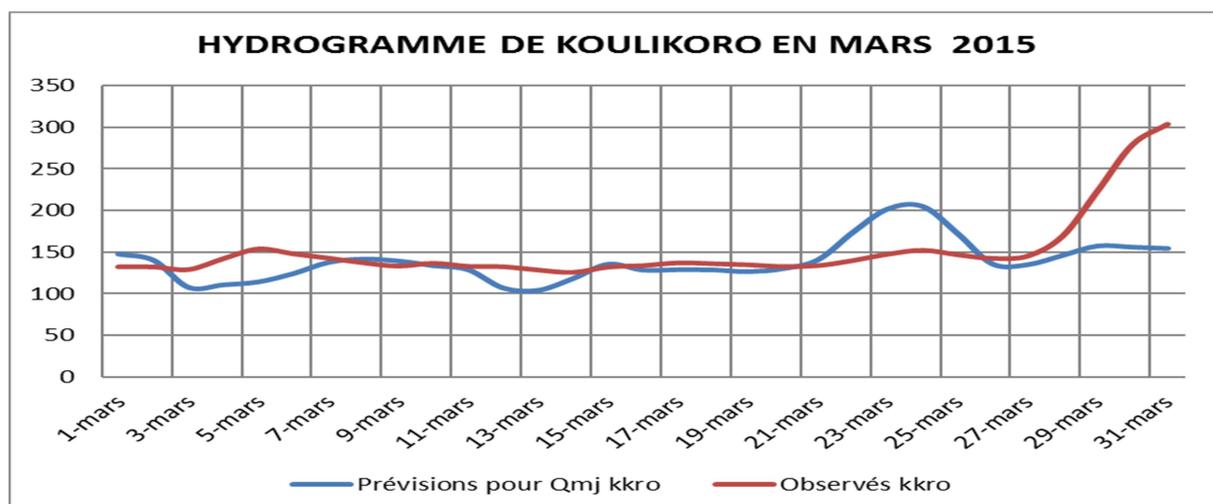


Figure 9 : Hydrogramme de Koulikoro en mars 2015  
Source : recherche en 2020

Sur la figure, les deux hydrogrammes oscillent presque ensemble avec des écarts très faibles. Durant le mois de mars 2016, les deux hydrogrammes ont même allure, pendant, quelques jours seulement les débits observés sont plus importants que les débits prévisionnels.

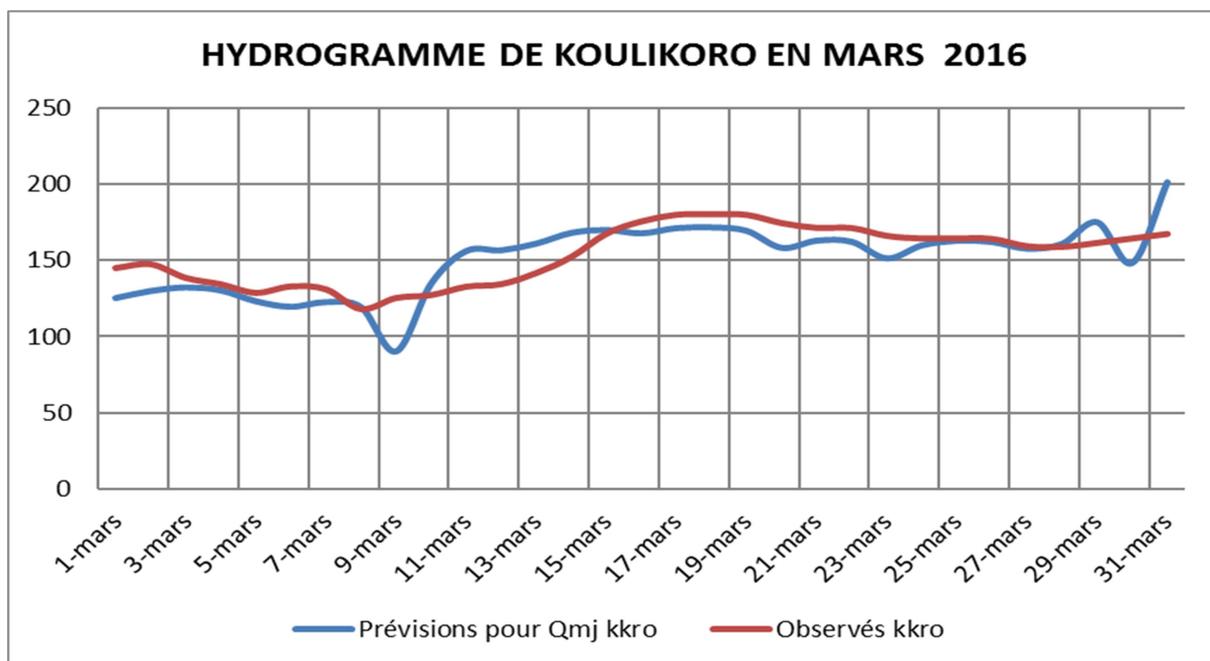


Figure 10 : Hydrogramme de Koulikoro en mars 2016  
Source : résultats de la recherche en 2021

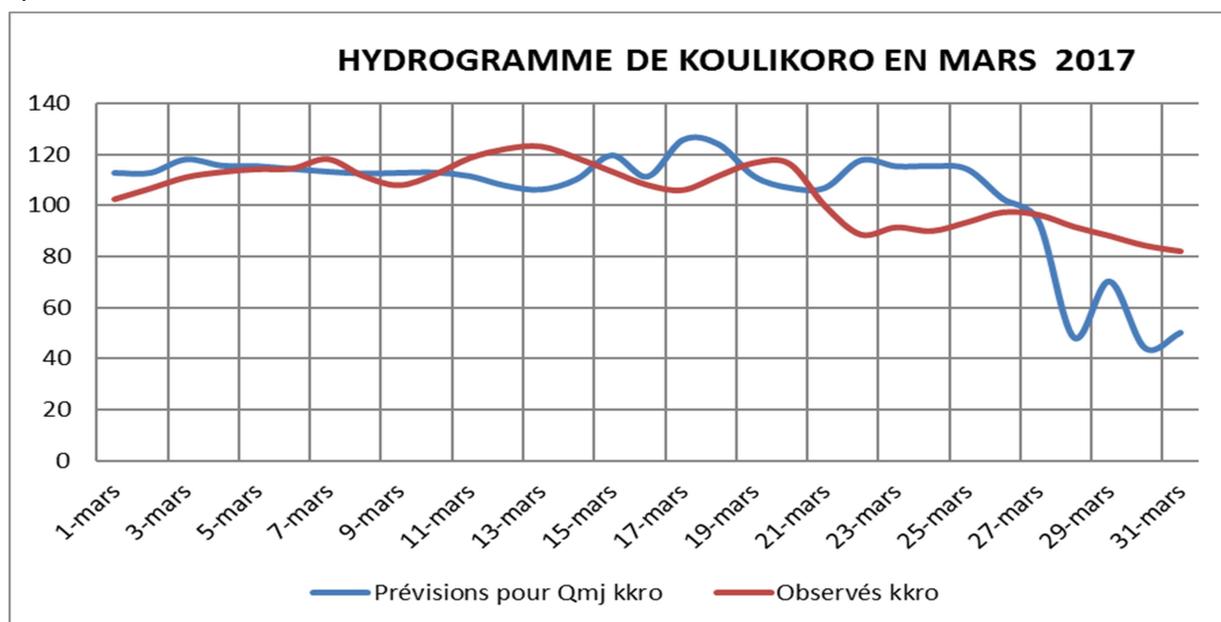


Figure 11 : Hydrogramme de Koulikoro en mars 2017  
Source : résultats de la recherche en 2021.

Durant le mois de mars 2017, les débits observés et prévisionnels sont presque faibles par rapport aux débits de 2014, 2015, 2016. Mais les deux hydrogrammes évoluent dans le temps

ensemble durant le mois avec une forte tendance de baisse des débits prévisionnels vers la fin du mois

#### 4. Discussion

L'objectif visé était à partir des résultats de la corrélation multiple entre les variables hydrologiques de montrer que :

- l'action des débits à turbiner du barrage de Sélingué est négligeable en période des hautes eaux ;
- en période des basses eaux, les débits de la station hydrométrique de Sélingué servent de soutien pendant certaines périodes de l'année surtout à partir du mois de mars, avril, mai).

Les équations de régression à pas de temps journaliers utilisées pour la simulation des débits moyens journaliers à la station hydrométrique de Koulikoro ont donné des résultats qui sont tous dans l'intervalle de confiance de 95%, ce qui signifie qu'il y a une probabilité d'apparition des débits prédits. Il est à noter que la régression linéaire utilisée dans cette étude établit un lien entre les variables d'entrée et les variables de sortie et cela a été éprouvé dans plusieurs calculs de simulations avec des bons résultats.

De façon générale, les expressions mathématiques de l'ajustement de la relation entre les débits journaliers de la station Sélingué, de Banankoro et de Koulikoro permettent d'estimer des quantités d'eau qui peuvent être transportées à partir des seules mesures des quantités d'eau écoulées dans le bief. Il est à noter que les équations de régression sont définies pour chaque jour pour prédire les débits à observer à Koulikoro plus précisément pour le début des basses eaux dans le bassin.

En examinant les graphiques débits observés et les débits prévisionnels de chaque jour, on observe à Koulikoro une alternance de période de durée variable.

L'analyse visuelle des hydrogrammes ainsi, que les variations des hauteurs, indiquent qu'il y a une analogie entre les séries de Banankoro, Sélingué et Koulikoro et une dépendance des débits des trois stations hydrométriques. On a calculé la corrélation entre les débits en utilisant une simple corrélation linéaire sur la période 2014-2017. Le coefficient de corrélation qu'on a déduit est de 0.9.

L'analyse de l'évaluation graphique des débits, nous montre que le décalage temporel entre les débits observés et prédits est plus visible. Ainsi, à partir des quantités d'eau « Prédits », on peut planifier l'utilisation et la répartition équitable des ressources du bassin Niger à Koulikoro.

L'analyse des débits de Banankoro et Sélingué en utilisant la méthode de la régression pour prédire les débits à la station de Koulikoro bien que les limites sont imposées, permet de porter un regard à l'échelle du bassin sur le principe de la propagation des crues. Il est à noter que plusieurs autres auteurs ont déjà identifiés sur ces séries chronologiques des débits observés, une relation d'homogénéité de variation interannuelle en fonction des indices des pluies qui témoignent la reprise des écoulements à partir de l'an 2000. Et que cela a engendré une grande variabilité climatique sur le bassin du Niger, notamment entre amont et aval.

Dans ce travail l'accent a été mis sur les aspects pratiques de cette approche en appliquant sur les débits journaliers à prévoir à Koulikoro.

## 5. Conclusion

Le débit ainsi calculé renseigne les planificateurs des offices en charge du suivi sur le régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro dépendant des conditions agro-pedo-climatique passées et actuelles.

Nous avons évalué les capacités de 36 prédictives de la méthode de la régression pour de période de 1983 à 2017. Ces échantillons des débits annuels ont permis de caler par approximation successive de façon possible à produire le mieux les observations. La méthode est satisfaisante avec des intervalles de confiance de 95% et les coefficients de corrélation variant de 0,81 à 0,99 sur le tronçon considéré. Dans la pratique, une chronique des débits continus sur la période 2014-2017 sur les trois stations hydrométriques a permis d'analyser le fonctionnement hydrologique du bassin du Niger à Koulikoro, de réaliser des prévisions à pas de temps journalier.

Les méthodes de calculs peuvent être des outils d'aide pour éviter les conflits entre les usagers de l'eau cependant comme tout modèle global, ils doivent être manié avec beaucoup de précautions.

## Références

Ana Karina Fermin, Le modèle de régression linéaire, Université Paris Nanterre [http://fermin.perso.math.cnrs.fr/Files/Slides\\_Regression\\_M2.pdf](http://fermin.perso.math.cnrs.fr/Files/Slides_Regression_M2.pdf)

Ardoïn-Bardin S. (2004) Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de doct. Univ. Montpellier II. 440 p.

Abe J. 2005. Contribution à la connaissance de la morphologie et de la dynamique sédimentaire du littoral Ivoirien (cas du littoral d'Abidjan). Essais de modélisation en vue d'une gestion rationnelle. Thèse de Doctorat. Université de Cocody.

Diarra A. T; Olivry J.C; Variations des débits du fleuve Niger à Koulikoro et extension des séries hydro climatiques du bassin supérieur du Niger à partir du bassin de Koulikoro- Etude menée en collaboration avec la représentation au Mali de l'Institut Français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM). 1990.

Diarra A.T. ; Soumaguel A.; Influence du Barrage de Sélingué sur le régime hydrologique du fleuve Niger, AISH publication N°-240 ISSN00144-7815. 1997.

FERRY (L.), MUTHER (N.), COULIBALY (N.), MARTIN (D.), MIETTON (M.), CISSÉ COULIBALY (Y.), OLIVRY (J.C.), PATUREL (J.E.), BARRY (M.A.), YENA (M.), 2012. Le fleuve Niger de la forêt tropicale guinéenne au désert saharien. Les grands traits des régimes hydrologiques. IRD, UNESCO, 50 p