



COMITE PERMANENT INTER-ETATS DE LUTTE CONTRE LA SECHERESSE DANS LE SAHEL
PERMANENT INTERSTATE COMMITTEE FOR DROUGHT CONTROL IN THE SAHEL
COMITÉ PERMANENTE INTER-ESTADOS DE LUTA CONTRA A SECA NO SAHEL
اللجنة الدائمة المشتركة لمحاربة التصحر في الساحل



Centre Régional AGRHYMET

Rapport d'activités sur la calibration du modèle SWAT à l'ensemble du bassin du Niger

Juillet 2018

Contents

INTRODUCTION	3
1. PRESENTATION DU BASSIN DU NIGER	3
2. DESCRIPTION DU MODELE SWAT	4
3. DONNEES UTILISEES	5
4. MISE EN ŒUVRE DE SWAT SUR LE BASSIN DU NIGER.....	10
4.1. Collecte d'informations sur la gestion des réservoirs les plus importants	10
4.2. Collecte d'informations pour la gestion et la caractérisation générale de la zone du Delta Intérieur	10
4.3. Développement d'un modèle spécifique du Delta Intérieur du Niger.....	13
4.4. Configuration du modèle	14
4.5. Calage du modèle	14
4.6. Evaluation du modèle	17
5. ETAPES SUIVANTES.....	24
6. RÉFÉRENCES	27

Introduction

Dans le cadre de la mise en œuvre du projet E-Nexus, il est prévu le développement et l'implémentation d'un modèle hydrologique pour l'estimation du bilan hydrologique et la gestion de l'eau, la production agricole, le maintien des écosystèmes. A cet effet, SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a été identifié comme le modèle hydrologique à développer sur le bassin du Niger. Ce modèle permettra de fournir des produits et services sur la connaissance des ressources en eau sur l'ensemble du bassin (adéquation entre la disponibilité et la demande), la prévision des crues (contribution au système d'alerte précoce), les projections d'échelle climatiques (planification des ressources en eau sur le bassin). Dans ce présent rapport, nous présentons les étapes de développement du modèle SWAT comportant la collecte des données complémentaires, le processus de calage du modèle et les projections climatiques à considérer pour évaluer la disponibilité future des ressources en eau dans le bassin du fleuve Niger.

1. Présentation du bassin du Niger

Le bassin du fleuve Niger est situé au cœur de l'Afrique de l'Ouest. Comme un atout majeur, le fleuve Niger et ses affluents constituent des liens vitaux entre les neuf pays riverains : Bénin, Burkina Faso, Cameroun, Côte d'Ivoire, Guinée, Mali, Niger, Nigeria et Tchad. Le fleuve Niger est le 3^{ème} fleuve d'Afrique de par sa longueur (4,200 km), après le Nil et le Congo mais est le plus important fleuve d'Afrique de l'Ouest. Il est le 14^{ème} plus long fleuve du monde. Son bassin couvre une superficie de près de 2,2 millions km² comprenant environ 1,5 million km² de bassin hydrologiquement actif. Enfin, il est le 9^{ème} système fluvial le plus important du monde. Bien que son bassin versant couvre neuf pays, plus de 80% de sa superficie se trouvent dans trois pays : Mali, Niger et Nigeria. Le fleuve Niger prend sa source dans la dorsale guinéenne du Fouta Djallon, une région de hauts plateaux d'altitude moyenne d'environ 1 100 mètres et se dirige vers le Nord Est, forme en saison des pluies une vaste plaine d'inondation au Mali, appelée Delta Intérieur ou cuvette lacustre. A la sortie du Delta Intérieur, le fleuve décrit une boucle au Mali ; puis coule plein Sud-Est jusqu'au Nigeria où il est rejoint par la Bénoué et se jette dans l'Océan Atlantique (**Autorité du Bassin du Niger**). Son bassin géographique, composé de vastes zones désertiques, de plaines d'inondation et de zones marécageuses est caractérisé par la présence de grandes vallées qui s'assèchent progressivement. Le fleuve Niger constitue un couloir de productivité qui, durant des milliers d'années, fournit à la population des moyens de subsistance diversifiés et dynamiques, lui permettant de survivre même lors des pires sécheresses. Son environnement physique est marqué par trois décennies de sécheresse et une forte croissance démographique dont les effets se sont conjugués pour accélérer la dégradation

des terres et des eaux, fragiliser les écosystèmes aquatiques et accroître la paupérisation des populations.

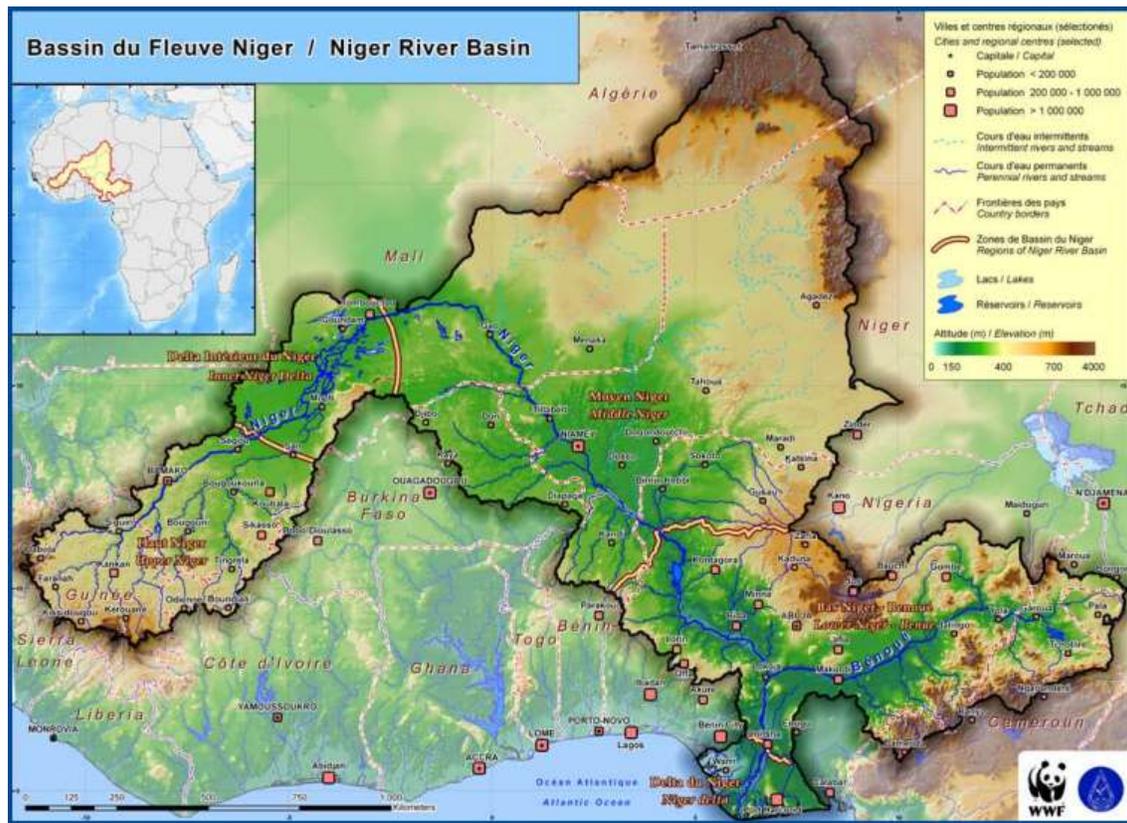


Figure 1: Bassin du Niger (Source: ABN)

2. Description du modèle SWAT

Le modèle SWAT est un modèle hydrologique pluie-débit, semi-distribué au pas de temps journalier. En input, le modèle est forcé par les données pluviométriques journalières avec une bonne résolution spatiale. SWAT a été conçu et développé par des chercheurs de l'USDA (United States Department of Agriculture)-Agricultural Research Service (Arnold et al., 2012, 1998; Arnold and Fohrer, 2005; Green et al., n.d.). Les bassins versants représentés dans ce modèle ont des superficies allant de quelques centaines à plusieurs milliers de km². Le modèle prend en compte l'ensemble du cycle hydrologique, représenté au niveau du bassin versant de façon spatialisée. Ce type de modèle tient compte de la variabilité spatiale et ne demande pas un volume de données trop important (quelquefois indisponibles), il allie donc simplicité de mise en œuvre et représentation fiable de la réalité. SWAT ne peut être considéré comme entièrement physique, même si certains phénomènes sont modélisés par des lois reconnues dont les paramètres représentent des grandeurs réelles. En effet, il comporte un certain empirisme notamment au niveau de la représentation du ruissellement (Méthode du Curve Number) ou de l'écoulement

souterrain simplifié à partir de quelques paramètres empiriques comme le coefficient de tarissement (Lacroix et al. 2005). Il s'agit d'un modèle agro-hydrologique car il est orienté vers les pollutions diffuses d'origine agricole, et parce qu'il modélise de manière précise les processus liés au sol et à la végétation. Le modèle SWAT permet d'analyser les impacts du climat, du sol, de la végétation ainsi que des activités agricoles sur l'écoulement de l'eau.

3. Données utilisées

Les données utilisées pour la mise en œuvre de SWAT sur le bassin du Niger sont présentées ci-dessous :

Modèle Numérique de Terrain : Les données HydroSHEDS ont été utilisées pour la délimitation des bassins versants. HydroSHEDS est dérivé des données d'élévation de SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) à une résolution de 3 secondes d'arc (WWF, 2018). Les données SRTM originales ont été hydrologiquement conditionnées en utilisant une séquence de procédures automatisées. Des méthodes existantes d'amélioration des données et des algorithmes nouvellement développés ont été appliquées, y compris les techniques de remplissage des vides, de filtrage, de gravure de flux et d'upsampling. Des corrections manuelles ont été également apportées. Les évaluations préliminaires de la qualité indiquent que l'exactitude d'HydroSHEDS dépasse de loin celle des cartes hydrographiques et fluviales mondiales existantes. La topographie du bassin (figure 2) est caractérisée par une légère élévation qui va de 2972 m au niveau des zones montagneuses à 0 m à l'embouchure du bassin.

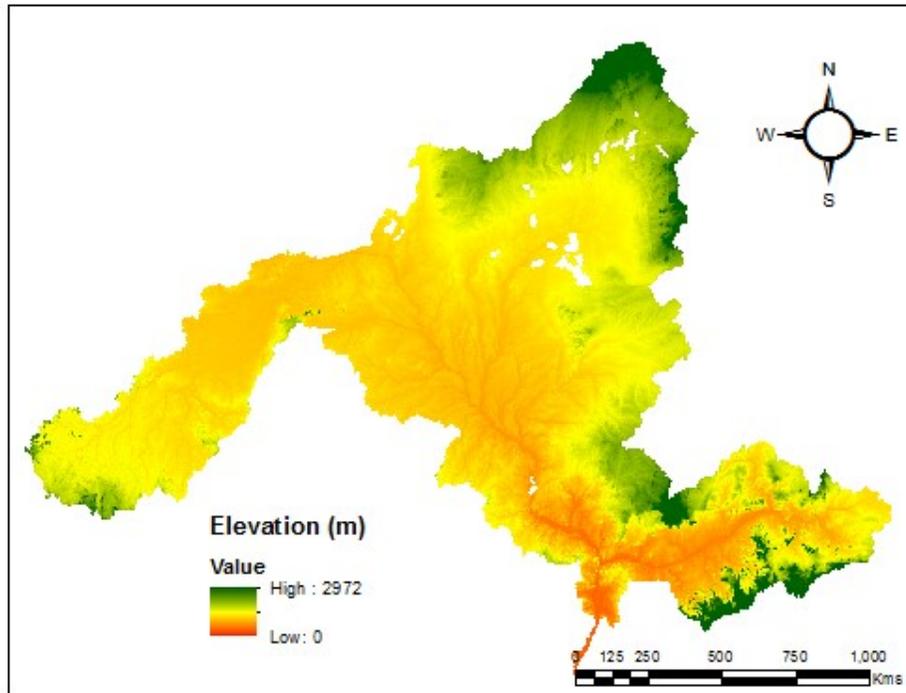


Figure 2: Modèle Numérique de Terrain du bassin du Niger

Occupation et utilisation des terres :Elles proviennent de la base de données Globcover de l'ESA (Bartholomé and Belward, 2005). Elles ont été produites entre 2004 et 2006 et ont été dérivées par une classification automatique et régionale d'une série temporelle de réflectance de surface à pleine résolution de MERIS. Elles ont une résolution de 300 m et comprennent 7 classes de sol sur le bassin du Niger. Il s'agit principalement des classes de sols suivantes : les terres agricoles, les forêts, les terres pastorales, les plans d'eau, les zones résidentielles (figure 3).

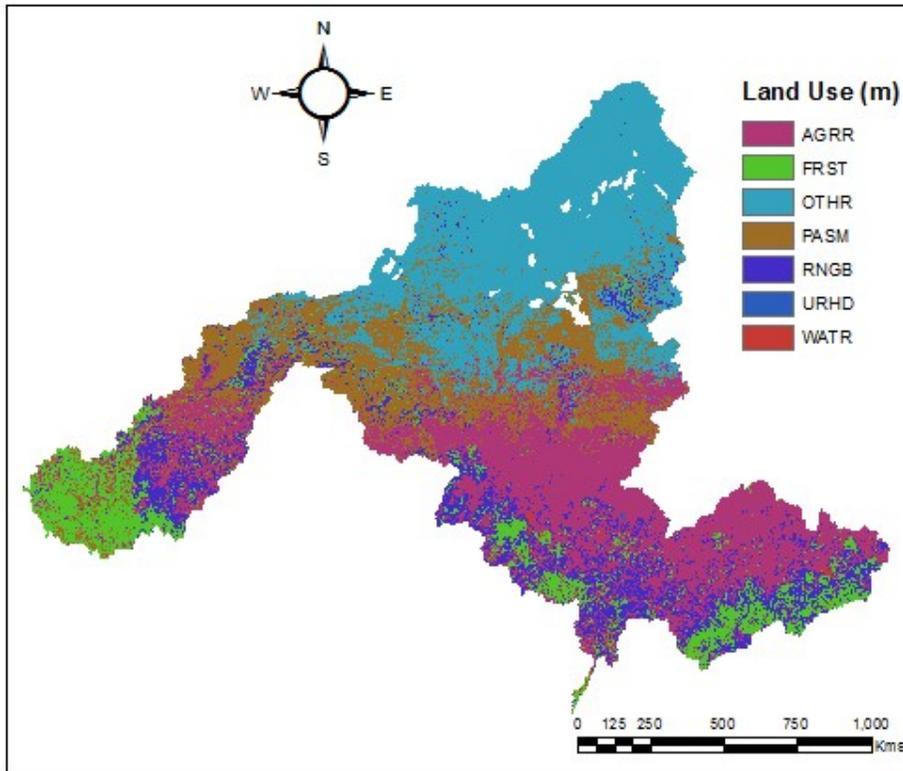


Figure 3: Carte d'occupation et d'utilisation des terres

Données pédologiques : La base de données mondiale harmonisée sur les sols (HWSD) version 1.2 produite par la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), l'Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués, l'Institut des sciences du sol de l'Académie chinoise des sciences et le Centre Commun de Recherche (CCR) de la Commission Européenne, a été utilisée pour générer les données sur les sols nécessaires dans SWAT (figure 4)(FAO et al., 2009).

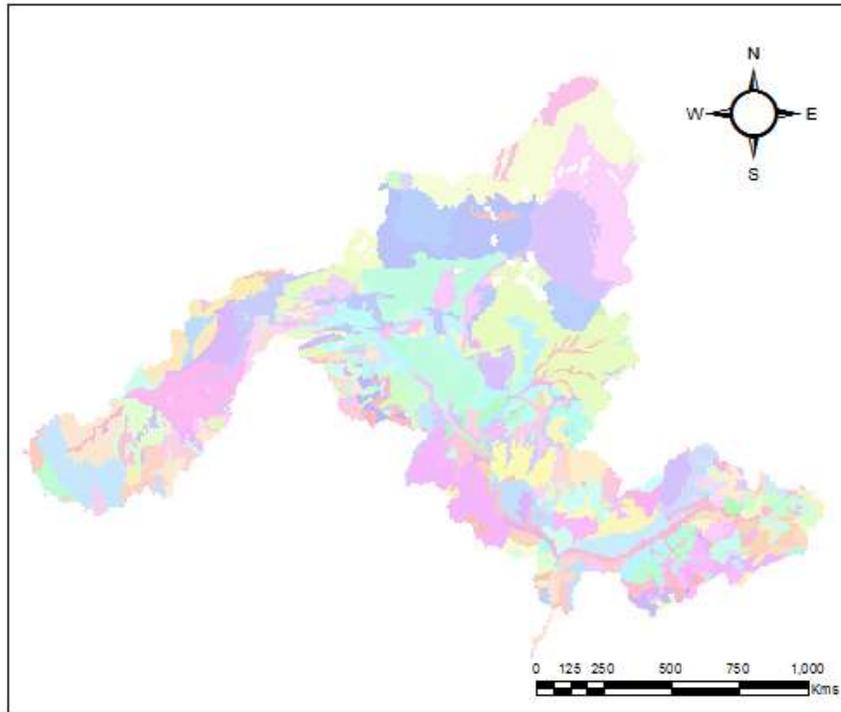


Figure 4: Carte de sols

Données climatiques : Les données de re-analyses d'ERA-Interim ont été utilisées comme forçage climatique du modèle (Berrisford et al., 2009). Elles couvrent la période 1990-2012 et consiste en 1976 points sur l'ensemble du bassin du Niger. Les paramètres considérés sont : la précipitation, la température (maximale et minimale), la vitesse du vent, la radiation solaire et l'humidité relative.

Données de débits : Les données de débits proviennent de la base de données du Centre Régional AGRHYMET et de celle de l'ABN.

Données sur les réservoirs : Elles proviennent de la base de données d'AGRHYMET et celle de la FAO. Les principaux réservoirs considérés sont représentés au niveau de la figure 5.

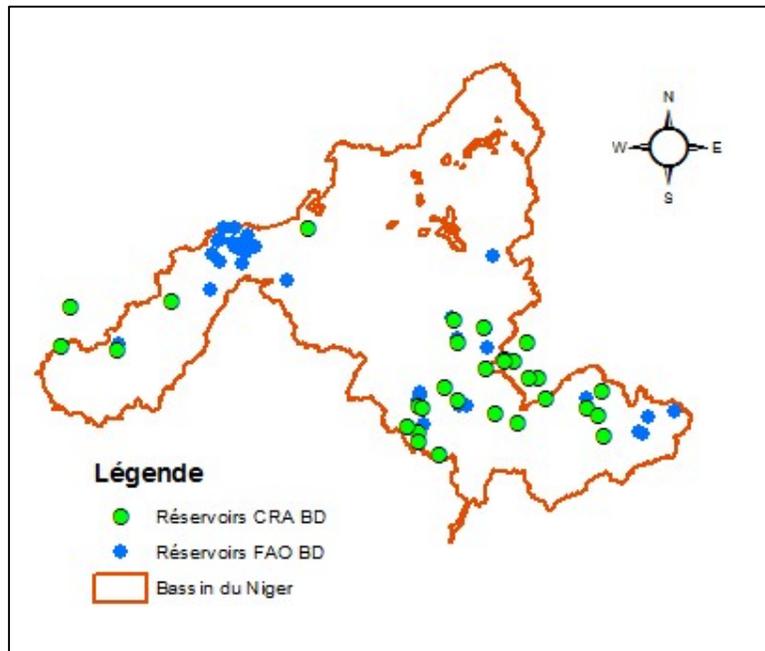


Figure 5: Réservoirs considérés dans le modèle

Le tableau ci-dessous fait une synthèse des données utilisées pour la configuration du modèle.

Tableau 1. Données utilisées pour la configuration du modèle SWAT

Type de données	Description	Résolution/Période	Source
Elévation	Modèle Numérique de Terrain	90 m	USGS HydroSHEDS
Occupation et utilisation des terres	GlobCover 2009	1 km	Agence Spatiale Européenne
Carte de sols	Données sols de la FAO	1 :5000000	FAO
Données climatiques	Données climatiques de ré-analyses	0.5°	ERA-Intérim
Débits	Débits observés à l'exutoire de plus de 60 stations	1955-2010	AGRHYMET ABN
Données sur les réservoirs	Caractéristiques des grands réservoirs dans le bassin		AGRHYMET FAO

4. Mise en œuvre de SWAT sur le bassin du Niger

4.1. Collecte d'informations sur la gestion des réservoirs les plus importants

Des informations sur une dizaine de réservoirs supplémentaires ont été collectées. Elles concernent leur localisation, la date de construction des réservoirs, leur capacité, les volumes mensuels de remplissage, etc.

4.2. Collecte d'informations pour la gestion et la caractérisation générale de la zone du Delta Intérieur

Le Centre Régional AGRHYMET a approché les structures ayant effectué des travaux similaires ces dernières années sur le Delta Intérieur. Il s'agit principalement de Wetlands International et de l'IFPRI. De ces structures, des articles, des liens web utiles pour mieux caractériser le Delta ont été collectés.

Quelques articles et liens utiles :

- <https://onisdin.info/en>;
- Julian R. Thompson, Andrew Crawley & Daniel G. Kingston, GCM-related uncertainty for river flows and inundation under climate change: the Inner Niger Delta;(Thompson et al., 2016);
- Y. C. Ethan Yang, Simple hydrologic simulation for the Niger Inner Delta in the Niger River Basin;
- (Ibrahim et al., 2017)Thomas Poméon, Bernd Diekkrüger, Anne Springer, Jürgen Kusche, and Annette Eicker, Multi-Objective Validation of SWAT for Sparsely-Gauged West African River Basins—A Remote Sensing Approach;(Poméon et al., 2018);
- Hassaan Furqan Khan, Y. C. Ethan Yang, Hua Xie, Claudia Ringler, A coupled modeling framework for sustainable watershed management in transboundary river basins.(Khan et al., 2017).

Le tableau ci-dessous (Tableau 2) fait le point des données collectées dans le cadre de la mise en œuvre du modèle.

Tableau 2. Données collectées dans le cadre de la mise en œuvre du modèle

Input data				to be done			
Category	Source	Resolution	Status	Proposal	Priority for getting complementary data	Agrhyment complement	Observations
DEM - Modèle Numérique de	Hydroshed Void Filled DEM. http://www.h	90m	impleme nted	no priority	No		Le MNT de 90 m suffit pour le développem

terrain	hydrosheds.org						ent en cours
Soil Data	Harmonized World Soil Database	30 arc-second raster database	implemented	if available: data validation with local data sources (organic carbon content, AWC, K sat)	Low (working at Niger scale we have one soil for each subbasin, so important parameters need to be calibrated, so no need for very detailed data).	<i>Implementation of local data set?</i> Digitalization and adaptation of country national soil data (source: ORSTOM)	Ces données ont déjà été digitalisées. Il s'agira de les tester sur le bassin de la Sirba avant d'envisager leur utilisation sur l'ensemble du Niger
Landcover	ESA Globcover 2009	300 m	implemented	no priority	Low	<i>Implementation</i> Il convient de tester l'apport des données LU/LC d'AGRHYMET par rapport à Globcover.	LULUC d'AGRHYMET a été adapté au format de SWAT. Un test a été effectué sur le bassin de la Mékrou. Nous n'avons pas observé une grande différence par rapport au modèle utilisant GlobCover
Meteo data	ERA-Interim data Bias corrected. Period 1990-2012. 1976 Virtual stations in the Niger	Original resolution of about 80 km	implemented	data validation: Daily data for Precipitation; ETP	High: Focus on Precipitation daily data, and data validation	<i>Implementation of local data set?</i> Données pour validation: merging de 600 stations avec TAMSAT pour évaluer la qualité d'ERA-Interim sur la période 1990-2015. De même quelques validations locales des ETP ERA-Interim avec les	Ces données contribueront à l'amélioration future du modèle

						données de quelques stations sur différentes parties du bassin.	
Management							
	Global Lakes and Wetlands Database GLWD and Global Reservoir and Dam (GRAND) database (www.gwsp.org)		35 reservoirs included in the setup (29 from Global data + from CRA)	data validation: surface, volume; <u>reservoir management</u>	High: Focus on most important reservoirs and data on management (always realism water, months of activity, etc)	Identifier des personnes ressources au niveau de chaque pays pour appuyer la collecte des données sur les principaux barrages appartenant au bassin du Niger.	Des informations complémentaires de 10 réservoirs ont été collectées sur l'ensemble du bassin du Niger. Elles ont servi à la configuration du modèle
Barrages			Inner Delta	to be developed	High: Focus on Inner delta characterization and management; testing <u>Wetland</u> Option in SWAT	Co-développement d'un modèle conceptuel du Delta Intérieur entre AGRHYMET et JRC en capitalisant les travaux précédents.	Des liens ont été établis avec les structures ayant déjà conduit des travaux similaires sur le bassin du Niger. Il s'agit de l'IFPRI et de WetLands International. Des codes ont été partagés avec le CRA et des travaux sont en cours pour leur intégration dans le modèle développé
Utilisation de sols/land-use	Country stats statistics for specific crop share: http://countrystat.org/ . http://www.fao.org/	Country level and/or Subnational	implem-ented	data validation with Subnational statistic for important/dominant crops	Medium: Focus on most important agronomic crops.	L'équipe d'AGRHYMET va fournir un effort pour faire le point et rechercher des compléments sur les données dans	Cette activité sera réalisée à la prochaine étape

	o.org/nr/gaez/en/					le domaine.	
Gestion de cultures: fertilization	Livestock density Map (Robinson et al., 2014. http://livestock.geo-wiki.org)	about 5x5 km	impleme nted	data validation with Subnational statistics for important/dominants crops	Low	L'équipe d'AGRHYMET fera le point sur le complément possible des données dans le domaine.	Cette activité sera réalisée à la prochaine étape
Gestion de cultures: irrigation	FAO: Global Map of Irrigation Areas	5 arc minutes	to be impleme nted	identification of irrigated subbasins by using FAO Map	High: Focus on identification of irrigated subbasins	L'équipe d'AGRHYMET cherchera des possibles données complémentaires sur la thématique.	Cette activité sera réalisée à la prochaine étape
Monitoring data	Agrhymet	n.r.	about 60 stations collected ?	Finalize Hydro Stations collection for all sub areas required for SWAT calibration	High: focus on the collection of good quality (long and complete) time series	Sur l'ensemble du bassin il y a plus de 60 stations des qualités et longueurs des séries différentes.	Sur la soixantaine des stations hydrométriques du bassin, une trentaine a servi à la calibration du modèle
Water demands	to be developed		no data		High	L'équipe d'AGRHYMET cherchera des données sur les demandes en eau.	Cette activité sera réalisée à la prochaine étape

4.3. Développement d'un modèle spécifique du Delta Intérieur du Niger

Le Delta Intérieur du Niger (DIN), entièrement situé au Mali, s'étend sur un rectangle orienté Sud-Ouest/Nord-Est avec une longueur de 420 km et une largeur de 125 km entre Ké-Macina et San au Sud et Tombouctou au Nord. Il a une superficie de 84 500 km² et assure la quasi-totalité de la production du riz du Mali, une denrée principale dont la production est développée grâce au barrage de dérivation de Markala. Le DIN exerce une grande influence sur les écoulements en aval. Son fonctionnement est jusque-là peu connu (Moussaet al., 2017).

Dans le cadre de cette étude, nous avons effectué une recherche bibliographique des études de modélisation menées au niveau de ce complexe hydrologique. Il ressort de cette recherche, deux importantes études réalisées au niveau du Delta Intérieur :

- Une étude réalisée par l'IFPRI (Hassan Furqan Khan et al, 2017) a permis de développer un module spécifique pour le DIN. Les codes sources de SWAT ont été modifiés à cet effet. Ces codes ont été partagés avec le Centre Régional AGRHYMET et le JRC (Joint Research Centre). Ces codes ont été compilés et il s'agira par la suite d'évaluer les capacités du nouveau modèle à mieux simuler les processus en aval du DIN ;
- Un modèle hydrodynamique en deux dimensions développé par WetLands International. Un contact a été pris avec l'équipe de développeurs et des échanges sont prévus les prochains jours pour une éventuelle intégration de ce modèle au niveau du modèle global de SWAT.

Il est par ailleurs prévu d'échanger avec l'équipe de développeurs de SWAT pour une collaboration en vue de considérer l'aspect complexe du DIN dans les codes sources du modèle. Cette activité contribuera à améliorer la qualité du modèle dans le bassin.

4.4. Configuration du modèle

La configuration du modèle a été réalisée à l'aide de l'interface ArcSWAT 2012. Le bassin du Niger a été subdivisé en sous-bassins sur la base du MNT et du réseau hydrographique dérivé. Les sous-bassins et les cours d'eau ont été définis en utilisant un seuil de superficie de drainage de 20 000 ha, ce qui donne 5534 sous-bassins d'une superficie moyenne de 378 km² couvrant 2.1 millions de km². Les sous-bassins ont ensuite été superposés aux cartes de sols et celles d'utilisation des sols pour dériver des unités de réponse hydrologique (HRU), qui sont des unités ayant les mêmes caractéristiques de sols, d'utilisation des sols, et de pente. Nous avons retenu une HRU par sous-bassin, obtenue en considérant les classes d'utilisation et d'occupation de terres, de sol et de pente dominantes.

4.5. Calage du modèle

Le calage consiste à un ajustement des valeurs numériques attribuées aux paramètres physiques du bassin, afin de reconstituer le plus fidèlement possible l'hydrogramme observé. SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty analysis Procedures, (Abbaspour, 2014)) est l'outil utilisé pour la calibration. Cet outil est un programme de domaine public, donc libre. Le programme relie les procédures SUFI2, PSO, GLUE, ParaSol et MCMC à SWAT. Il permet l'analyse de sensibilité, la calibration, la validation et l'analyse d'incertitude du modèle SWAT. Dans SWAT-CUP, il s'agit techniquement d'optimiser une fonction objective d'appréciation des sorties du modèle développé.

Compte tenu de la taille du bassin du fleuve Niger (trop grand pour être considéré comme une seule entité dans la calibration) et de la complexité des processus physiques dans le Delta Intérieur (celui-ci n'a pas été modélisé), le bassin du Niger a été subdivisé en 3 grandes parties :

- Les sous-bassins en amont du Delta Intérieur;
- Les sous-bassins en aval du Delta, précisément en aval de la station de Diré, dont les écoulements sont influencés par ceux en amont du DIN ;
- Les sous-bassins en aval du DIN dont les écoulements ne sont pas influencés par le fonctionnement du DIN (Sirba, Mékrou, Bénoué, etc.).

La figure ci-dessous représente ces différentes parties.

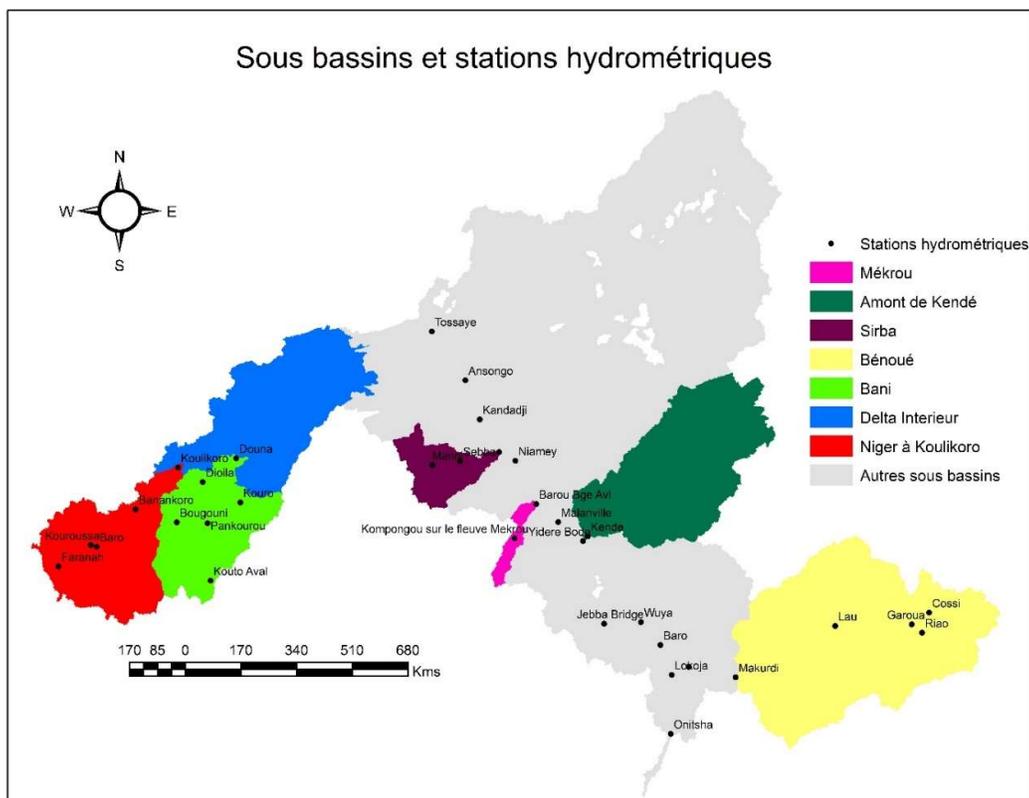


Figure 6: Différentes grandes parties considérées pour la modélisation et réseau associé

Le modèle a été calibré en utilisant les données de 27 stations hydrométriques, au pas de temps mensuel sur la période 1990-2012.

Les paramètres considérés sont consignés dans le tableau ci-dessous (Table 3) pour les différentes parties considérées:

Table 3. Les paramètres considérés pour la calibration.

Paramètres	Valeur minimale	Valeur maximale	Meilleurs paramètres
Haut Niger à Koulikoro			
v__ALPHA_BF.gw	0	1	0.905
v__GW_DELAY.gw	1	100	56.935
v__GWQMN.gw	0	600	549
v__RCHRG_DP.gw	0	1	0.505
v__GW_REVAP.gw	0	0.2	0.069
v__REVAPMN.gw	0	100	38.5
Bassin du Bani à Douna			
v__GW_DELAY.gw	1	100	0.125
v__GWQMN.gw	0	600	48.03
v__RCHRG_DP.gw	0	1	195
v__GW_REVAP.gw	0	0.2	0.675
v__REVAPMN.gw	0	100	0.015
v__GW_DELAY.gw	1	100	42.5
Bassin de la Sirba à Garbey Kourou			
v__ALPHA_BF.gw	0	1	0.725
v__GW_DELAY.gw	1	100	79.705
v__GWQMN.gw	0	600	3
v__RCHRG_DP.gw	0	1	0.815
v__GW_REVAP.gw	0	0.2	0.089
v__REVAPMN.gw	0	100	68.5
Bassin de la Mékrou à Barou			
1:V__ALPHA_BF.gw	0	1	0.262
2:V__GW_DELAY.gw	1	100	12.237
3:V__GWQMN.gw	0	600	357.900
4:V__RCHRG_DP.gw	0	1	0.448
5:V__GW_REVAP.gw	0	0.2	0.069
6:V__REVAPMN.gw	0	100	94.150
7:V__ALPHA_BF.gw	0	1	0.767
8:V__GW_DELAY.gw	1	100	49.559
9:V__GWQMN.gw	0	600	21.300
10:V__RCHRG_DP.gw	0	1	0.461
11:V__GW_REVAP.gw	0	0.2	0.197
12:V__REVAPMN.gw	0	100	18.950
13:R__CN2.mgt	-0.3	0.3	0.077
14:R__CN2.mgt	-0.3	0.3	-0.264
15:R__SOL_AWC(..).sol	-0.3	0.3	-0.276
16:R__SOL_AWC(..).sol	-0.3	0.3	-0.177
Bassin de la Bénoué à Makurdi			
v__ALPHA_BF.gw	0	1	0.145
v__GW_DELAY.gw	1	100	50.005
v__GWQMN.gw	0	600	339
v__RCHRG_DP.gw	0	1	0.375

Paramètres	Valeur minimale	Valeur maximale	Meilleurs paramètres
v__GW_REVAP.gw	0	0.2	0.061
v__REVAPMN.gw	0	100	54.5
Bassin amont de Kendé			
18:V__GW_DELAY.gw	1	200	25.875
19:V__GWQMN.gw	0	600	321
20:V__RCHRG_DP.gw	0	1	0.285
21:V__GW_REVAP.gw	0	0.2	0.113
Autres sous bassins			
29:V__ALPHA_BF.gw	0	1	0.625
30:V__GW_DELAY.gw	1	100	63.865002
31:V__GWQMN.gw	0	600	255
32:V__RCHRG_DP.gw	0	1	0.025
33:V__GW_REVAP.gw	0	0.2	0.137
34:V__REVAPMN.gw	0	100	54.5

4.6. Evaluation du modèle

Pour évaluer les performances du modèle, des techniques statistiques et graphiques ont été utilisées. Les critères de performance suivants ont été considérés pour l'évaluation de la performance de SWAT :

Indicateur statistique	Formule	Plage de valeurs	Meilleur score
Coefficient de corrélation de Pearson	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}}$	-1 à 1	1
Coefficient de détermination	$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \right)^2$	0 à 1	1
KGE	$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left[\left(\frac{\sigma_s}{\sigma_m} - 1 \right) \right]^2 + \left[\left(\frac{\bar{S}}{\bar{M}} - 1 \right) \right]^2}$	0 à ∞	0
Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}$	$-\infty$ à 1	1

Où :

M_i et S_i sont respectivement les débits observés et simulés au jour i ;

\bar{M} et \bar{S} sont respectivement les débits moyens observés et moyens simulés sur la période considérée;

σ_m et σ_s sont respectivement l'écart type des débits observés et celui des débits simulés;

r = Coefficient de corrélation de Pearson

R^2 = Coefficient de détermination

KGE = Coefficient de Kling Gupta

NSE = Coefficient de Nash Sutcliffe

L'analyse s'est plus focalisée sur les critères KGE et NSE. En effet, le KGE peut être décomposé en corrélation, biais et variabilité relative entre les variables simulées et observées. Le NSE quant à lui est beaucoup utilisé pour les études hydrologiques (D. N. Moriasi et al., 2007). Dans cette étude, nous considérons que les valeurs de KGE supérieures à 0.5 sont bonnes et que les valeurs et 0.7 sont très bonnes. Il en est de même pour le coefficient de Nash-Sutcliffe.

Le tableau ci-dessous indique les performances du modèle sur les 27 stations hydrométriques considérées pour l'évaluation :

Stations	NSE	r	R2	KGE
Ansongo	0.7	0.86	0.74	0.82
Banakoro	0.27	0.89	0.79	0.08
Baro_Guinee	-0.29	0.74	0.54	-0.26
Baro_Nig	-5.1	0.5	0.25	-0.85
Barou_Mekrou	0.87	0.94	0.89	0.89
Bougouni	0.67	0.85	0.73	0.64
Dioila	0.36	0.84	0.7	0.4
Douna	0.36	0.78	0.61	0.56
Faranah	0.31	0.74	0.54	0.61
Garbey	-0.01	0.57	0.32	0.46
Garbey_Kourou	0.34	0.75	0.56	0.67
Garoua	-0.15	0.64	0.41	0.45
JebbaBridge	-13.7	0.43	0.18	-2.24
JidereBode	-0.56	0.78	0.61	0.13
Kandadji	0.55	0.83	0.69	0.74
Kende	0.68	0.86	0.74	0.73
Kompongou	0.7	0.84	0.71	0.82
Koulikoro	0.24	0.85	0.72	0.11
Kouro	-0.47	0.58	0.34	0.2
Kouroussa	0.36	0.83	0.69	0.19
Lokoja	0.12	0.83	0.69	0.37
Makurdi	-0.05	0.65	0.42	0.06
Malanville	-0.53	0.77	0.59	0.19
Niamey	0.58	0.86	0.73	0.72

Onitcha	0.1	0.92	0.84	0.24
Pankourou	0.5	0.84	0.71	0.31
Tossaye	0.76	0.91	0.83	0.81
Wuya	-1.51	0.59	0.35	0.04

En moyenne, 40% des stations hydrométriques considérées ont leur KGE supérieur à 0.5 et 25% d'entre elles ont leur KGE supérieur à 0.7 (figure 7). 32% des stations ont leur NSE supérieur à 0.5 et 14% d'entre elles ont leur NSE supérieur à 0.7 (figure 8). Le coefficient de détermination moyen des 28 stations hydrométriques est de 0.6. Le coefficient de corrélation moyen quant à lui est de 0.77 (figure 9).

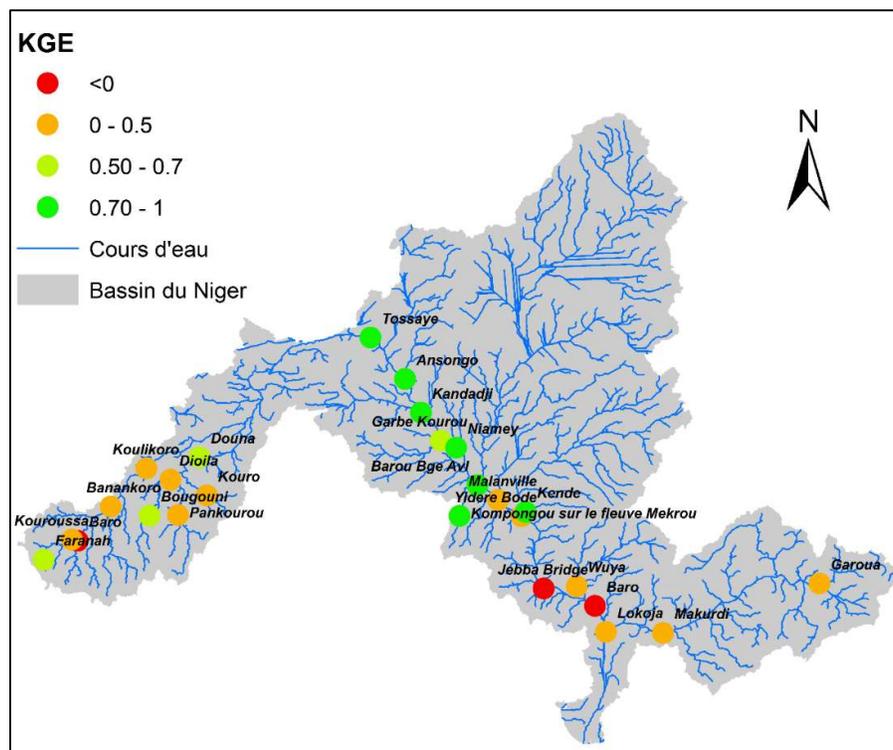


Figure 7: Répartition spatiale du KGE

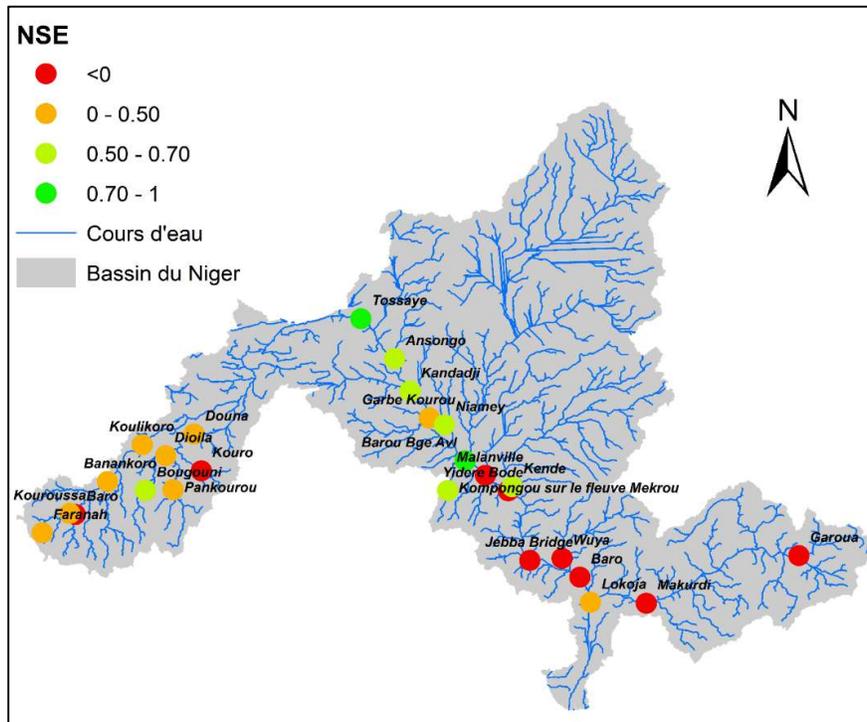


Figure 8: Répartition spatiale du NSE

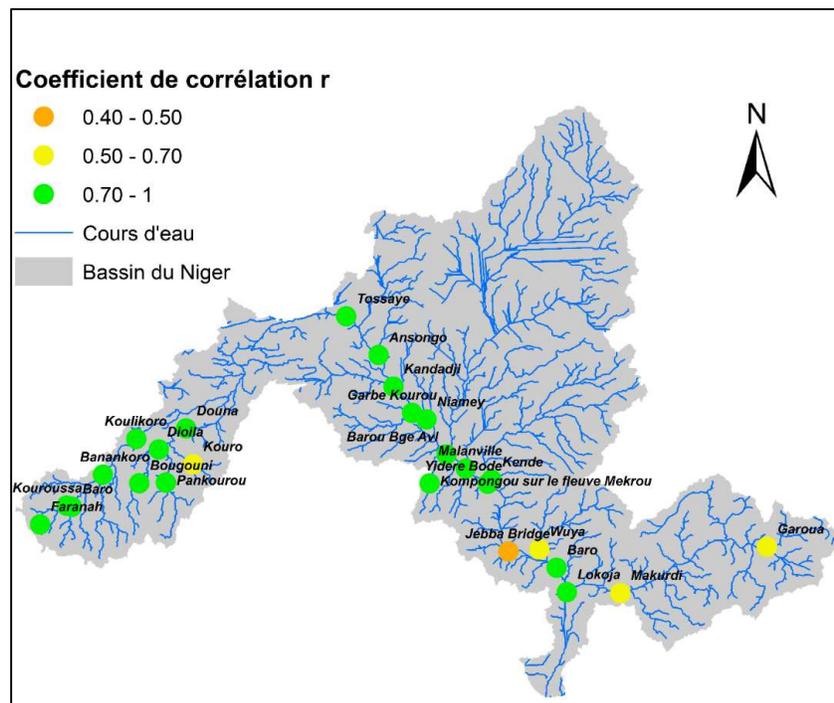


Figure 9: Répartition spatiale du coefficient de corrélation

Les figures ci-dessus illustrent la comparaison entre les débits observés et les débits simulés sur quelques stations du bassin :

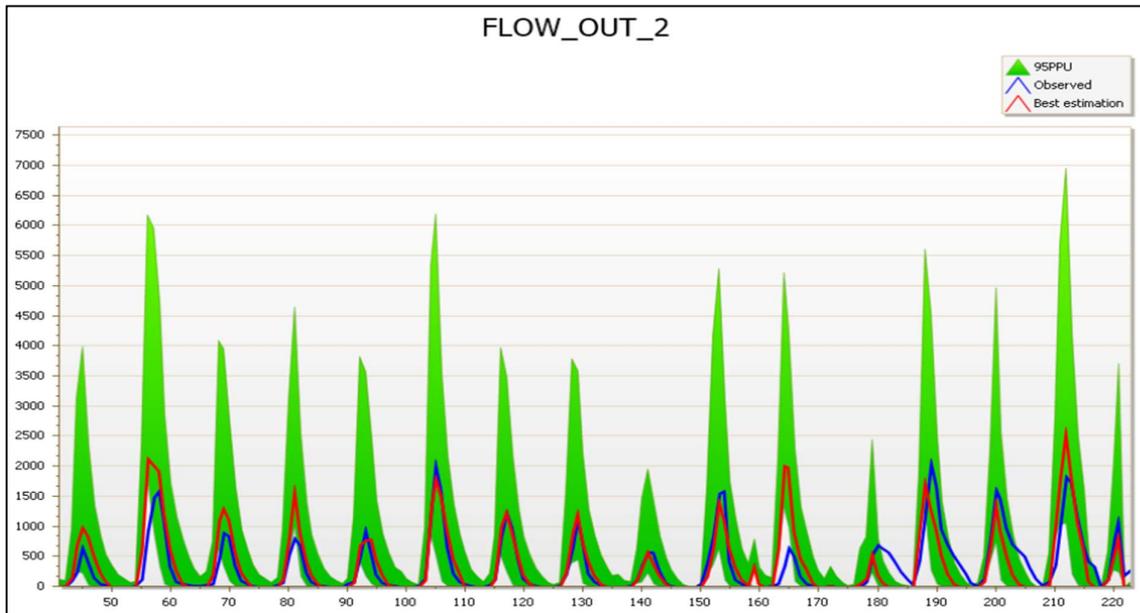


Figure 6: Station de Douna (Bassin du Bani)

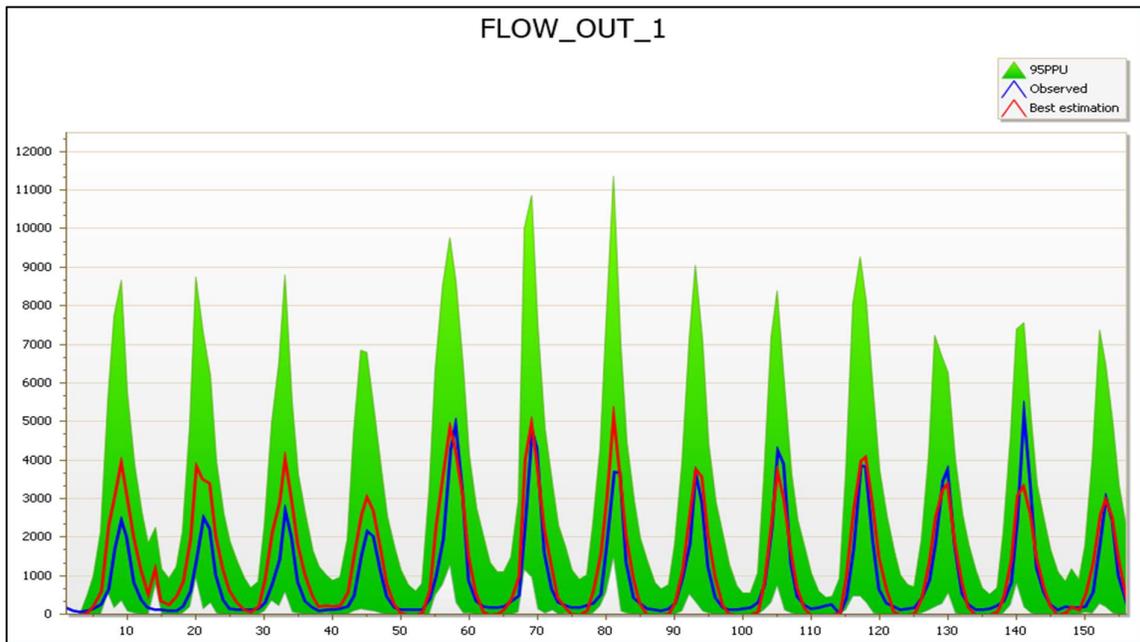


Figure 7: Station de Koulikoro (Niger Supérieur)

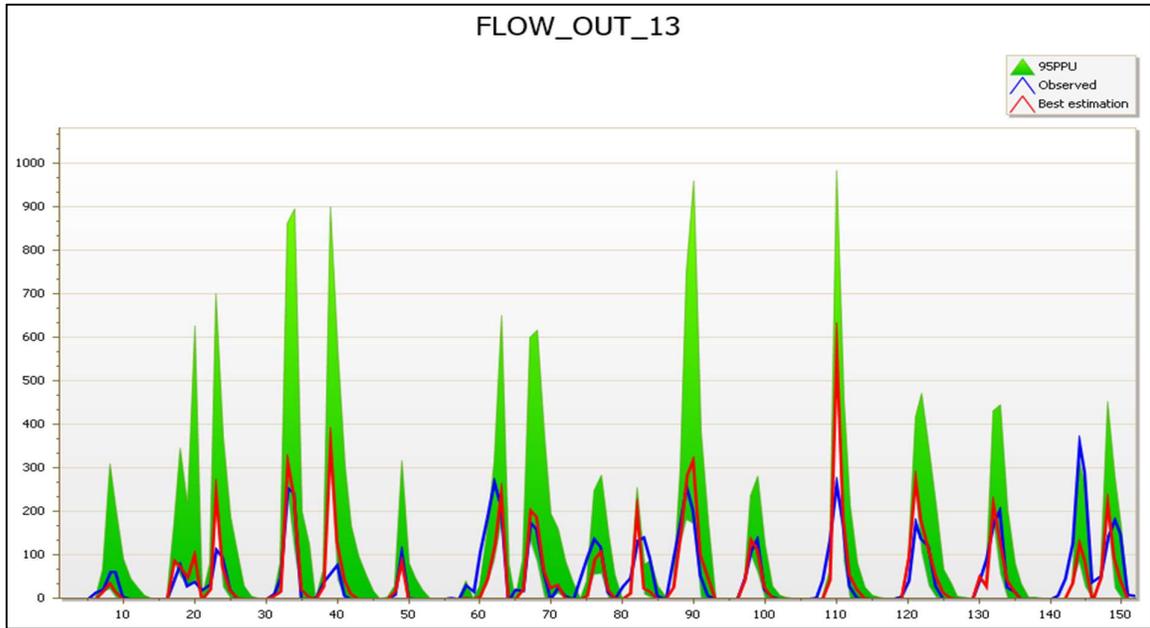


Figure 8: Station de Garbey-Kourou (Bassin de la Sirba, Niger Moyen)

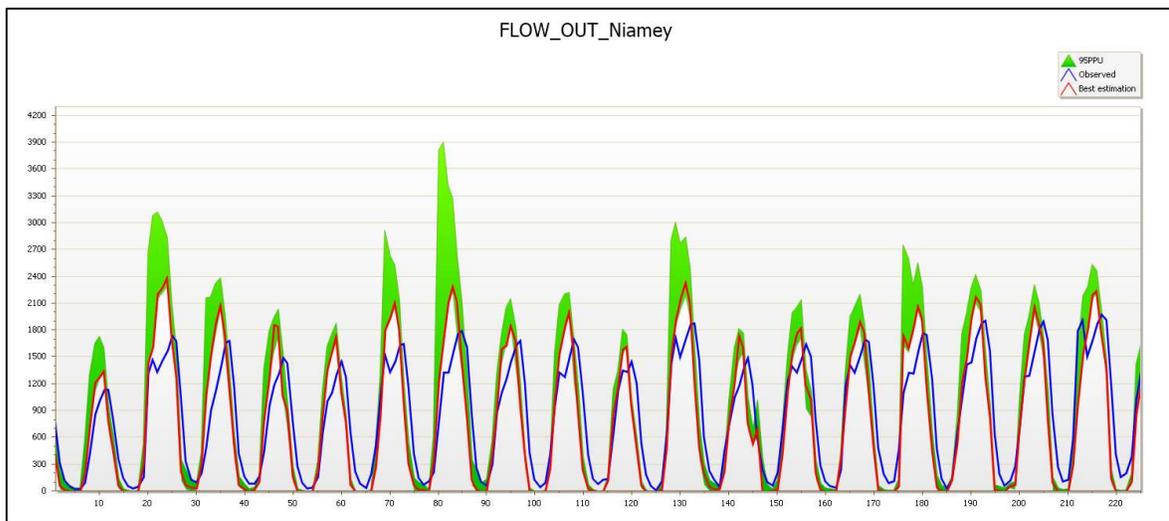


Figure 9: Station de Niamey (Cours principal du fleuve Niger, Niger Moyen)

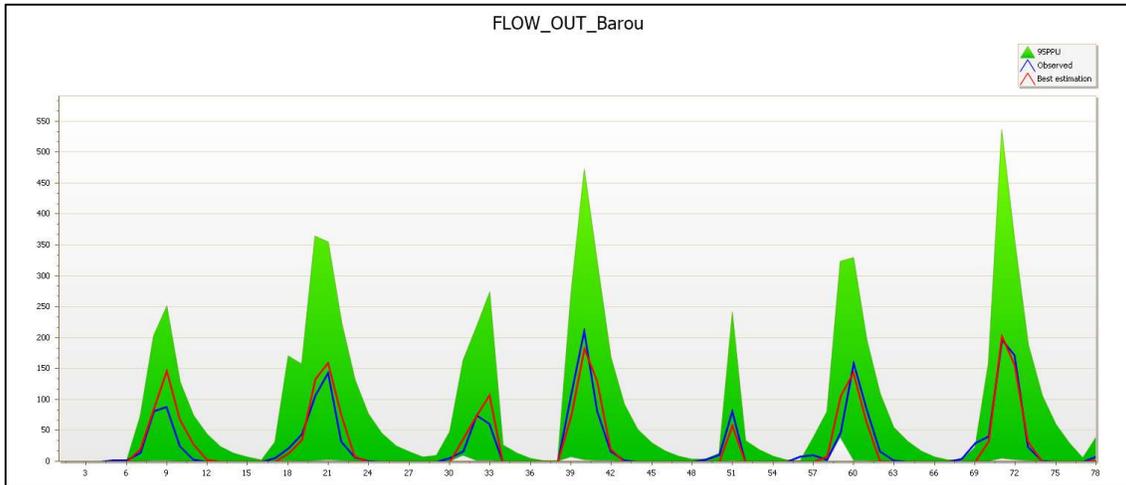


Figure 10: Station de Barou (Bassin de la Mékrou, Niger Moyen)

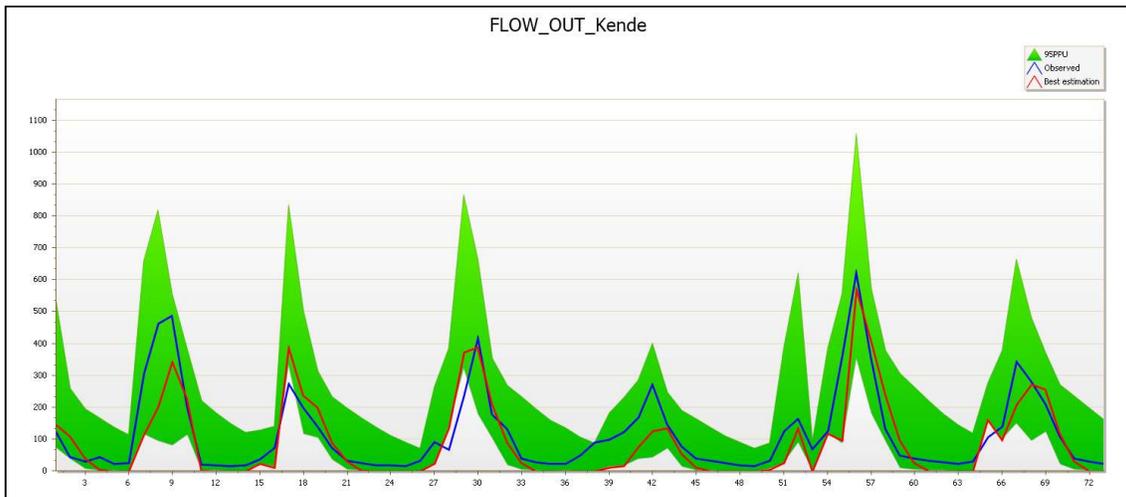


Figure 11: Station de Kendé (Bassin amont de Kende, Niger Inférieur)

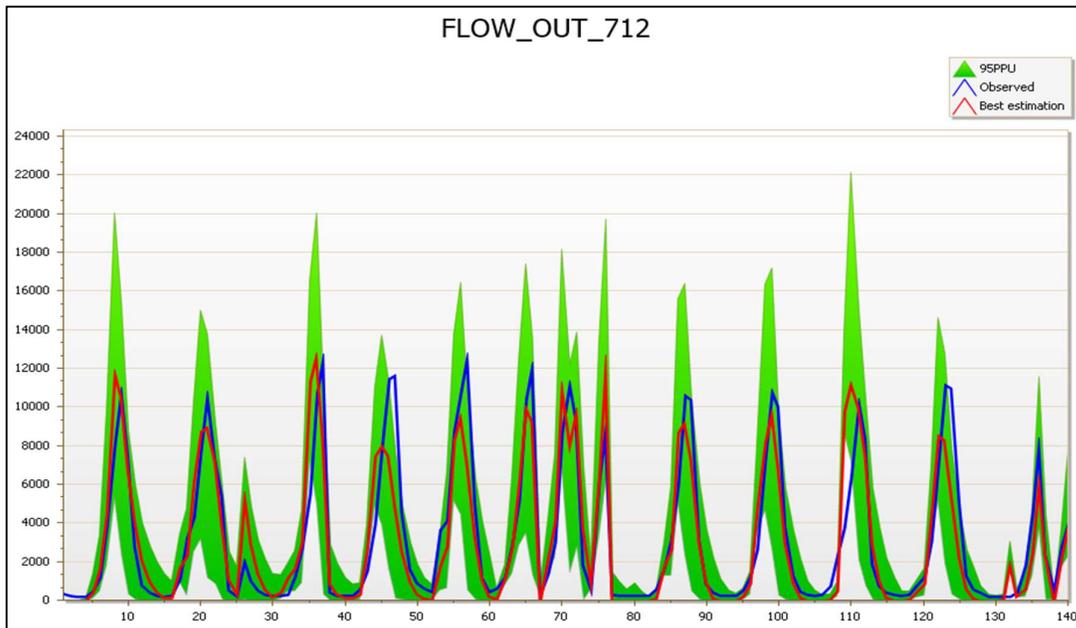


Figure 12: Station de Makurdi (Bassin de la Bénoué)

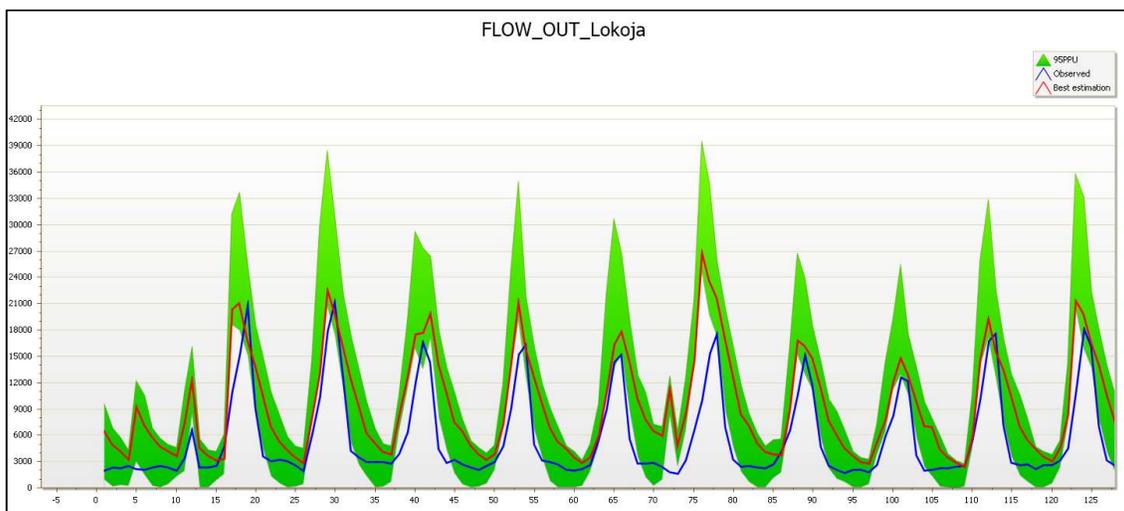


Figure 13: Station de Lokoja (Cours principal du fleuve Niger)

5. Etapes suivantes

Elles vont consister à l'évaluation de la disponibilité future des ressources en eau et à la définition des scénarios de gestion de ces ressources en eau. Cela inclue les scénarios climatiques, les hypothèses de gestion des ressources en eau, l'évaluation du Bilan Ressource/Besoin (bilan hydrique, utilisation de l'eau dans l'agriculture, énergie, hydroélectricité, disponibilité de l'eau face aux impacts climatiques et gestion des réservoirs).

Les scénarios climatiques que nous avons prévu d'utiliser dans le cadre de cette étude ont été obtenus en tournant les modèles climatiques AFR-44 CORDEX. Le domaine CORDEX AFRICA, abrégé en AFR-44, a une résolution de 0.44° et s'étend de 26.64°W à 60.28°E, et de 45.76°S à 42.24°N, qui compte 194 points de grilles dans la direction Est-Ouest et 201 points de grilles dans la direction Nord-Sud. Pour tenir compte des effets de bord, la simulation réelle a été réalisée sur une grille d'au moins 10 points de la grille d'addition dans chaque direction. En suivant les spécifications de CORDEX, une simulation historique couvrant la période 1951-2005 a été réalisée. Pour cette simulation, HIRHAM5 a été tourné avec les données historiques d'EC-EARTH. Pour regarder le changement climatique prévu, deux différents scénarios ont été utilisés : RCP4.5 et RCP8.5. Le modèle EC-EARTH-HIRHAM5 a été tourné pour chacun de ces deux scénarios de 2006 à 2100 continuellement à la simulation historique. Les paramètres que nous avons considéré sont les précipitations, les températures minimales, les températures maximales sur la période 1990-2100.

Chaque modèle de production des données satellitaires souffrant de biais (les variables prévues par les modèles diffèrent dans une mesure plus ou moins grande de celles observées), il est prévu dans le cadre de cette étude une correction de biais de ces données climatiques utilisant la méthode quantile-quantile. Cette méthode avait été utilisée dans le cadre d'une précédente étude sur le bassin de la rivière Mékrou, affluent du fleuve Niger.

La correction de biais utilisera comme données de référence, les données historiques de ré-analyse d'ERA-Interim. Elle utilise une transformation statistique dont le but est de trouver une fonction h qui considère les données du modèle comme étant égale à la distribution des données observées suivant la formule ci-après :

$$P_o = h(P_m) \quad (1)$$

$P_o = \text{Données observées}$

$P_m = \text{Données du modèle}$

La transformation statistique est une application de la transformation intégrale probabilistique (Angus 1994) et si la distribution de la variable d'intérêt est connue, la transformation est définie comme suit :

$$P_o = F_o^{-1}(F_m(P_m)) \quad (2)$$

Où F_m est la fonction de distribution cumulative (CDF) de P_m et F_o^{-1} est l'inverse de la CDF correspondant à P_o .

L'objectif pratique est de trouver la meilleure approximation de h et différentes approches ont été proposées dans la littérature. La méthode choisie pour résoudre l'équation (2) a été d'utiliser les CDFs des valeurs observées et celles simulées. Suivant les procédures de Boé et al (2007), les CDFs sont estimées en utilisant des tables de percentiles empiriques. Les

valeurs entre les percentiles sont obtenues par interpolation linéaire. Le package « qmap » développé sous le langage R sera utilisé.

Il s'agira également comme prochaines tâches, de compléter la collecte des données sur l'occupation et l'utilisation des terres, sur la gestion des cultures et sur les activités d'irrigation.

6. Références

- Abbaspour, K.C., 2014. SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. *Sci. Technol.* <https://doi.org/10.1007/s00402-009-1032-4>
- ABN, 2018. Autorité du Bassin du Niger [WWW Document]. URL <http://www.abn.ne/> (accessed 1.1.18).
- Arnold, J.G., Fohrer, N., 2005. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrol. Process.* 19, 563–572. <https://doi.org/10.1002/hyp.5611>
- Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R.D., Griensven, A. van, Liew, M.W. Van, Kannan, N., Jha, M.K., 2012. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. *Trans. ASABE* 55, 1491–1508. <https://doi.org/10.13031/2013.42256>
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment Part I: model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34, 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Bartholomé, E., Belward, A.S., 2005. GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data. *Int. J. Remote Sens.* 26, 1959–1977. <https://doi.org/10.1080/01431160412331291297>
- Berrisford, P., Dee, D., Fielding, K., Fuentes, M., Kallberg, P., Kobayashi, S., Uppala, S., 2009. The ERA-Interim Archive. ERA Rep. Ser.
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, T. L. Veith, 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Trans. ASABE* 50, 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- FAO, IIASA, ISRIC, ISSCAS, JRC, 2009. Harmonized World Soil Database (version 1.1). FAO, Rome, Italy IIASA, Laxenburg, Austria. <https://doi.org/3123>
- Green, C.H., Tomer, M.D., Di Luzio, M., Arnold, J.G., n.d. HYDROLOGIC EVALUATION OF THE SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL FOR A LARGE TILE-DRAINED WATERSHED IN IOWA. *Trans. ASABE* 49, 413–422.
- Ibrahim, M., Wisser, D., Ali, A., Diekkrüger, B., Seidou, O., Mariko, A., Afouda, A., Ibrahim, M., Wisser, D., Ali, A., Diekkrüger, B., Seidou, O., Mariko, A., Afouda, A., 2017. Water Balance Analysis over the Niger Inland Delta-Mali: Spatio-Temporal Dynamics of the Flooded Area and Water Losses. *Hydrology* 4, 40. <https://doi.org/10.3390/hydrology4030040>
- Kassambara, B., Ganji, H., Kajisa, T., 2018. Impact of agricultural water allocation on the ecosystems in the Inner Niger River Delta. *Int. J. GEOMATE* 14, 164–170. <https://doi.org/10.21660/2018.42.7251>
- Khan, H.F., Yang, Y.C.E., Xie, H., Ringler, C., 2017. A coupled modeling framework for sustainable watershed management in transboundary river basins. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 6275–6288. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6275-2017>
- Poméon, T., Diekkrüger, B., Springer, A., Kusche, J., Eicker, A., 2018. Multi-Objective Validation of SWAT for Sparsely-Gauged West African River Basins—A Remote Sensing Approach. *Water* 10, 451. <https://doi.org/10.3390/w10040451>
- Thompson, J.R., Crawley, A., Kingston, D.G., 2016. GCM-related uncertainty for river flows and inundation under climate change: the Inner Niger Delta. *Hydrol. Sci. J.* 61, 2325–2347.

<https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1117173>

WWF, 2018. Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales [WWW Document]. URL <http://www.hydrosheds.org/> (accessed 8.28.18).