



 ETUDE DE L'IMPACT DU CHANGEMENT  
CLIMATIQUE PAR LA MODELISATION HYDROLOGIQUE :  
CAS DE CINQ SOUS BASSINS AU BURKINA FASO

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU  
**MASTER D'INGENIERIE EN GENIE CIVIL ET HYDRAULIQUE**  
OPTION : INFRASTRUCTURES ET RESEAUX HYDRAULIQUES / Eau Agricole

-----  
Présenté et soutenu publiquement le 18 Janvier 2016 par

**Koubra Goudja**

Travaux dirigés par :

**Dr Boubacar IBRAHIM**

Hydroclimatologue – Centre de Compétence WASCAL

**Prof. Harouna KARAMBIRI**

Enseignant – Chercheur

Fondation 2iE

Jury d'évaluation du stage : \_\_\_\_\_

Président : Dial NIANG

Membres et correcteurs : Ibrahim BOUBACAR

Fowe TAZENE

Chaim Vivien DOTO.....

**Promotion [2014/2015]**

*It is not the strongest of the species that survives, nor the most intelligent, but the one most responsive to change. —Charles Darwin*

## DEDICACES

---

Dans le silence de ma chambre, les souvenirs défilent dans ma tête. Plus que quelques jours pour boucler ce mémoire. En ces jours spéciaux de ma vie, Je pense à toi :

O cher père, Feu Goudja ABDELKHER, merci pour l'éducation, merci d'avoir été un père.

O ma douce mère, Halimé RAMDANE, merci pour tes sacrifices, merci d'avoir été le Roc sur lequel on s'est construit ;

O mon cher grand frère, Ramadane SEFAL NASSOUR, très tôt, t'a dû prendre soin de moi, merci pour ton bravoure, tes sacrifices, merci d'avoir été là.

O toi ma chère grande sœur, Aché GOUDJA, mon modèle, mon chewing gum, tu m'as toujours tenu la main, je te remercie.

O toi mon cher grand frère Annour GOUDJA, A ma classe de CP1, alors que tu n'étais qu'au primaire toi aussi, tu m'as appris à écrire sur les lignes d'un cahier. Merci pour cette attention. Mon brillant parcours scolaire te revient grand frère. Merci.

Je pense à vous, mes autres frères et sœurs. Je suis le dernier enfant GOUDJA à quitter le banc de l'école, en tant qu'ingénieure. Je n'y serais pas arrivée sans vous. Votre bonne conduite est mon inspiration. Merci d'être des frères et sœurs exemplaire.

A vous mes camarades, je ne citerais pas de nom par peur d'oublier certain. Merci d'avoir été mes compagnons de route pendant ces 5 ans. Chaque sourire, chaque bonjour, chaque visage m'a permis d'aller de l'avant. De belles amitiés en sont nées pour la vie. Sachez que je vous en suis reconnaissante. Je vous souhaite le meilleur à tous.

O Professeurs, Personnels, Cadres et mêmes vigiles du 2iE. C'est grâce à votre effort constant si je peux me permettre aujourd'hui de prétendre au titre d'ingénieure. Je vous en remercie.

*A vous tous précédemment cité, je vous dédie ce mémoire avec la mention spéciale.*

---

## REMERCIEMENTS

---

« Celui qui n'a pas remercié les hommes, n'a pas remercié Dieu ».

A l'issue de la rédaction de mes travaux de mémoire, je tiens à exprimer ma gratitude à tous ceux qui de près ou de loin, n'ont pas ménagé leurs efforts, afin que je puisse concevoir et rédiger ce document.

Mes remerciements vont à l'endroit de

WASCAL pour le financement du Programme de Recherche en Afrique de l'Ouest; Car c'est dans le cadre des objectifs poursuivis à travers ce programme que s'est inscrit le thème du présent mémoire;

Docteur Boubacar BARRY, Coordinateur du Centre de Compétence WASCAL Burkina Faso, pour m'avoir donné l'opportunité de faire ce stage au sein de son centre de recherche.

Docteur Boubacar IBRAHIM, hydroclimatologue WASCAL pour avoir supervisé ce travail en tant que Maître de stage et dont la disponibilité, l'encadrement et les critiques pertinentes m'ont permis de mieux orienter et faire cette étude.

Professeur Harouna KARAMBIRI, Enseignant-Chercheur et Directeur de l'école doctorale de la Fondation 2iE pour l'encadrement et la formation académique reçus. Votre rigueur scientifique, vos suggestions pertinentes et votre souci de l'excellence et du travail bien fait ont donné à ce mémoire, un contenu scientifique avéré.

Ingénieur Moussa SIDIBE, chercheur à WASCAL dont les observations et conseils m'ont guidé dans ces travaux.

Dr Keita AMADOU, pour m'avoir orienté et recommander à WASCAL ;

Tout le personnel du Centre de Compétence WASCAL.

Tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à cet travail. Trouvez ici, l'expression de ma profonde gratitude.

---

## *RESUME*

---

La région soudano-sahélienne du Burkina Faso est confrontée depuis les années 1970 à des problèmes liés à la disponibilité des ressources en eau. Ces problèmes sont dus à une forte variabilité interannuelle de la pluviométrie caractérisée par une baisse significative de la pluie au cours de la période de 1970 à 1990. Cette baisse de la pluviométrie a entraîné une modification du régime hydrologique de la plus part des cours d'eau de la région. La compréhension du phénomène a été rendu possible par la modélisation hydrologique avec le package Hydromad conçu sous R. le package dispose d'un ensemble de fonction de production et de plusieurs fonctions de transfert. Les débits à l'exutoire de Wayen et de Koriziena ont été bien simulés sous Hydromad. La prise en compte de la variabilité pluviométrique dans les simulations montre que la baisse de l'intensité pluviométrique à un impact plus élevé sur le ruissellement comparée à la baisse de la fréquence des pluies. Par exemple, une baisse de l'intensité de 30% entraine une baisse du ruissellement de 49% sur le bassin de Wayen et de 89% sur le bassin de Koriziena. L'augmentation de la fréquence des pluies entraine une augmentation presque linéaire sur le ruissellement. D'où, une prise en compte des impacts de la variabilité pluviométrique sur les écoulements d'un bassin permettra aux aménageurs de mieux concevoir les ouvrages hydrauliques afin de faire face aux effets néfastes des changements climatiques sur la ressource en eau.

### **Mots clés :**

Zone soudano-sahélienne

Burkina Faso ;

Modélisation hydrologique ;

Changement climatique ;

Variabilité pluviométrique ;

Adaptation aux changements climatiques.

---

## ABSTRACT

---

Since the early 1970s, the Sudano-Sahelian zone of Burkina Faso is threatened by water availability problems. The droughts recorded during the period 1970-1980, due to high rainfall variability have resulted into dramatic consequences. Hydrological modeling with the package under R Hydromad allowed to simulate the flows at the outlet of Wayen and Koriziena. Consideration of rainfall variability in simulations shows that the scenarios with reduced rainfall intensities affect more the runoff generation than the scenarios with reduced number of rainy days. For example, a 30% reduction of rainfall intensity results in approximately 49% reduction of runoff in the Wayen basin and up to 89% in the Koriziena basin. On the other hand, increasing rainfall amounts results in a linear increase of runoff. Hence, taking into account the challenges of water resource management under climate change conditions in the Sudano-Sahelian zone of Burkina Faso will allow planners to better design hydraulic structures.

**Keywords:**

Sudano- Sahelian;

Burkina Faso;

Hydrological modeling;

Climate change;

Rainfall variability;

Adaptation to climate change.

---

## **SIGLES ET ABREVIATIONS**

---

CMD: Catchment Moisture Deficit

CO2: Dioxyde de Carbone

CWI: Catchment Wetness Index

DGRE: Direction Générale de Ressources en Eau

DIRH: Direction de l'Inventaire des Ressources Hydrauliques

FAO: Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

FIT: Front Intertropical

GDEM : Global Digital Elevation Model

GES: Gaz à effet de serre

GIEC: Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GR4J: Génie Rural à 4 paramètres a pas de temps journaliers

IHACRES: Identification of unit Hydrographs and Component flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow data

SIEREM: Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eaux et leur Modélisation

ORSTOM: Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer

PNUE: Programme des Nations Unies pour l'Environnement

WASCAL: West African Science Center for Climate Change and Adapted Land Use

ZCIT: Zone de Convergence InterTropicale

## TABLES DE MATIERES

1-	Introduction Générale .....	1
1.1-	Introduction.....	1
1.2-	Problématique générale de l'étude.....	2
1.3-	Le changement climatique .....	3
1.4-	Contexte et Objectifs de l'étude .....	5
1.5-	Méthodologie générale de l'étude.....	6
2-	Présentation du cadre général de l'étude.....	7
2.1-	Le Sahel.....	7
2.1.1-	La particularité du Sahel.....	7
2.1.2-	Situation géographique et climatique du Sahel .....	8
2.1.3-	Le relief et l'hydrographie du Sahel.....	10
2.1.4-	La pédologie et la végétation du Sahel.....	10
2.2.	Présentation des bassins versants de l'étude .....	12
2.2.1-	Choix des bassins de l'étude.....	12
2.2.2-	Délimitation des bassins de l'étude .....	12
2.2.3-	Situation géographique des bassins de l'étude.....	14
2.2.4-	Le bassin versant de Wayen .....	15
2.2.5-	Le bassin versant de Noberé .....	17
2.2.6-	Le bassin versant de Dagou .....	19
2.2.7-	Le bassin versant de Rambo .....	21
2.2.7-	Le bassin versant de Koriziena .....	23
3-	Matériels et Méthodes.....	25
3.1-	Présentation des données hydro climatiques .....	25
3.2-	Analyse et critique des données hydro climatiques.....	26
3.3-	Modélisation hydrologique .....	28
3.3.1-	Principe de la modélisation hydrologique.....	28
3.3.2-	Présentation des modèles hydrologiques du package Hydromad.....	28
3.3.	Elaboration des scénarios hypothétiques de changement climatique .....	35
4-	Résultats et discussions.....	36
4.1-	Résultats des analyses pluviométriques.....	36
4.1.1-	Indice de Nicholson et du Filtre passe-bas de Hanning.....	36
4.1.2-	Test de Pettitt et du Test de Lee et Heghenian.....	37

---

4.2-	Résultats de la modélisation hydrologique du bassin de Wayen.....	38
4.2.1-	Calage et validation du modèle IHACRES sur le bassin de Wayen .....	38
4.2.2-	Calage et validation du modèle GR4J sur le bassin de Wayen .....	38
4.3-	Résultat de la modélisation hydrologique du bassin de Koriziena.....	39
4.3.1-	Calage et validation du modèle IHACRES sur le bassin de Koriziena.....	39
4.3.2-	Calage et validation du modèle GR4J sur le bassin de Koriziena .....	40
4.4-	-Résultat de la modélisation hydrologique du bassin de Noberé .....	40
4.4.1-	Calage du modèle IHACRES sur le bassin de Noberé .....	40
4.4.2-	Calage du modèle GR4J sur le bassin de Noberé .....	41
4.5.	Résultat de la modélisation hydrologique du bassin de Dagou .....	41
4.5.1-	Calage du modèle IHACRES sur le bassin de Dagou .....	41
4.5.2-	Calage du modèle GR4J sur le bassin de Dagou .....	41
4.6.	Résultat de la modélisation hydrologique du bassin de Rambo .....	42
4.6.1-	Calage du modèle IHACRES sur le bassin de Rambo .....	42
4.6.2-	Calage du modèle GR4J sur le bassin de Rambo .....	42
4.7.	Récapitulatif des modèles retenus pour les simulations .....	42
4.8.	Grappe des données d'entrées (P, Q, E) et des données de sorties (débits observés et simulés) de Wayen .....	43
4.9.	Grappe des données d'entrées (P, Q, E) et des données de sorties (débits observés et simulés) de Wayen .....	44
4.10.	Simulations sous les scénarios de variabilités pluviométriques.....	45
4.10.1-	Bassin de Wayen.....	45
4.10.2-	Bassin de Koriziena.....	46
4.11-	Discussions .....	47
5-	Proposition des stratégies d'adaptation au changement climatique .....	48

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1:</b> Situation géographiques et données des débits des cinq sous-bassins.....	12
<b>Tableau 2 :</b> Tableau récapitulatif du test de Pettitt et du test de Lee et Hagenian appliqué aux bassins d'étude.....	37
<b>Tableau 3:</b> Calage en années sèches et validations du modèle IHACRES sur Wayen.....	38
<b>Tableau 4:</b> Calage en années humides et validations du modèle IHACRES sur Wayen.....	38
<b>Tableau 5:</b> Calage et validations du modèle GR4J sur Wayen.....	39
<b>Tableau 6:</b> Calage en années sèches et validations du modèle IHACRES de Koriziena.....	39
<b>Tableau 7:</b> Calage en années humides et validations du modèle IHACRES sur Koriziena...	40
<b>Tableau 8:</b> Calage en années sèche du modèle GR4J de Koriziena.....	40
<b>Tableau 9:</b> Calage en années humides et validations du modèle IHACRES sur Noberé.....	40
<b>Tableau 10:</b> Calage en années et validations du modèle GR4J sur Noberé.....	41
<b>Tableau 11:</b> Calage en années sèches et validations du modèle IHACRES sur Dagou.....	41
<b>Tableau 12:</b> Calage en années sèches et validations du modèle GR4J sur Dagou.....	41
<b>Tableau 13:</b> Calage et validations du modèle IHACRES sur Rambo.....	42
<b>Tableau 14:</b> Calage et validations du modèle GR4J sur Rambo.....	42
<b>Tableau 15:</b> Modèle et Paramètres retenus pour le bassin de Wayen et Koriziena.....	42
<b>Tableau 16:</b> Diminution de la fréquence et de l'intensité pluviométrique à Wayen.....	45
<b>Tableau 17:</b> Augmentation de la hauteur de pluie de 10, 20 et 30%, bassin de Wayen.....	46
<b>Tableau 18:</b> Scénario de diminution de la hauteur et de l'intensité pluviométrique de Koriziena.....	46
<b>Tableau 19 :</b> Augmentation de la hauteur de pluie de 10, 20 et 30%, bassin de Koriziena....	47

## LISTES DES FIGURES

<b>Figure 1:</b> Carte de la répartition géographique des coefficients de variation des précipitations annuelles (Mitchell et Jones 2005).....	7
<b>Figure 2:</b> déplacement du FIT (Source : <a href="http://image.lachainemeteo.com/images/publicator_2009/">http://image.lachainemeteo.com/images/publicator_2009/</a> ).....	8
<b>Figure 3:</b> Profil géomorphologique typique des régions sahéliennes (Vlaar, 1992).....	11
<b>Figure 4:</b> Carte de situation des bassins de l'étude (Laclavère, G. (1993): Les Atlas Jeune Afrique. Atlas du Burkina Faso. – 2. éd.: 54. p.; Paris (les éditions j.a)).....	14
<b>Figure 5:</b> Bassin de Wayen.....	15
<b>Figure 6:</b> Courbe hypsométrique de Wayen.....	15
<b>Figure 7:</b> Carte d'occupation du sol, source: LANDSAT (1984-90) et SPOT (1986).....	16
<b>Figure 8:</b> Carte pédologique, source: ORSTOM carte pédologique de reconnaissance de la République de Haute-Volta (Centre ORSTOM de Dakar).....	16
<b>Figure 9:</b> Bassin de Noberé.....	17
<b>Figure 10:</b> Courbe hypsométrique de Noberé.....	17
<b>Figure 11:</b> Carte d'occupation des sols de Noberé, source: LANDSAT (1984-90) et SPOT (1986).....	18
<b>Figure 12:</b> Carte pédologique de Noberé, Source ORSTOM, carte pédologique de reconnaissance de la République de Haute-Volta.....	18
<b>Figure 13:</b> Bassin de Dagou.....	19
<b>Figure 14 :</b> Courbe Hypsométrique de Dagou.....	19
<b>Figure 15:</b> Carte d'occupation des sols de Dagou, Source LANDSAT (1984-90) et SPOT (1986).....	20
<b>Figure 16:</b> Carte de pédologie de Dagou, Source Centre ORSTOM de Dakar, Carte pédologique de reconnaissance de la République de Haute-Volta.....	20
<b>Figure 17:</b> Bassin de Rambo.....	21
<b>Figure 18:</b> Courbe hypsométrique de Rambo.....	21
<b>Figure 19:</b> Occupation des sols de Rambo, Source LANDSAT (1984-90) et SPOT (1986)..	22
<b>Figure 20:</b> Carte pédologique de Rambo, Source ORSTOM carte pédologique de reconnaissance de la République de Haute-Volta.....	22
<b>Figure 21:</b> Bassin de Koriziena.....	23
<b>Figure 22:</b> Courbe hypsométrique de Koriziena.....	23
<b>Figure 23:</b> Taux d'occupation du sol de Koriziena.....	24
<b>Figure 24:</b> Carte pédologique de Koriziena, Source ORSTOM carte pédologique de la République de Haute-Volta.....	24
<b>Figure 25:</b> Exemple de maillage, bassin de Noberé.....	25
<b>Figure 26:</b> Modèle IHACRES.....	28
<b>Figure 27:</b> Modèle GR4J.....	30
<b>Figure 28:</b> Indice de Nicholson et Filtre pass bas de Hanning de Wayen.....	36
<b>Figure 29:</b> Indices de Nicholson et Filtre pass bas de Hanning (à gauche Koriziena, à droite Rambo).....	36

---

<b>Figure 30:</b> Indices de Nicholson et Filtre pass bas de Hanning (à gauche Noberé, à droite Dagou).....	37
<b>Figure 31:</b> Graphe des données d'entrées du modèle (Pluie, Débit, Evapotranspiration) de Wayen.....	43
<b>Figure 32 :</b> Graphe des débits observés et simulés lors du calage de Wayen (1991-1994) ....	43
<b>Figure 33:</b> Graphe des débits observés et simulés lors de la validation de Wayen (1980-1990) .....	44
<b>Figure 34 :</b> Graphe des données d'entrées du modèle (Pluie, Débit, Evapotranspiration) de Koriziena .....	44
<b>Figure 35:</b> Graphe des débits observés et simulés lors du calage de Koriziena (1985-1990).	44
<b>Figure 36:</b> Graphe des débits observés et simulés lors de la validation de Koriziena (1996-2002).....	44
<b>Figure 37 :</b> Graphe des scénarios de diminution de la hauteur et de l'intensité de Wayen.....	45
<b>Figure 38:</b> Graphe des scénarios de diminution de la hauteur et de l'intensité de pluie de Koriziena .....	46

## 1- Introduction Générale

### 1.1- Introduction

L'eau douce est une ressource d'une importance vitale et un facteur de développement mondialement reconnue. Cette ressource ne représente que 2.5% du volume total en eau de la planète bleue (97.5% d'eau salée) et seulement 0.3% de cette eau douce constitue l'eau de surface. L'eau douce de surface est celle qui contribue à grande majorité dans la consommation humaine. Cependant cette ressource devient de plus en plus limitée dans le monde et particulièrement en Afrique. En effet, le continent Africain dispose d'un potentiel hydrologique assez important mais mal reparti accentué par des ruptures aux échelles locales et globales tel que les inondations et sécheresses et la réduction de débits des cours d'eau. (Mbaye 2011).

Les récentes sécheresses ont mis en exergue la variabilité de la pluviométrie en Afrique. En effet, la pluie, principale pourvoyeuse en eau douce est soumise à des irrégularités ces trois dernières décennies (Bates et al., 2008; Kandji et al., 2006; Mahe et al., 2005). En Afrique, Le Sahel se distingue comme l'une des régions où la variabilité climatique est la plus prononcée. La sécheresse qui y a sévit dans les années 1970-1980 a eu un impact significatif sur la vie des populations. Le déficit pluviométrique répété sur la région, en plus d'entraîner une baisse significative du rendement agricole (cultures pluviales), crée un déséquilibre dans l'approvisionnement en eau de la population et du cheptel ((Ibrahim, 2012).

L'Afrique est entrée dans une phase de croissance démographique conséquente. Les récentes études prévoient qu'un tiers de la population mondiale sera africain d'ici 2100 (Nations Unies 2015). L'explosion de la demande en eau qui a débuté au XX<sup>ème</sup> siècle va s'accroître. D'autre part, le développement et l'accroissement des activités de la population entraîne un rejet de gaz considérable ayant un impact non négligeable sur le climat terrestre. Des études prévoient une augmentation moyenne du réchauffement de l'Afrique qui pourrait atteindre 2 à 6°C d'ici 2100 (Hulme et al., 2001). Ces prévisions climatiques auront un impact certain sur les écoulements des bassins versants en Afrique.

La disponibilité de la ressource en eau devient un des défis majeurs que l'Afrique doit relever. Dans la zone sahélienne du Burkina Faso, la situation est particulièrement préoccupante. En effet, la presque totalité du territoire burkinabè repose sur du socle cristallin caractérisé par une faible infiltrabilité et une difficulté d'exploitation de l'eau souterraine. La quantité totale des ressources en eau renouvelable par habitant est inférieure à 1000m<sup>3</sup>/pers/an (FAO 2012). De ce fait, la compréhension des processus hydrologiques à l'origine des écoulements est d'une importance majeure.

En effet, le débit à l'exutoire d'un bassin versant est l'une des réponses du bassin versant face à un événement pluvieux. L'estimation des débits par la modélisation hydrologique requiert le choix d'un bassin versant représentatif de la zone d'étude et la connaissance de ses paramètres géomorphologiques et hydro climatiques.

La modélisation hydrologique est une représentation simplifiée de la réalité des phénomènes hydrologiques. Elle consiste à reproduire de façon satisfaisante les écoulements à l'exutoire d'un bassin versant. A l'échelle du bassin versant, elle permet d'offrir aux aménageurs des réponses pour une mobilisation et une gestion durable des ressources en eau. Une gestion durable des ressources en eau impose de disposer des outils performants et de prendre en compte l'évolution du climat. Une modélisation hydrologique effectuée sous différents scénarios de changements climatiques offre la possibilité de mieux évaluer la disponibilité des ressources en eau dans le futur.

## 1.2- Problématique générale

L'insuffisance de l'eau douce est l'un des principaux problèmes actuels et futures auxquels est confronté l'Afrique (Bates et al., 2008). D'ici 2025, la disponibilité en eau dans douze pays de l'Afrique serait comprise entre 1000 et 1700m<sup>3</sup>/personne/an et la population susceptible de subir un stress hydrique pourrait atteindre 460 millions de personnes principalement en Afrique Occidentale (PNUE/GRID-Arendal, 2002). D'après le scénario moyen des Nations Unies, la population de l'Afrique pourrait plus que quadrupler passant de 800 millions en 2000 à 3.6 milliards en 2100. Alors qu'un homme sur 7 vit aujourd'hui en Afrique, ce sera probablement 1 terrien sur 3 en 2100. Ces projections démographiques annoncent clairement que la pression sur l'eau dans les années à venir va se poursuivre tout en accélérant.

Malheureusement, le besoin croissant en eau se fait dans un contexte où la pluie, principale source d'eau douce, est sujette à des variabilités spatio-temporelles et où le mécanisme du changement climatique est enclenché. Des nombreuses études ont montré que le 20<sup>ème</sup> siècle a été marqué au Sahel par une baisse d'environ 25% des précipitations sur la période 1960-1990 par rapport aux décennies précédentes ((Karambiri et al., 2010) ;(Kandji et al., 2006); (Hulme *et al.*, 2001) ; (Nicholson *et al.*, 1999)). La température moyenne mondiale à augmenter de 0.6° au cours du siècle dernier avec des années les plus chaudes jamais enregistré survenus après 1990 (Kandji *et al.*, 2006). Des modèles basés sur un changement climatiques dû aux gaz à effet de serre suggèrent clairement que le réchauffement de l'Afrique se poursuivra pour atteindre une augmentation moyenne annuelle comprise entre 2° et 6°C d'ici 2100 (Hulme et al., 2001).

En Afrique, la zone sahélienne est très vulnérable au changement climatique en raison de sa position géographique bordant le désert du Sahara et de la grande dépendance de sa population à l'agriculture pluviale et à l'élevage ((Karambiri et al. 2010) ; (Kandji et al., 2006)). La sécheresse des années 1970 et 1980 a représenté un épisode particulièrement éprouvante pour les pays du Sahel, avec des pertes massives de la production dans les secteurs de l'agriculture et de l'élevage; des pertes en vie humaine dû à la faim, à la malnutrition et aux maladies; le déplacement massif des populations et la dévastation des économies (Kandji et al., 2006).

Depuis cette période bien médiatisée de la sécheresse au Sahel, des nombreuses théories ont été avancées pour expliquer l'apparition de cette sécheresse et autres anomalies climatiques à travers l'Afrique. Certaines de ces théories ont été strictement météorologique et / ou liées aux océans; d'autres ont mis l'accent sur les processus de feed-back liés aux changements de la surface terrestre couplé avec les changements météorologiques ou produit de façon indépendante par le biais des activités humaines (Nicholson, 2001). S'il est établi que les gaz à effet de serre ont un lien direct avec le réchauffement climatique, à l'heure actuelle, aucune preuve ne permet d'authentifier avec certitude le rôle des gaz à effet de serre dans le déclenchement ou l'aggravation de la sécheresse au Sahel (Christensen, et al, 2007). Ainsi la variabilité des précipitations du Sahel peut s'expliquer par des interactions complexes entre de nombreux processus, aucun ne permettant à lui seul d'expliquer une telle variabilité climatique (Buontempo et al., 2010).

Les conséquences désastreuses de la variabilité des précipitations au Sahel et les inquiétudes liées au fait que la plupart des modèles climatiques prévoit une diminution importante des précipitations (Buontempo et al., 2010) révèlent la nécessité de la compréhension du fonctionnement hydrologique du Sahel à travers ses bassins. L'évaluation des réponses hydrologiques des sous bassins soudano sahéliens sous divers scénarios de changement climatique permettra de déterminer les capacités en eau au sein des réservoirs. Ceci afin de s'assurer de couvrir durablement les besoins en eau de la population. Et aussi de prendre des dispositions nécessaires afin d'assurer la durabilité de cette ressource.

Le sahel du Burkina Faso, partie intégrante de cette région à problématique devra répondre aux défis climatiques futurs. Le Burkina Faso est un pays dont les ressources en eau souterraine sont très limitées du fait de la nature du substratum qui est le socle cristallin à grande majorité (Seguin, 2005) et de la faible porosité des aquifères compris entre 2% et 11% (DIRH, 1993). Les eaux de surface constituent la principale ressource en eau. Depuis les années 1960, le pays s'est investi dans la construction des retenus d'eau. On dénombre à ce jour plus de 1500 retenues réparties sur tout le territoire burkinabé (DGRE). La pression est encore plus grande sur les sous bassins soudano-sahéliens du Burkina Faso, dont la variabilité pluviométrique a un impact direct sur ces ressources en eau.

### **1.3- Le changement climatique**

La terre a connu plusieurs changements climatiques dans son évolution. Des périodes glacières alternant avec des périodes plus chaudes. En étudiant les carottes glacières, on sait aujourd'hui que ces cycles durent à peu près 100 000 ans. En effet les changements climatiques désignent une variation de l'état du climat qui peut être identifiée (par exemple à l'aide de tests statistiques) par des changements affectant la moyenne et/ou la variabilité de ses propriétés, persistant pendant de longues périodes, généralement des décennies ou plus.

Si le phénomène de changement climatique, n'est pas nouveau, la vitesse à laquelle ce changement s'effectue ne cesse de croître. L'augmentation de la température, du niveau moyen de la mer et des catastrophes naturelles est une manifestation du changement. Ces

événements coïncident avec la révolution industrielle. L'activité humaine est donc pointée du doigt notamment par l'émission des gaz à effet de serre (GES) tel que le dioxyde de carbone.

Les gaz à effet de serre jouent un rôle essentiel dans la régulation de la température terrestre. Lorsque la terre reçoit de l'énergie du soleil sous forme de rayonnement, une partie est réfléchiée dans l'atmosphère par les nuages ou la surface de la terre. Le reste est absorbé momentanément avant d'être rejeté sous forme de chaleur. Les gaz à effet de serre interviennent alors pour bloquer partiellement les rayons infrarouges permettant d'augmenter la chaleur moyenne à la surface de la terre.

Dès 1896, un scientifique suédois, Svante Arrhenius a émis l'hypothèse que la combustion des énergies fossiles par l'homme pourrait provoquer une augmentation conséquente de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, entraînant une progression arithmétique des températures. Longtemps abandonnée, cette théorie a ressurgi dans les années 1950. Il devient de plus en plus certain qu'il y'a un lien direct entre les activités humaines et l'accroissement des températures. Le 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC sur les changements climatiques et leurs évolutions futures le juge même extrêmement probable (+95% de chances). (<http://leclimatchange.fr/>)

Si l'homme est reconnu aujourd'hui comme le principal responsable du réchauffement climatique, il est aussi celui qui peut changer les cours de choses. Avant d'en arriver là, chaque personne souhaiterait avoir des preuves irréfutables du changement climatique et des prévisions précises quant aux conséquences à venir. C'est dans cette optique d'apporter des réponses claires que le Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat(GIEC) a été créé. Il regroupe plus de 2500 chercheurs issus du monde entier ayant pour mission d'évaluer les informations scientifiques, techniques et socioéconomiques permettant de comprendre les changements climatiques, leurs impacts potentiels et les options en matière d'adaptation et d'atténuation (<http://www.un.org/fr/climatechange/ipccreports.shtml>.)

Les nouveaux scénarios à court et moyen terme du changement climatique élaborés par le groupe prévoit dans son 5<sup>ème</sup> rapport une hausse du niveau des mers, tous scénarios confondus, située entre 29 et 82 centimètres d'ici la fin du 21<sup>ème</sup> siècle et revoit à la baisse l'effet refroidissant des aérosols. Selon le même rapport, seul une réduction du gaz à effet de serre(GES) par la communauté selon le scénario ambitieux RCP2.6 nous permettra de maintenir la hausse des températures sous le seuil des 2°C. Une augmentation au-delà de ce seuil aura un impact irréversible sur la planète selon le GIEC.

Les impacts observés du changement climatiques sont néfastes les uns plus que les autres. Sur la ressource en eau par exemple, la modification des schémas des précipitations (des pluies plus fortes mais plus rares par exemple), modifient les systèmes hydrologiques, et perturbent les ressources en eau. De même sur la biodiversité, les espèces terrestres, ainsi que les espèces d'eau douce et d'eau de mer modifient leurs zones de répartition géographique, leurs déplacements migratoires ainsi que leurs activités saisonnières.

A cela s'ajoute les risques à venir, lié aux changements climatiques tel que les risques liés à la disponibilité en eau douce, à la qualité des eaux disponibles, les risques sur les espèces animales, sur les écosystèmes terrestres et maritimes, les risques liés à la production alimentaire, à l'accroissement des inégalités et des conflits armés... Ces risques peuvent variés considérablement dans le temps et dans l'espace.

On peut aujourd'hui estimer la part de chaque pays dans l'émission de GES et par conséquent son poids dans le changement climatique. Cependant il est pratiquement impossible de contrôler la zone de survenance des événements extrêmes liés aux changements climatiques. L'Afrique est le continent qui contribue le moins au réchauffement climatique mais subit paradoxalement les mêmes conséquences sinon plus grave encore du changement climatique que les autres continents. Le Sahel en est l'exemple.

Le Sahel, zone très sensible au changement climatique, fait l'objet de nombreuses recherches de nos jours, afin de prévoir les modifications et d'atténuer les impacts du changement climatique. Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse à l'étude des impacts du changement climatique sur la ressource en eau de la zone sahéenne du Burkina Faso. Cela, afin, de prévoir les bouleversements possibles du a une variabilité de la pluviométrie sur cette zone et de prendre les dispositions adéquates pour atténuer les conséquences.

#### **1.4- Objectifs de l'étude**

La présente étude s'inscrit dans le cadre d'une étude menée par WASCAL sur l'évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau de l'Afrique de l'Ouest. L'objectif général de cette étude vise à évaluer les impacts du changement climatique sur la ressource en eau de quelques sous bassins soudano sahéens du Burkina Faso par la modélisation de leurs fonctionnements hydrologiques.

Les objectifs spécifiques assignés à ces travaux consistent à :

1. L'analyse et la critique des données historiques ;
2. Le choix et la mise en œuvre d'un ensemble de modèles hydrologiques du package Hydromad;
3. L'évaluation des impacts du changement climatique en termes de variabilité pluviométrique sur les sous bassins soudano sahéens ;
4. Et enfin la proposition de stratégies d'adaptation face aux réponses des bassins.

#### **Questions de recherche**

Le présent travail qui porte sur l'étude des impacts du changement climatique sur des sous bassins soudano-sahéliens du Burkina Faso cherche à apporter des réponses aux questions suivantes :

-Quels sont les modèles hydrologiques du package Hydromad les mieux adaptés aux bassins soudano-sahéliens du Burkina Faso choisis dans le cadre de l'étude ?

-Quelles sont les réponses des sous bassins sous l'impact du changement climatique à travers la construction des scénarios hypothétiques de variabilité pluviométrique ?

---

- Quelles sont les stratégies à adoptées pour minimiser les impacts négatifs et maximiser les impacts positifs des réponses hydrologiques des sous bassins soudano-sahéliens sous les conditions du changement climatique.

### 1.5- Méthodologie générale de l'étude

La méthodologie générale du travail consiste dans un 1<sup>er</sup> temps à choisir les sous bassins soudano-sahéliens au Burkina Faso objet de l'étude. Les sous bassins retenus disposeront d'au moins 25 années de données historiques récentes au sein de leurs stations météorologiques et de moins de 25% de lacunes. Chacune des sous bassins sera délimité par des méthodes de digitalisations à partir des Modèles Numériques de Terrain. Suite à ce travail de délimitation, leurs caractéristiques morphologiques et hydrométriques seront déterminées.

Dans un 2<sup>nd</sup> temps, les données hydro-climatiques (Pluie et Débit) seront analysées. L'analyse des données hydro climatiques portera essentiellement sur la caractérisation des données par des tests de Pettitt et de Lee et Hagnenian. La détection des ruptures dans les séries des données par l'indice de Nicholson ou le filtre by pass de Hanning.

Dans un 3<sup>eme</sup> temps, les modèles hydrologiques du package Hydromad seront implémentés. Il s'agit ici de caler et de valider un ensemble de modèles hydrologiques du package disposant chacun d'une fonction de transfert et d'une fonction de production et retenir pour la suite du travail, la meilleure combinaison de fonction de production et de transfert du modèle.

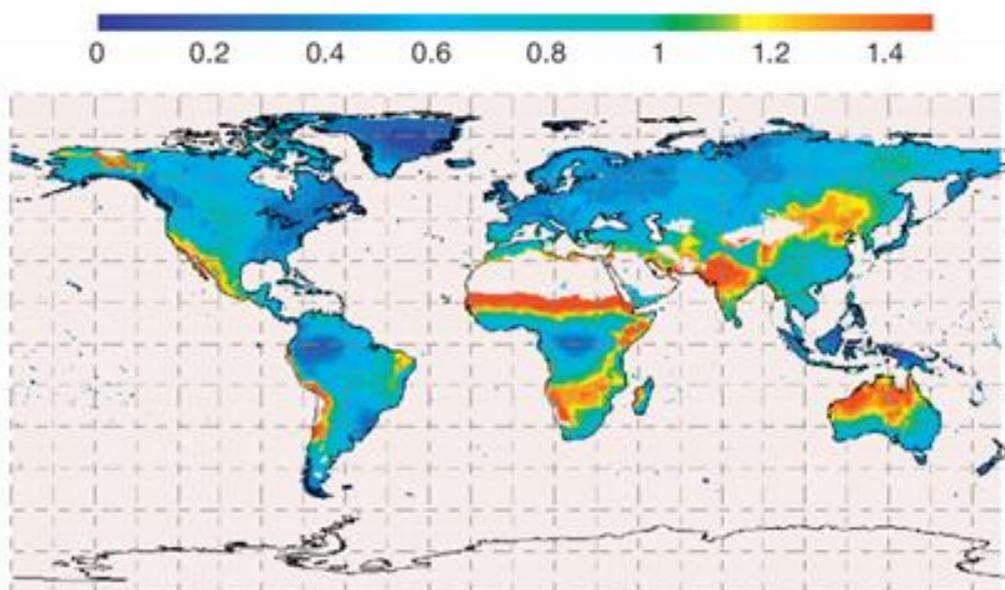
Enfin, on effectuera des simulations avec les modèles hydrologiques dans un contexte de changements climatiques futurs liés à une variabilité pluviométrique. On évaluera la réponse hydrologique de ces sous bassins soudano-sahéliens face à ces variabilités. Suivant les résultats obtenus, des stratégies à prendre en compte pour assurer la disponibilité durable des ressources en eau de ces sous bassins seront proposées.

## 2- Présentation du cadre général de l'étude

### 2.1- Le Sahel

#### 2.1.1- La particularité du Sahel

D'origine arabe, le mot sahel signifie rivage. Un rivage bordant au Nord l'immense étendue du désert saharien et au Sud la zone humide soudanienne. Il s'étend sur 3860 kilomètres sur toute la largeur du continent africain. Le sahel traverse une dizaine de pays africains dont la partie septentrionale du Burkina Faso et se démarque par sa grande mouvance, sa forte variabilité pluviométrique et sa vulnérabilité au changement climatique comme le montre la figure ci-dessous.



**Figure 1:** Carte de la répartition géographique des coefficients de variation des précipitations annuelles (Mitchell et Jones 2005)

Cette carte

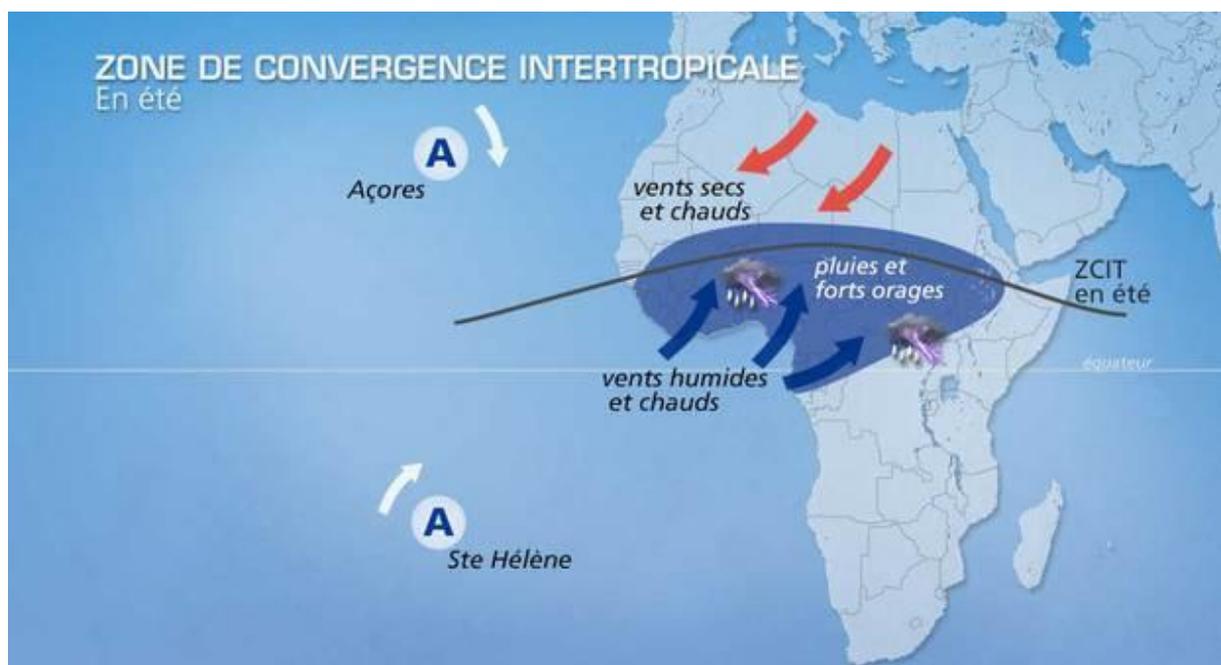
Au Sahel, la répartition saisonnière des précipitations est très inégale. Malgré l'existence occasionnelle de pluies en saison sèche (seul décembre est rigoureusement sec depuis 1905), 90% du total pluviométrique est relevé entre juin et septembre, dont 60% en juillet et en août (FAVREAU 2000). A cela s'ajoute une importante variabilité spatiale et temporelle. En effet, au cours des périodes sèches des années 1970-1980, non seulement la pluviométrie a été inférieure à son niveau habituel mais les limites géographiques de la zone humide se sont considérablement déplacé vers le Sud (Buontempo et al., 2010). Ainsi certains experts ont adopté une délimitation pluviométrique situant la frontière Nord du Sahel à partir de la ligne de précipitations de l'ordre de 200 à 300mm par an et au Sud par des précipitations atteignant 600 à 700mm à la frontière soudanaise. D'autres par contre suggèrent de définir le Sahel

comme la région bornée par les longitudes 20° Ouest et 20° Est et les latitudes 10° et 20° Nord (Chappell and Agnew, 2004). Du point de vue hydrologique, il est admis que le sahel correspond à une zone où il y'a disparition des cours d'eau à écoulement permanent, apparition des vastes zones inondables et tendance à un certain endoréisme (Mounirou, 2012).

### 2.1.2- Situation géographique et climatique du Sahel

Le sahel possède un climat semi-aride chaud, chaud parce que la température annuelle moyenne la moins chaude est toujours supérieure ou égal à 18°C, semi-aride car les précipitations annuelles moyennes sont assez basses entre 250mm et 450mm. Le sahel est caractérisé par un régime pluviométrique unimodal avec une saison de pluie de Juin à Octobre et une saison sèche de Novembre à Mai (Mounirou, 2012). Les pluies permettent d'assurer une végétation et un écoulement des eaux à un rythme saisonnier.

La dynamique des vents sur le Sahel se caractérise par une poussée de la masse d'air humide venant de l'océan Atlantique par l'anticyclone S<sup>te</sup> Helene et une poussée de la masse d'air sec par l'anticyclone saharien. Ces deux masses d'air circulent dans les basses couches atmosphériques (inférieure à 3 km) d'altitude et porte le nom d'alizé. L'alizé du Sud qui traverse l'océan et les zones forestières chargé de vapeur s'appelle la Mousson et l'alizé venant du Nord et traversant la zone désertique porte le nom de l'Harmattan. L'affaiblissement ou le renforcement de ces deux masses déterminent la position du Front Intertropical (FIT) qui marque quant à lui la limite Nord du front de la mousson à l'intérieur du continent (Boubacar, 2012). Au sahel, les précipitations sont essentiellement reçues sous formes d'orages violents donnant lieu à un fort ruissellement de type horticarien (l'intensité de pluie dépasse la capacité d'infiltration des sols).



**Figure 2:**déplacement du FIT (Source :[http://image.lachainemeteo.com/images/publicator\\_2009/](http://image.lachainemeteo.com/images/publicator_2009/))



### 2.1.3- Le relief et l'hydrographie du Sahel

Les limites du Sahel s'étant modifiées ces dernières années, il est difficile de faire ressortir ses caractéristiques géomorphologiques propres. Il est néanmoins caractérisé par l'étendue des dunes fossiles aujourd'hui fixées par la végétation et datées de l'Ogolien. Ce qui prouve que le Sahara à l'époque de pléistocène supérieur s'étendait jusqu'à plus de 500kilomètres plus au Sud de sa limite actuelle. Excepté les grands fleuves allochtones (Sénégal, Niger, Logone-Chari et Nil), le réseau hydrographique sahélien est constitué de cours d'eau éphémères débouchant dans des mares et petits lacs temporaires (endoréiques). Ceux-ci ont un rôle écologique important car ils constituent généralement le seul moyen d'approvisionnement en eau pour la faune durant la saison sèche. La mare sahélienne peut, lorsqu'elle est suffisamment large, se maintenir en conséquence plus longtemps, former un oasis avec une végétation ligneuse abondante. Au Burkina Faso, en plus des cours d'eau temporaire, on y trouve les cours d'eau permanent à savoir le fleuve Volta et le Fleuve Niger. Le fleuve Volta s'écoule du Nord vers le Sud et le Fleuve Niger du Sud vers le Nord.

### 2.1.4- La pédologie et la végétation du Sahel

Au Sahel, les sols sont majoritairement sableux, rouge-jaunâtres et légèrement acides. Quelques vertisols sont présents dans des dépressions. Des sols peu profonds sur cuirasse latéritique sont communs dans la moitié sud de la bande sahélienne. Les sols sont généralement déficients en phosphore et azote. La matière organique ne constitue guère plus de 1 % de la couche superficielle.

La végétation sahélienne peut être classée en quatre groupes de formations à savoir la steppe arborée et arbustive, la steppe herbacée, le fourré tigré ou brousse tigrée, les forêts galeries et formations de marigot.

La steppe arborée, arbustive ou herbacée sont généralement des espèces ligneuses. Selon l'abondance des plantes ligneuses on parlera de steppes herbacées et/ou graminéenne, buissonnante, arborée et/ou arbustive. Elles permettent difficilement de définir des zones, leur apparition et disparition étant graduelles et leur distribution se chevauchant largement

Le fourré tigré ou brousse tigrée est une végétation qui pousse sur les plateaux latéritiques sahéliens. Il a souvent un aspect strié, ou en rosaces sur les photographies aériennes. Ce phénomène se produit également dans les autres régions semi-arides du monde.

En raison de la rareté de l'eau, les arbres sahéliens ont généralement un faible développement aérien et un grand développement souterrain. Dans les zones à sol profond et fragmenté des racines traçantes peuvent aller chercher de l'eau jusqu'à la nappe phréatique.

## Profil type de la géomorphologie du Sahel

Le profil géomorphologique type du Sahel est constitué de quatre zones bien marquées qui sont la zone collinaire, le glacis supérieur, le glacis inférieur et le bas fond.

La zone collinaire est faite de plateau et versants. Les plateaux sont en matériaux indurés et cimentés et les versants sont en matériaux latéritiques à pente raides à ruissellement intense. Les sols sont acides, pauvres et peu profonds constitués de lithosols et de sols minéraux brutes.

Le glacis supérieur concentre les cônes de déjection en matériaux sableux ou les eaux s'infiltrent faiblement. On y rencontre les alfisols, les sols ferrugineux peu lessivés et les sols ferrugineux lessivés contenant des horizons d'accumulation de fer et d'argile.

Le glacis inférieur à pente faible et ruissellement en nappe dont les sols sont argilo-limoneux et sableux.

Le bas-fond est la zone d'accumulation des matériaux charriés par le ruissellement. Il est marqué généralement par la présence d'un cours d'eau. C'est dans cette zone que se trouvent les ouvrages de mobilisation des ressources en eau.

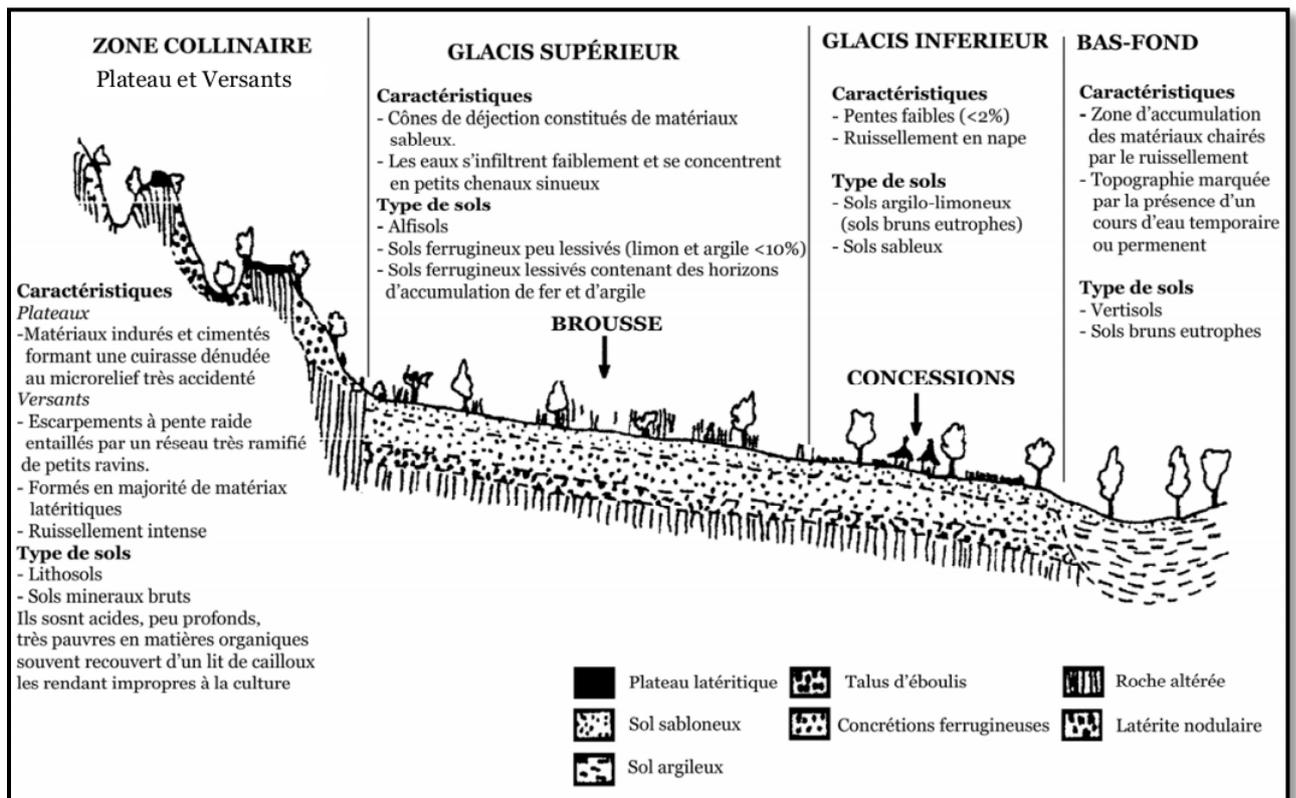


Figure 3: Profil géomorphologique typique des régions sahéliennes (Vlaar, 1992)

## 2.2. Présentation des bassins versants de l'étude

### 2.2.1- Choix des bassins de l'étude

Le choix des sites de l'étude, à savoir les sous bassins soudano-sahéliens du Burkina Faso s'est fait sur la base de la disponibilité des séries de débits journalières suffisantes (au moins 25 ans) et de la représentativité des bassins dans la zone sahélienne. Pour cela, tous les sous bassins sahéliens disposant d'au moins 25 années de données ont été répertoriés. Les séries de débits ont été obtenues auprès de la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE) du Burkina Faso et au niveau des fournisseurs de données. Grâce à un script exécutable sur R, le pourcentage des lacunes et leurs distributions dans la série ont été ressortit (voir annexe I). Les sous bassins retenus sont ceux disposant d'au moins 25ans de données avec moins 25% de lacunes, et au moins 5 années consécutives des données sans lacunes. Les sous bassins répondant à ces critères sont le Gorouol à Koriziena et le Bonsoaga à Dagou situés sur le bassin du Niger ; le Nakambe à Wayen, le Nakambe à Rambo et le Nazinon à Noberé situé sur le bassin de la Volta.

**Tableau 1:** Situation géographiques et données des débits des cinq sous-bassins

Nom de la Station	Nom du cours d'eau	Nom du bassin principal	Coordonnées de l'exutoire		Périodes de débits	Lacunes (%)
			Latitude	Longitude		
Wayen	Nakambe	Volta	12°23'00"N	01°05'00"W	1976-2009	10,15
Noberé	Nazinon	Volta	11°25'00"N	01°10'5"W	1970-2002	25,00
Rambo	Nakambe	Volta	13°21'00"N	02°2'00"W	1983-2008	19,57
Koriziena	Gorouol	Niger	14°22'41"N	00°1'15"E	1970-2010	11,03
Dagou	Bonsoaga	Niger	12°42'51"N	01°08'00"E	1986-2007	18,00

### 2.2.2- Délimitation des bassins de l'étude

Le bassin versant topographique en une section droite d'un cours d'eau, est défini comme la totalité de la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont de cette section. Il est caractérisé par son exutoire à partir duquel on peut tracer le point de départ et d'arrivée de la ligne de partage des eaux délimitant le bassin. (Karambiri and Niang, 2012). La surface contributrice, peut dans certaines conditions, être plus grande que la surface topographique, lorsqu'il y'a par exemple, une connectivité entre les sous bassins. On parle alors de bassin hydrographique. Dans le cadre de ce travail, le bassin hydrographique sera assimilé au bassin topographique.

La délimitation d'un bassin versant consiste dans un 1<sup>er</sup> temps à fixer l'exutoire du bassin, ensuite repérer le réseau hydrographique et les points hauts ainsi que les courbes de niveau

autour de ces points haut et enfin tracer la ligne de partage des eaux en suivant la ligne de crête puis en rejoignant l'exutoire par une ligne de plus grande pente.

Dans le cadre de cette étude, la délimitation des différents sous-bassins a été réalisé à l'aide du logiciel Arc Gis 10.1, et plus précisément avec l'extension ArcToolbox et SWAT Watershed delineator sous Arc Gis (voir annexe II). Les données de base (Raster) de la zone encadrant le sous-bassin proviennent de la base de données Aster GDEM (<http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>). La validation des bassins délimités s'est faite sur la base de la confrontation avec les bassins hydrographiques de la base de données SIEREM visualisés sous Google Earth. Les superficies et contours issues d'Arc Gis sont validés suite à une comparaison avec les données des superficies de la DGRE ou des résultats des études portant sur ces bassins.

### 2.2.3- Situation géographique des bassins de l'étude

Le Volta est un bassin versant d'une superficie de 400.000 km<sup>2</sup> dont 172 968 Km<sup>2</sup> au Burkina, soit environ 63 % du territoire national, le bassin de la volta est drainé par un cours d'eau, long de plus de 1850 km et qui se jette dans l'Océan Atlantique. Le bassin de la Volta s'est développé un réseau hydrographique dont les trois branches principales sont: le Mouhoun (Volta Noire), le Nakambe (Volta Blanche) et son affluent le Nazinon (Volta Rouge). Il draine plusieurs sous bassins dont trois des sous-bassins considérés dans cette étude (le Wayen, le Noberé et le Rambo). Le bassin du Niger draine le Nord-Est et l'Est du Burkina Faso avec une superficie de 72 000 km<sup>2</sup>. Il comprend un grand nombre de petits cours d'eau à écoulement temporaire et draine plusieurs sous bassins dont deux des sous bassins considérés dans notre étude (le Koriziena et le Dagou).

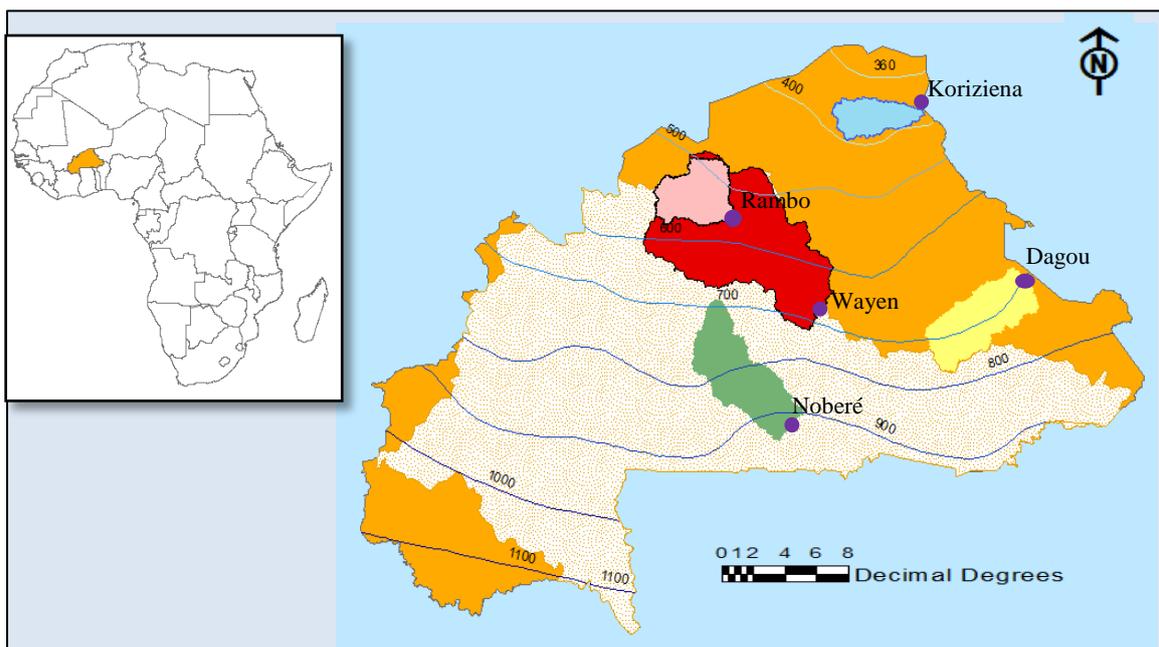
**Le Nakambe à Wayen** est situé au Nord du Burkina Faso et couvre une superficie de 21800km<sup>2</sup>. Il est drainé par le Nakambe qui prend sa source à l'est d'Ouahigouya et ne coule que pendant la saison des pluies. Le Wayen est compris entre les isohyètes 500 et 750mm.

**Le bassin de Noberé** est situé au Sud de Ouagadougou. Il est drainé par la rivière Nazinon. Le bassin de Noberé couvre une superficie de 8021km<sup>2</sup>.

**Le bassin de Rambo** est un sous-bassin du bassin de Nakambe Il occupe une superficie de 4671km<sup>2</sup>.

**Le Gorouol à Koriziena** est situé à l'extrême Nord du Burkina Faso et drainé par des affluents temporaires du fleuve Niger. Il couvre une superficie de 2647 km<sup>2</sup>.

**Le Bonsoaga à Dagou** situé au Nord-Ouest du Burkina et drainé par le Bonsoaga, affluent du Niger. Il occupe une superficie de 6647km<sup>2</sup>.



**Figure 4:** Carte de situation des bassins de l'étude (Laclavère, G. (1993): Les Atlas Jeune Afrique. Atlas du Burkina Faso. – 2. éd.: 54. p.; Paris (les éditions j.a))

### 2.2.4- Le bassin versant de Wayen

La superficie du bassin de Nakambe en amont de la station de Wayen obtenue par des méthodes de digitalisations est de 21800km<sup>2</sup>. Le plus long cours d'eau est d'environ 335km. L'indice de compacité de Gravelius est égal à 0.15. Le point culminant se trouve à 523m et le plus bas point se trouve à 257m. L'altitude médiane est égale à 327 m. La courbe hypsométrique montre que 95% du bassin est au-dessus de l'altitude 288 m et 5% du bassin au-dessus de 356 m.

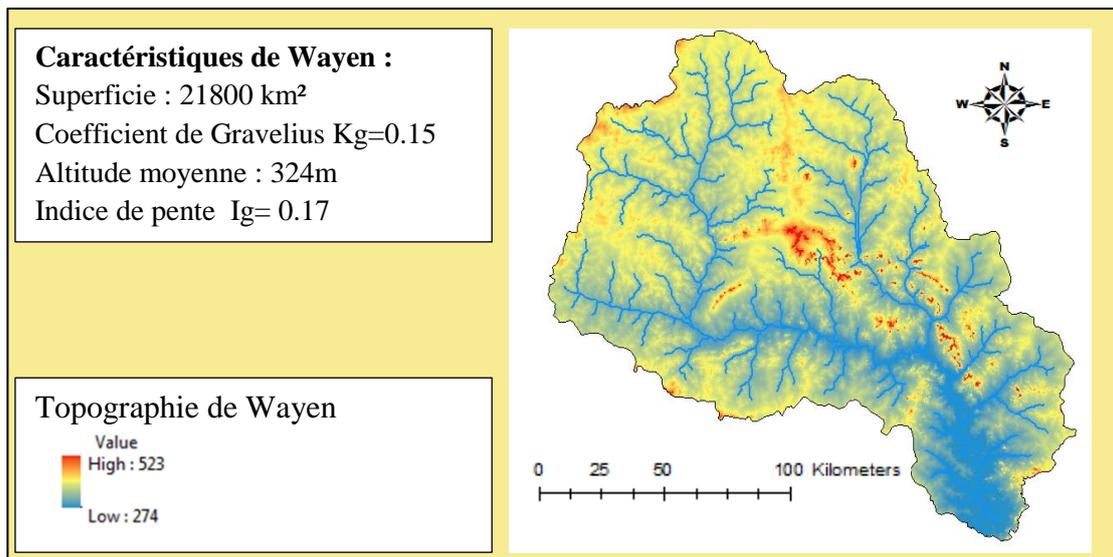


Figure 5: Bassin de Wayen

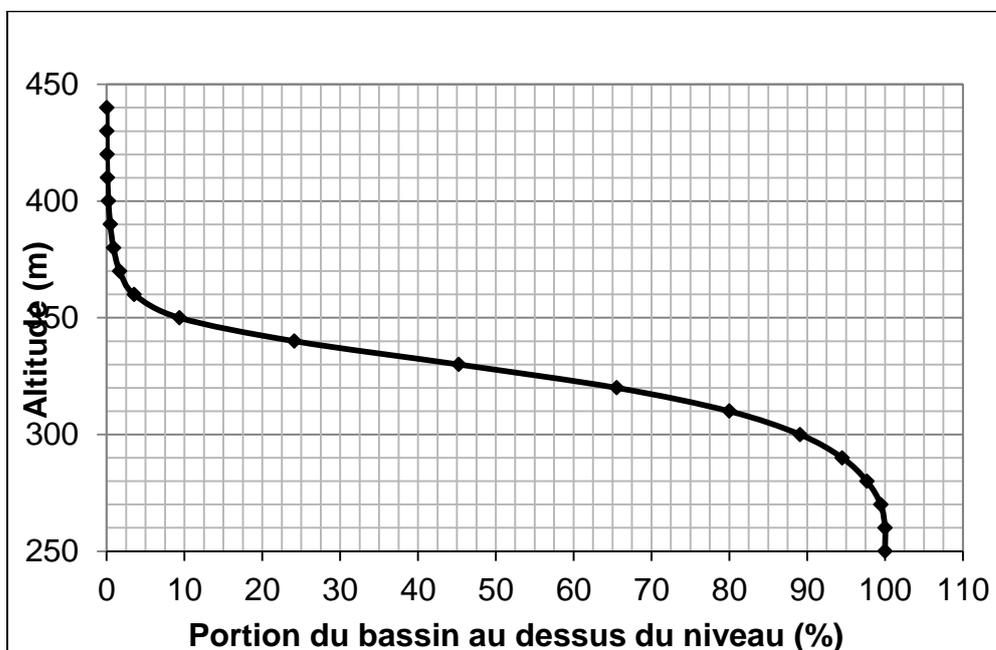


Figure 6: Courbe hypsométrique de Wayen

## Taux d'occupation des sols dans le bassin Wayen

Le bassin de Wayen est fortement occupé dans presque toute son étendue. Un petit pourcentage de sa superficie est moyennement occupé et des petites portions clairsemé faiblement occupé.

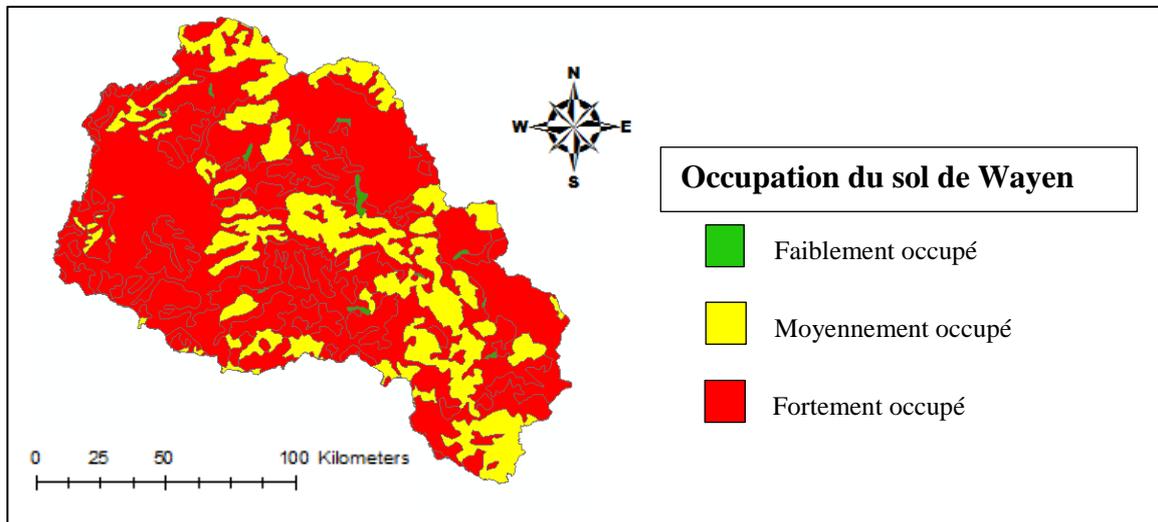


Figure 7: Carte d'occupation du sol, source: LANDSAT (1984-90) et SPOT (1986)

## Pédologie du bassin de Wayen

Les grands types de sol que nous rencontrons sur le bassin de Wayen sont le lithosol érodé sur cuirasse ferrugineux, le sol lessivé sur matériau colluvion-alluvial. Le sol régique d'érosion sur matériau gravillonnaire sur plus de la moitié de la superficie. Le sol de Wayen est fortement érodé. Ces sols supportant moins bien une culture sont souvent abandonnés.

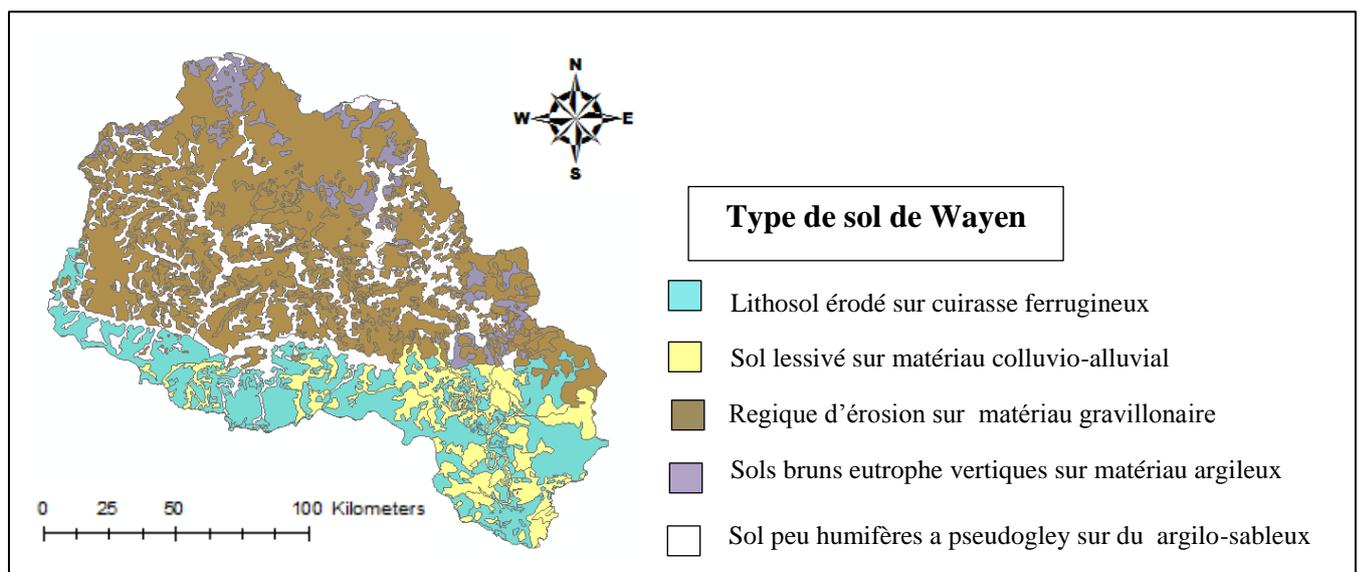


Figure 8: Carte pédologique, source: ORSTOM carte pédologique de reconnaissance de la République de Haute-Volta (Centre ORSTOM de Dakar)

### 2.2.5- Le bassin versant de Noberé

Le bassin de Noberé a une superficie 8021km<sup>2</sup> et un périmètre de 944km. Le rectangle équivalent du bassin a une longueur de 458km. L'indice de compacité de Gravelius égale à 2.97 met en relief la forme allongée du bassin. Le point culminant se trouve à 398m et le plus bas point se trouve à 225m. L'altitude moyenne est égale à 345m. La courbe hypsométrique montre que 95% du bassin est au-dessus de l'altitude 276 m et 5% du bassin au-dessus de 340 m.

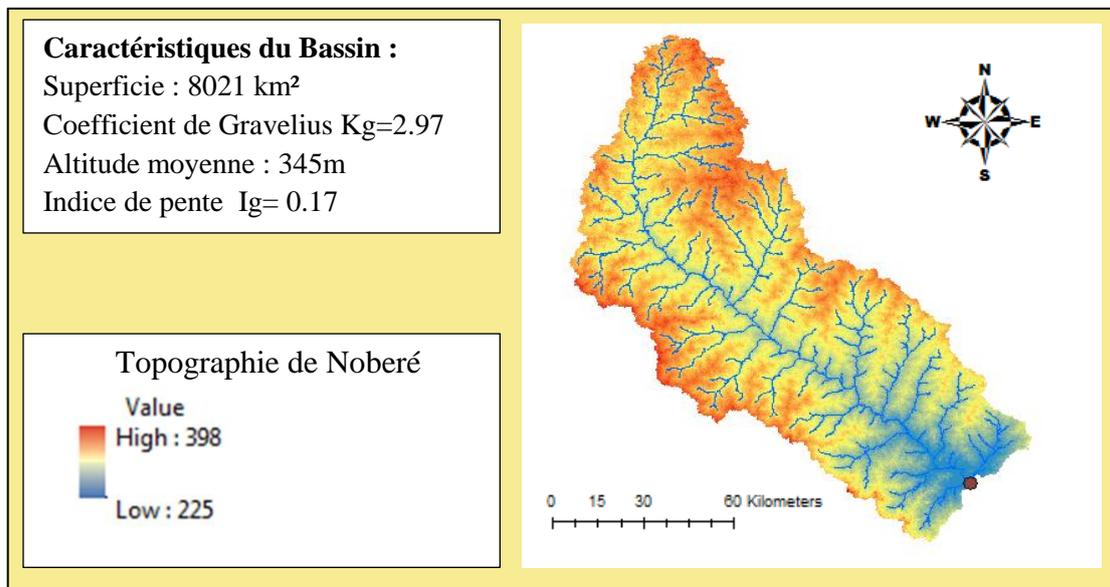


Figure 9: Bassin de Noberé

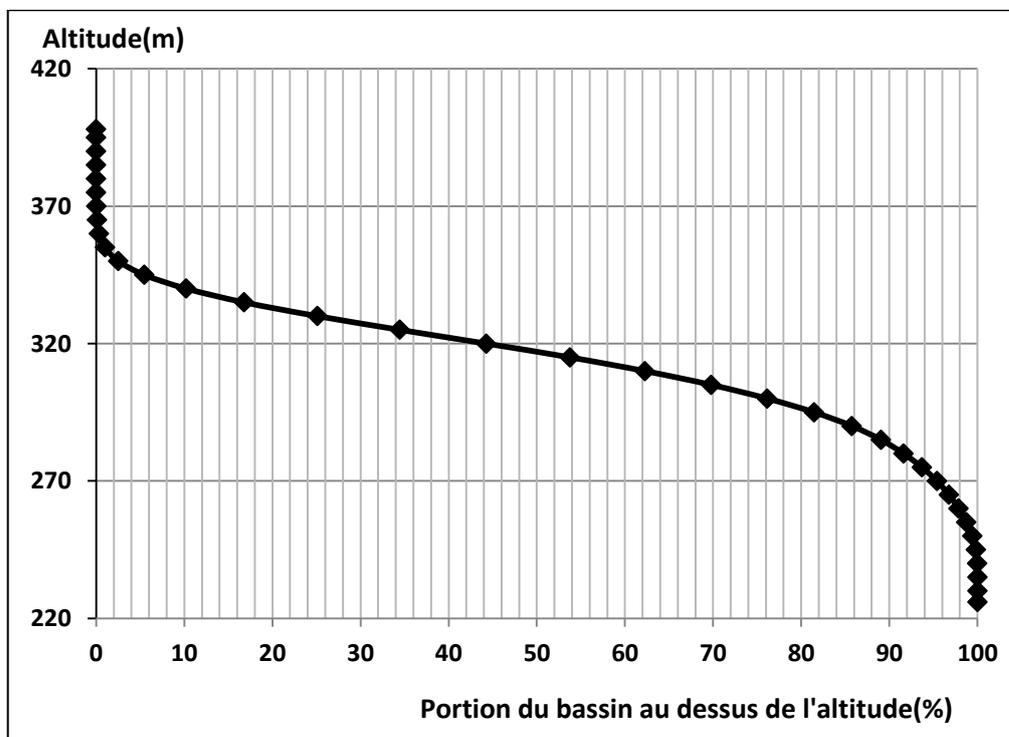
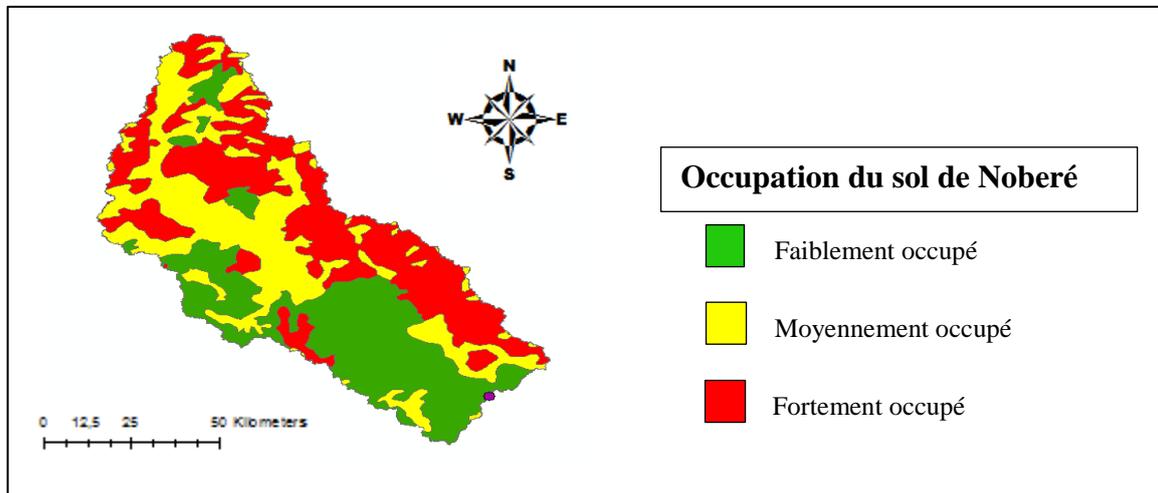


Figure 10: Courbe hypsométrique de Noberé

## Taux d'occupation des sols dans le bassin de Noberé

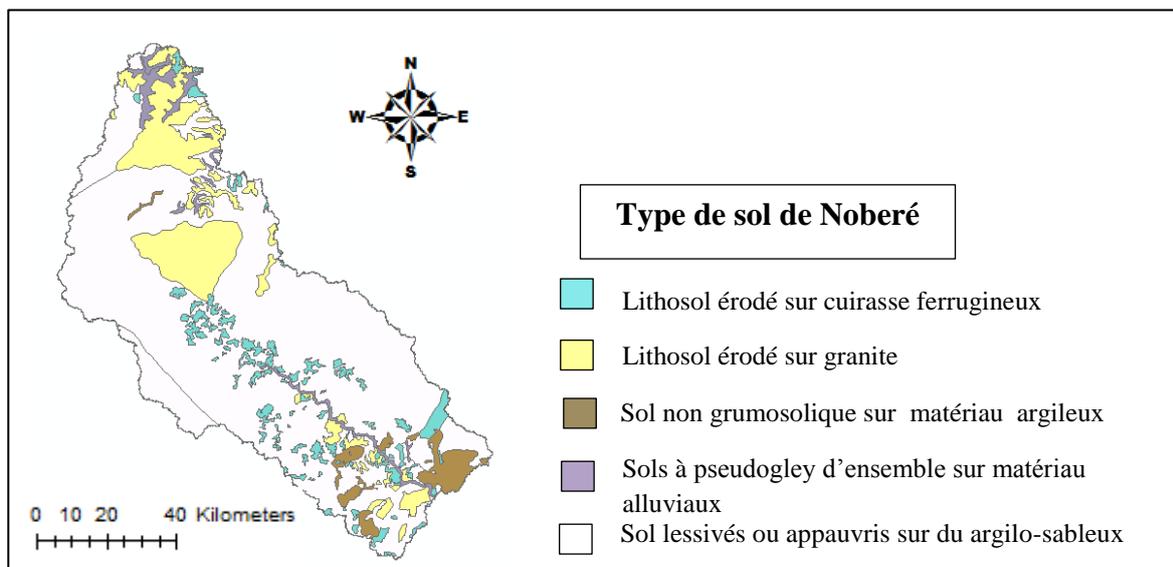
Le bassin de Noberé est fortement occupé dans sa partie Nord. Cette zone est proche de l'Aéroport de Ouagadougou, capitale du Burkina Faso (Google Earth). Elle passe de moyennement occupé au centre à faiblement occupé à l'extrême Sud.



**Figure 11:** Carte d'occupation des sols de Noberé, source: LANDSAT (1984-90) et SPOT (1986)

## Pédologie du bassin versant Noberé

Les grands types de sol qu'on rencontre sur le bassin de Noberé sont les lithosols, les sols non grumosolique, les sols à pseudogley et les sols lessivés. Les sols lessivés occupent plus de la moitié de la superficie. Ce qui indique le caractère érodé du bassin et le rend inadapté à la culture.



**Figure 12:** Carte pédologique de Noberé, Source ORSTOM, carte pédologique de reconnaissance de la République de Haute-Volta

### 2.2.6- Le bassin versant de Dagou

Le bassin de Dagou a une superficie de 6647km<sup>2</sup> et un périmètre de 845km. Le rectangle équivalent correspondant au bassin a une longueur de 409km et une largeur de 16km. L'indice de compacité de Gravelius est de 2.92. La forme du bassin induit des faibles débits de pointes de crue à l'exutoire pour un temps de concentration élevé. Du point de vue relief, le bassin est relativement plat avec une altitude variant entre 373 et 212m. L'altitude médiane est de 277m.

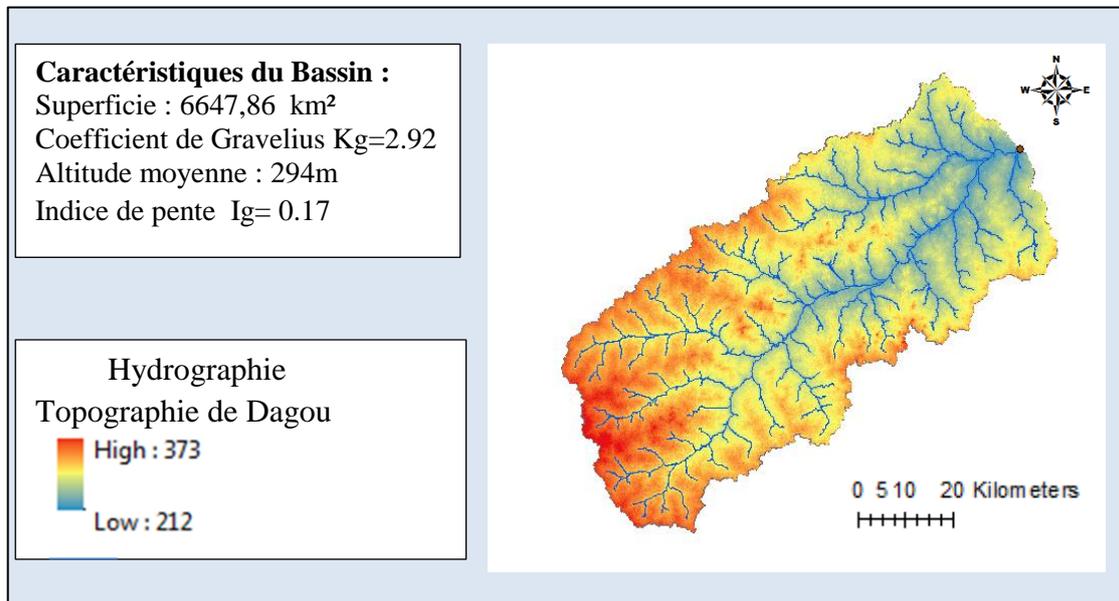


Figure 13: Bassin de Dagou

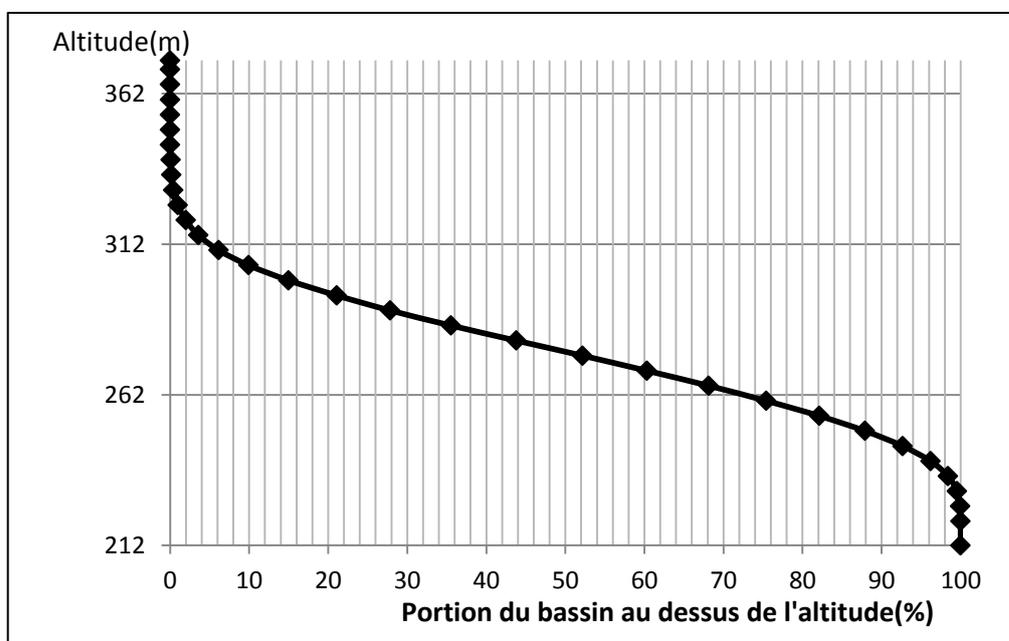
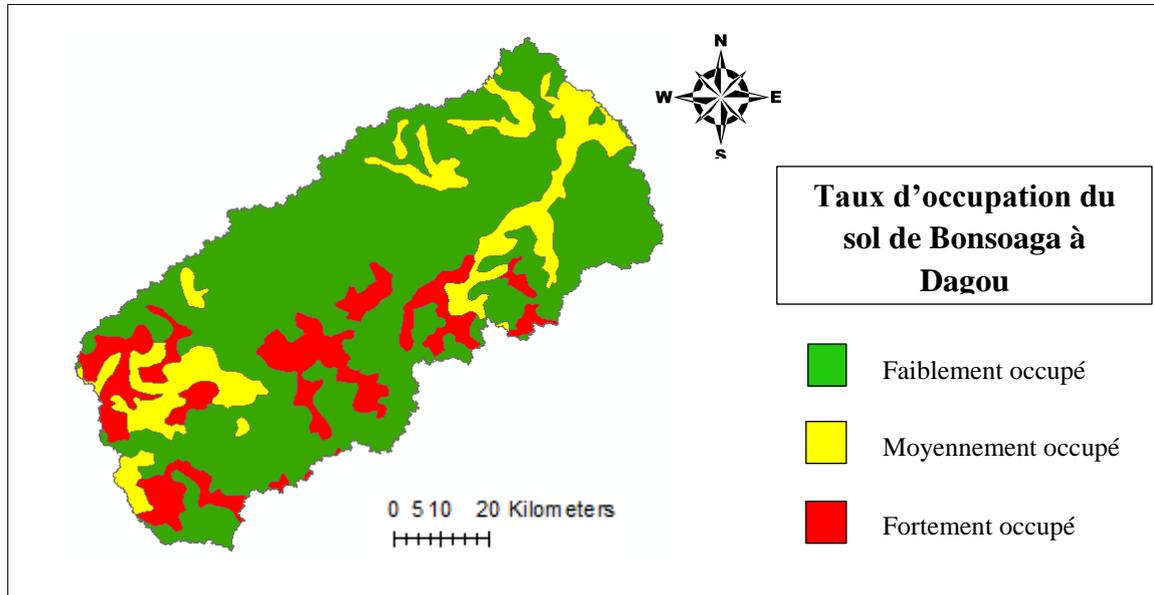


Figure 14 : Courbe Hypsométrique de Dagou

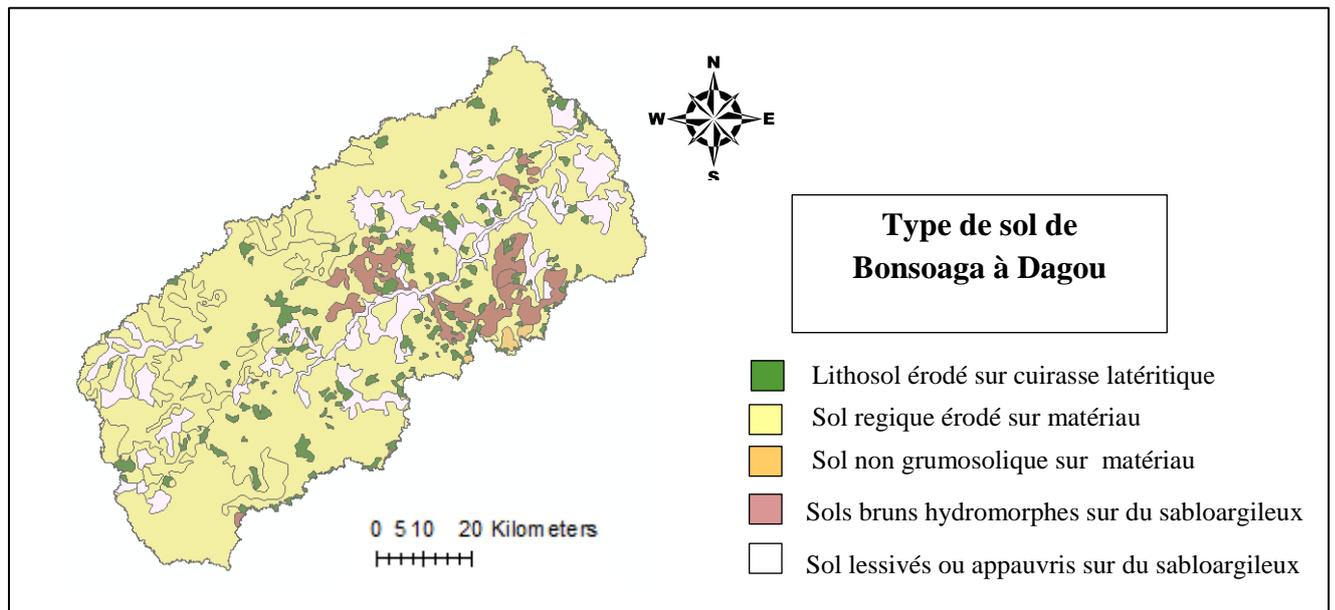
## Occupation des sols dans le bassin de Dagou

Le sol de Dagou est faiblement occupé dans sa grande majorité. Des zones moyennement occupé à fortement occupé se situe plus au Sud.



**Figure 15:** Carte d'occupation des sols de Dagou, Source LANDSAT (1984-90) et SPOT (1986)

## Pédologie du bassin versant de Bonsoaga à Dagou



**Figure 16:** Carte de pédologie de Dagou, Source Centre ORSTOM de Dakar, Carte pédologique de reconnaissance de la République de Haute-Volta

### 2.2.7- Le bassin versant de Rambo

La superficie de Rambo obtenue par des méthodes de digitalisations est de 4672km<sup>2</sup>. Avec un périmètre de 626km, le rectangle équivalent du bassin a une longueur de 300km. L'indice de compacité de Gravelius égale à 2.59. Le bassin est allongé. Cette forme induit à priori de faibles débits de pointes de crue à l'exutoire. Du point de vue relief, le bassin est relativement plat avec une altitude variant entre 515 et 269m. L'altitude moyenne est de 390m.

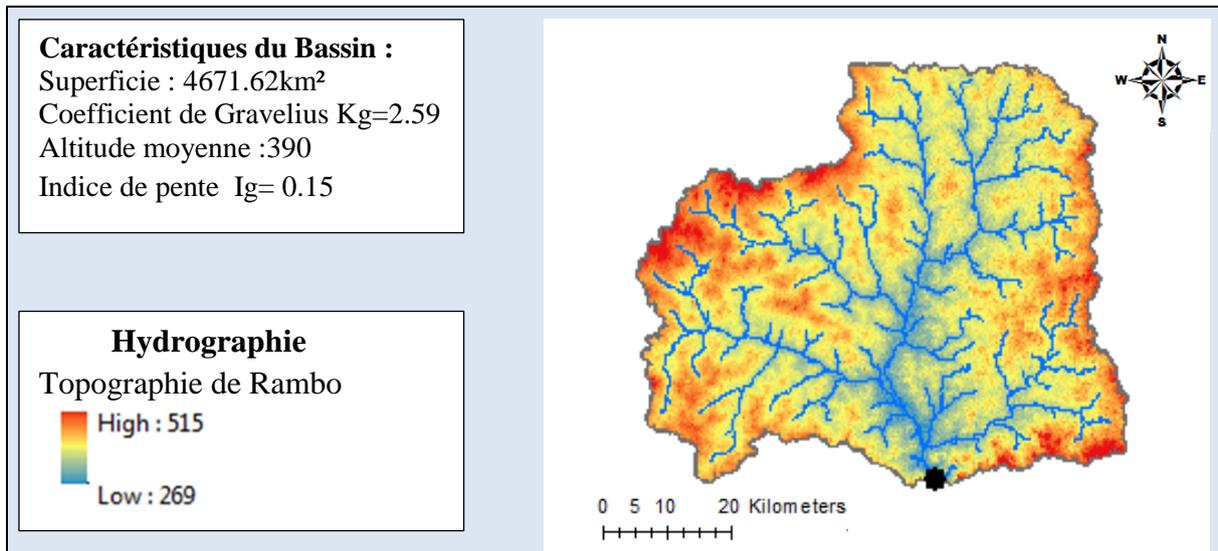


Figure 17: Bassin de Rambo

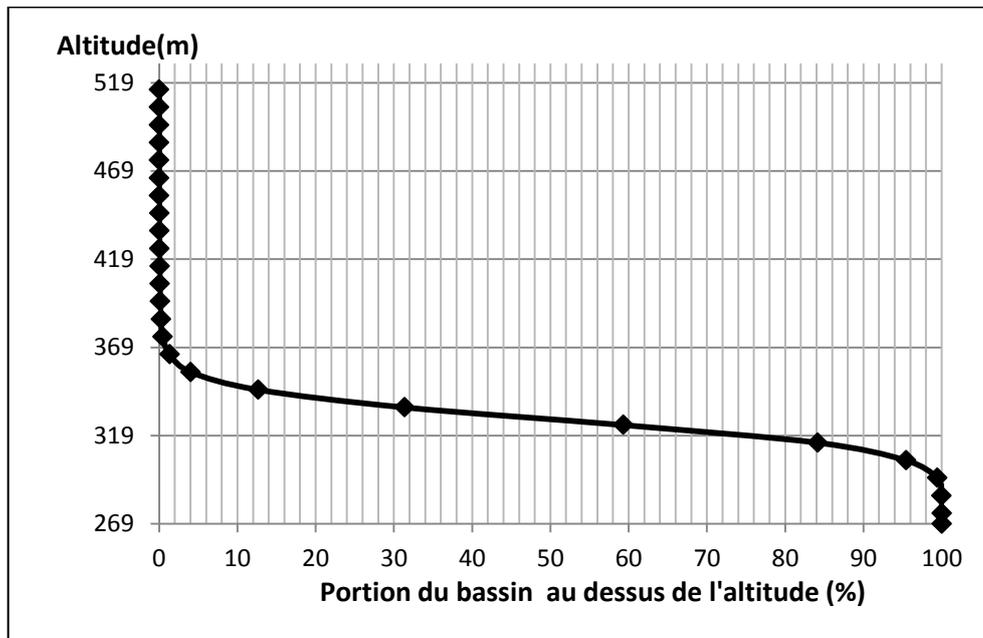
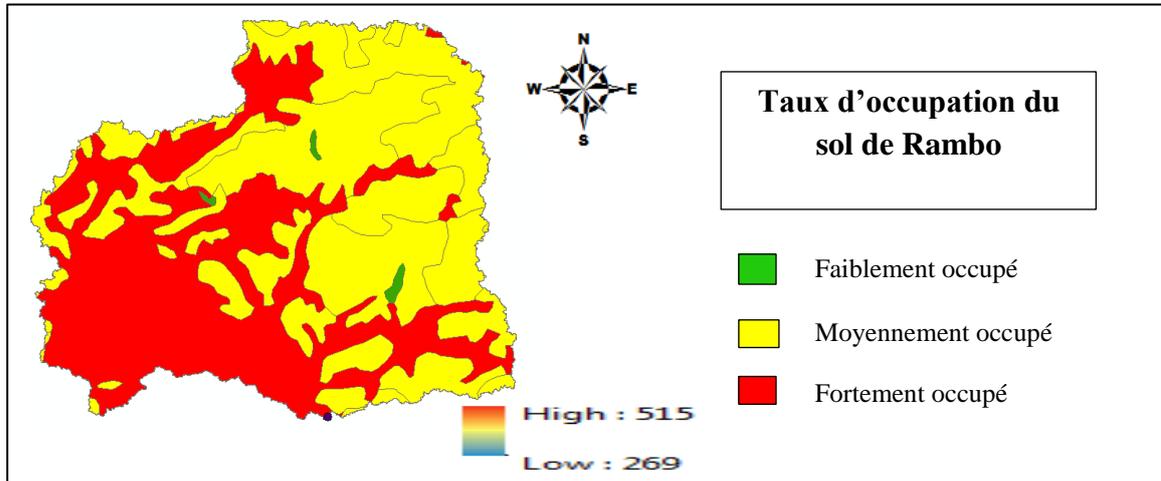


Figure 18: Courbe hypsométrique de Rambo

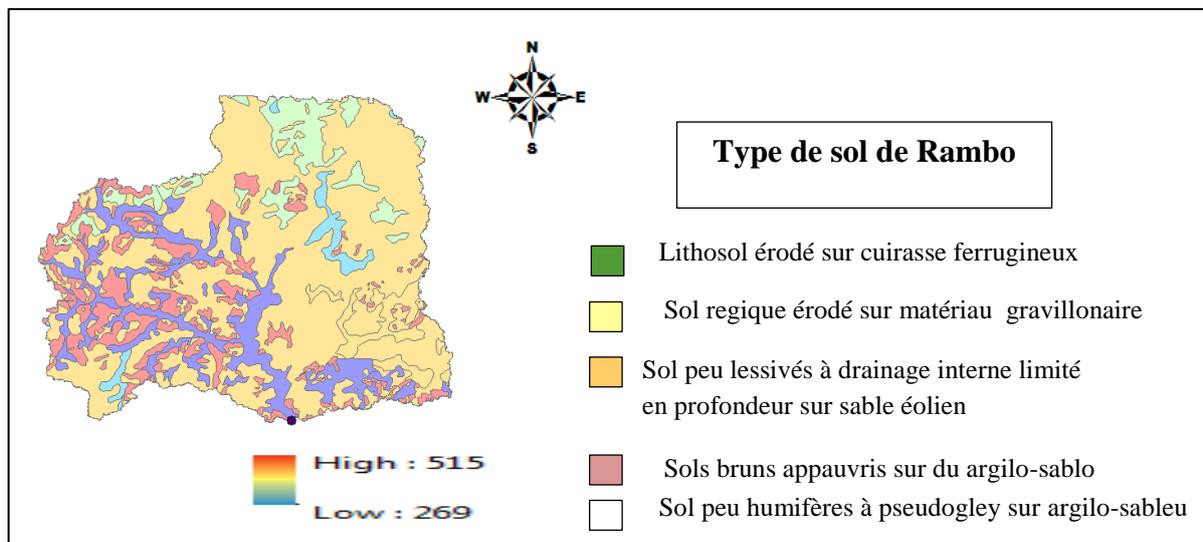
## Taux d'occupation des sols du bassin de Rambo

Le bassin de Rambo est fortement à moyennement occupé. Seuls quelques points sur la carte indiquent des zones à faible occupation du sol.



**Figure 19:** Occupation des sols de Rambo, Source LANDSAT (1984-90) et SPOT (1986)

## Pédologie du bassin versant de Rambo



**Figure 20:** Carte pédologique de Rambo, Source ORSTOM carte pédologique de reconnaissance de la République de Haute-Volta

### 2.2.7- Le bassin versant de Koriziena

La superficie du bassin de Koriziena obtenue par des méthodes de digitalisations est de 2670km<sup>2</sup>. Avec un périmètre de 489km, le rectangle équivalent du bassin a une longueur de 235km. L'indice de compacité de Gravelius est égal à 2.67. Il a une forme allongée. Cette forme induit a priori de faibles débits de pointes de crue à l'exutoire. Du point de vue relief, le bassin est relativement plat avec une altitude variant entre 387 et 262m. L'altitude moyenne est de 345m. 95% du bassin se trouve au-dessus de l'altitude 265m et 5% au-dessus de l'altitude 330m.

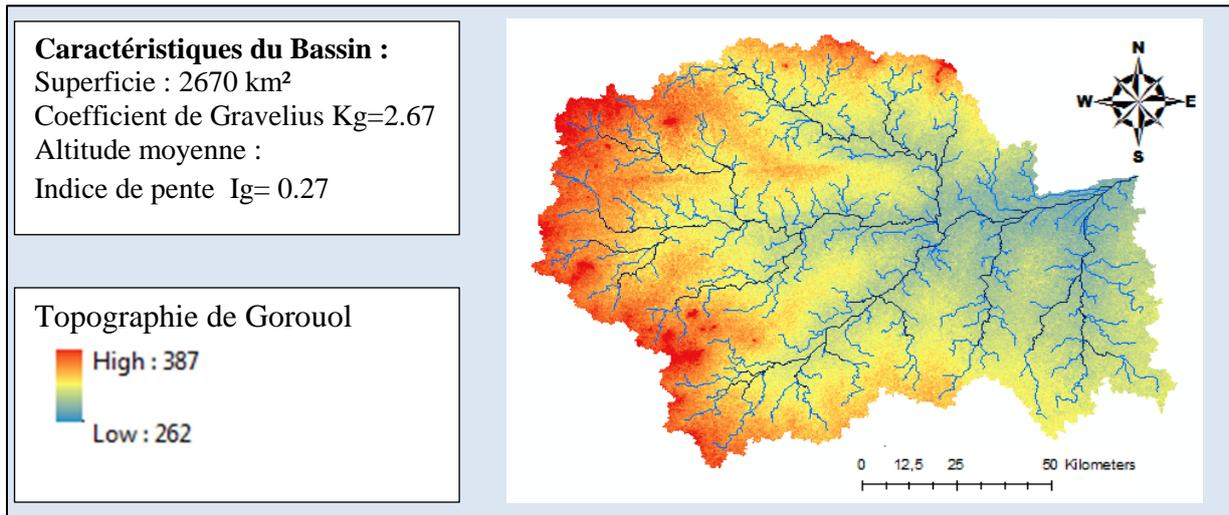


Figure 21: Bassin de Koriziena

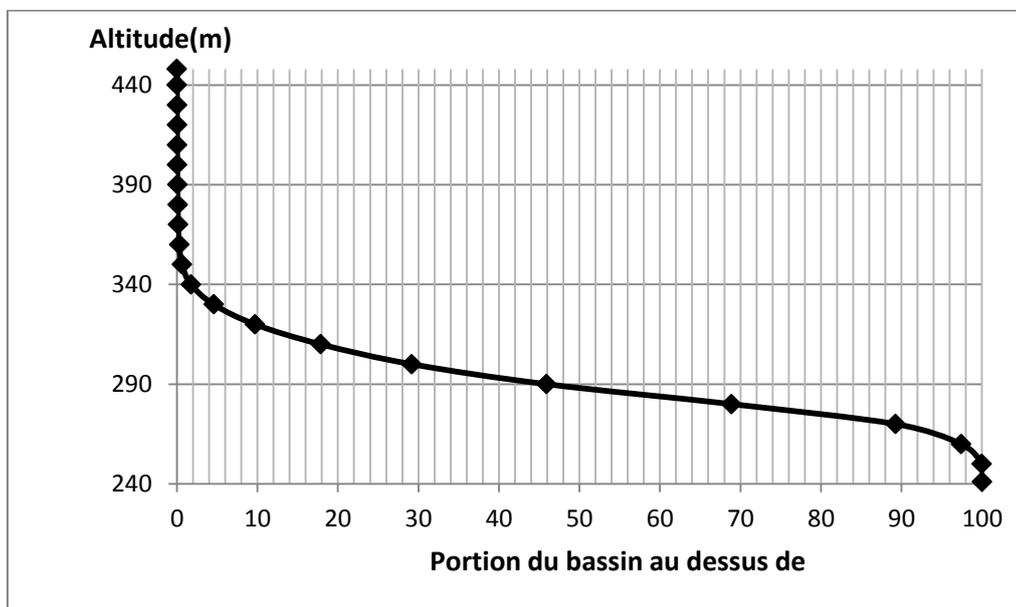


Figure 22: Courbe hypsométrique de Koriziena

## Taux d'occupation des sols dans le bassin de Koriziena

Le bassin de Koriziena est à grande majorité faiblement occupé. Une bande au centre traversant tout le bassin versant indique des zones moyennement occupé et seulement une petite tache à l'extrême Sud montre une zone fortement occupé. A priori nous pouvons dire que ce bassin est celui qui est susceptible de subir le moins la pression anthropique sur ces ressources en eau.

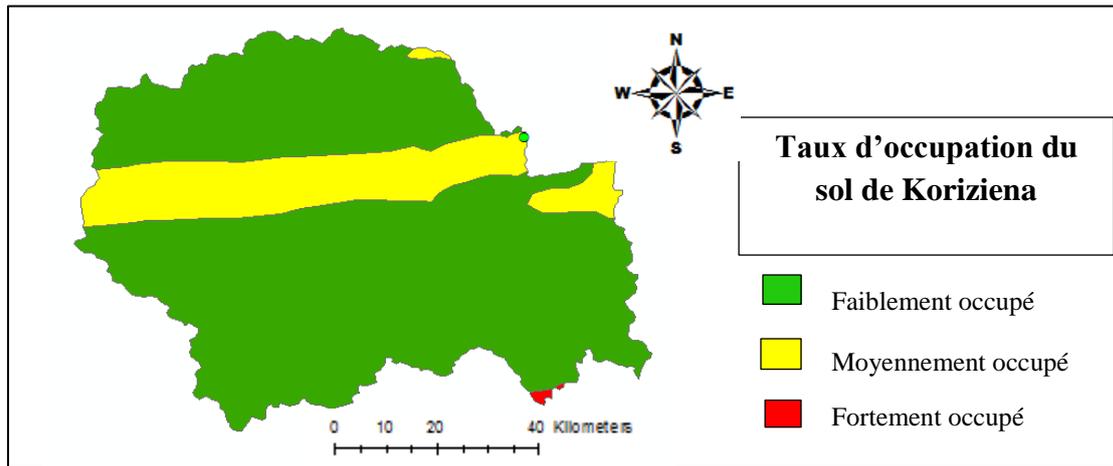


Figure 23: Taux d'occupation du sol de Koriziena

## Pédologie du bassin versant Koriziena

Le sol à Koriziena n'est pas très varié. La grande majorité est constituée des sols alcali lessivés. La bande centrale constitue les sols non grumosolique tandis qu'une petite proportion éparpillée est constituée des régiques érodés ou des lithosols érodés.

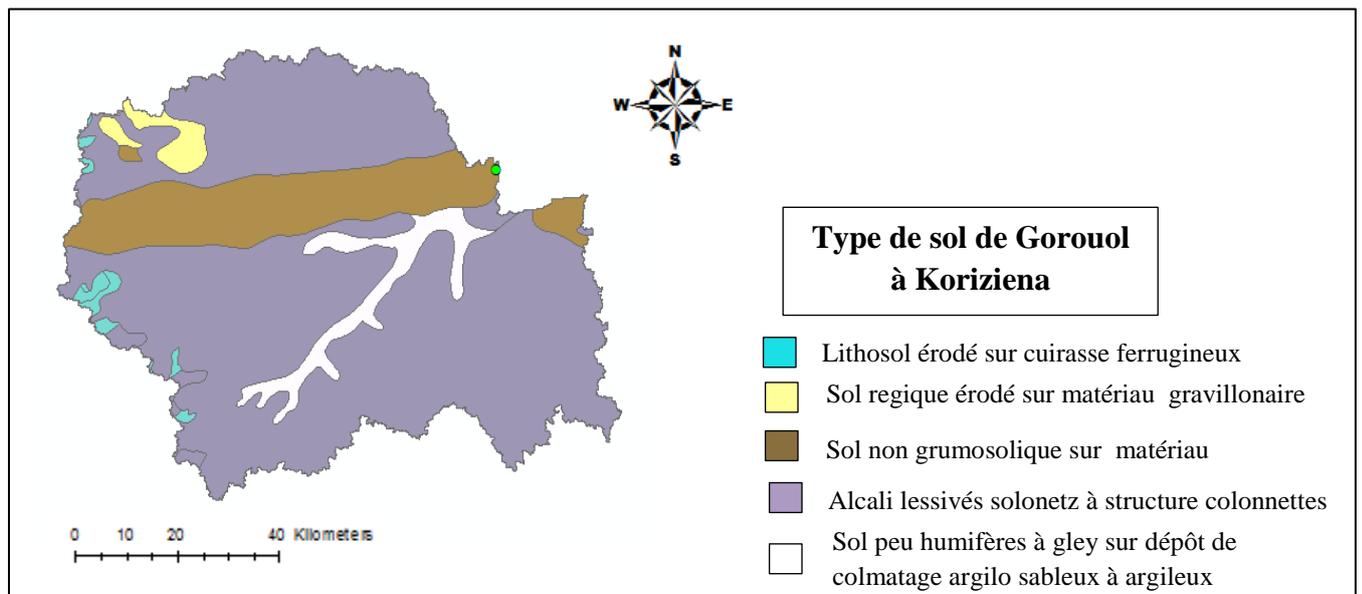


Figure 24: Carte pédologique de Koriziena, Source ORSTOM pédologique de la République de Haute-Volta

### 3- Matériels et Méthodes

#### 3.1- Présentation des données hydro climatiques

##### Choix de l'échelle spatio-temporelle

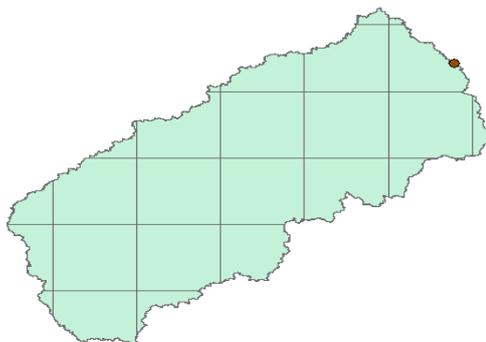
Un choix cohérent de l'échelle spatio-temporelle des phénomènes hydrologiques d'un bassin versant est indispensable. Les résultats issus d'une étude de modélisation hydrologique doivent être représentatif et offrir la possibilité de transposabilité à d'autres bassins. A titre d'exemple, étudier le comportement d'un micro bassin urbain (à très faible temps de concentration) avec des données de pluie au pas de temps mensuel n'aurait pas de sens, l'inverse est tout aussi vrai il est probablement inutile de disposer de pluies au pas de temps de la minute pour l'étude du bassin versant de l'Amazonie (Meylan et al., 2008).

Les bassins versants que nous étudions couvrent une superficie de quelques milliers de km<sup>2</sup> et se situent en région soudano-sahélienne ou surviennent souvent des problèmes des disponibilités des données à des échelles fines. De plus nos objectifs se situent dans l'optique d'apporter des outils de prévisions aux gestionnaires des ressources en eau dans un contexte de changement climatique. Pour cela, une échelle spatiale à la résolution 0.2\*0.2 degré et une échelle temporelle au pas de temps journalier est adaptée pour les données hydro climatiques

##### Sources des données hydro climatiques

Les données hydro climatiques (Pluie, ETP, Températures) de cette étude proviennent de la banque de données de la Direction Nationale de la Météorologie du Burkina Faso. Les données se présentent sous forme de grille à la résolution spatiale de 0.2 degré carré. Elles couvrent la période de 1961 à 2009. On a intercepté cette grille au contour des différents bassins versants de l'étude afin d'obtenir une série historique de données spécifique au bassin considéré. La grille des données a été superposée avec les contours des bassins versants afin de générer les séries de données propres à chaque bassin. Les données ont ensuite été agrégées. La valeur moyenne des données hydroclimatiques sur le bassin est déterminée selon la formule:  $X_{bassin} = \sum_{i=1}^n \frac{si}{S} * Xi$ .

Avec  $X_{bassin}$ , la donnée moyenne (Pluie, ETP ou Température) sur le bassin,  $si/S$  la proportion du bassin sur la maille et  $Pi$  la pluie de la maille.



**Figure 25:** Exemple de maillage, bassin de Noberé

Par la suite, on a extrait les données de pluie du bassin grâce à un script exécuté sur R (Voir annexe III).

### 3.2- Analyse et critique des données hydro climatiques

L'analyse des données pluviométriques s'est faite suivant plusieurs approches. La première approche concerne l'analyse de la variabilité pluviométrique afin de bien visualiser les périodes de déficit et d'excédent pluviométrique. La seconde approche a consisté en la détection des ruptures par un traitement statistique avec le logiciel KhronostatTM1.01.

#### - Méthodes d'analyse de la variabilité pluviométrique

Le calcul des indices pluviométriques et hydrométriques par la méthode de Nicholson et la méthode du filtre non récursif passe-bas de Hanning d'ordre 2 permettent de mettre en évidence les périodes excédentaires et déficitaires au sein d'une série chronologique.

L'indice de Nicholson se définit comme une variable centrée réduite exprimée par l'équation suivante :

$$\Delta x = \frac{x_i - \bar{x}_i}{\sigma_i}$$

**Avec :**  $\Delta x$  indice annuelle de la variable pluviométrique ou hydrologique,  $x_i$  valeur annuelle de la variable enregistrée au cours de l'année  $i$ ,  $\bar{x}_i$  moyenne interannuelle de la variable sur la période d'étude  $\sigma_i$  écart type de la série hydro-climatique sur la période d'étude

Pour la méthode du Filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2, on procède d'abord au filtrage des données pour éliminer les variations saisonnières. Ce filtre est effectué au moyen des équations recommandées. Selon cette méthode, chaque terme de la série est calculé de la manière suivante :

$$x_t = 0.06x_{t-2} + 0.25x_{t-1} + 0.38x_t + 0.25x_{t+1} + 0.06x_{t+2}$$

Avec :  $x_{t-2}$  et  $x_{t-1}$  les totaux des pluies observés de deux termes qui précèdent immédiatement le terme  $x_t$ ;

$x_{t+2}$  et  $x_{t+1}$  totaux des pluies observés de deux termes qui suivent immédiatement le terme  $x_t$  ;

Les totaux des pluies pondérés des deux premiers ( $x_1$  et  $x_2$ ) des deux derniers termes ( $x_{n-1}$  et  $x_n$ ) de la série sont calculés au moyen des expressions suivantes ( $n$  étant la taille de la série) :

$$x_1 = 0.54x_1 + 0.46x_2$$

$$x_2 = 0.25x_1 + 0.50x_2 + 0.25x_3$$

$$x_{n-1} = 0.25x_{n-2} + 0.50x_{n-1} + 0.25x_n$$

$$x_n = 0.54x_n + 0.46x_{n-1}.$$

Pour ressortir les périodes de déficit et d'excédent d'écoulement, les moyennes mobiles sont centrées et réduites au moyen de la formule suivante :  $Y'_t = \frac{x_t - m}{\sigma}$

Où :  $m$  est la moyenne de la série des moyennes pondérées et  $\sigma$  l'écart type de la série des moyennes mobiles pondérées.

## Détection des ruptures dans les séries hydro pluviométriques

### Test de Pettitt

Une vérification de la stationnarité des séries hydro pluviométriques est effectuée. La série étudiée est divisée en deux sous échantillons, respectivement de taille  $m$  et  $n$ . Les valeurs des deux échantillons sont regroupées et classées par ordre croissant. On calcule alors la somme des rangs des éléments de chaque sous échantillon dans l'échantillon total. Une statistique est définie à partir des deux sommes ainsi déterminées, et testées sous l'hypothèse nulle d'appartenance des deux sous échantillons à la même population. Ce test a été modifié par Pettitt et réputé pour sa robustesse. Le test est non-paramétrique. L'hypothèse nulle du test est l'absence de rupture est soit rejetée, soit acceptée dans la série. Ce test repose sur le calcul de la variable  $U_{t,N}$  définie par :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{i,j}$$

Avec :  $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$  avec  $\text{sgn}(X) = 1$  si  $X > 0$  et  $-1$  si  $X < 0$ .

### Approche bayésienne de Lee & Heghinian (1977)

Afin de confirmer la date de la rupture détectée par le test de Pettitt, nous avons utilisé l'approche bayésienne de Lee & Heghinian qui propose une approche paramétrique. Si  $(X_i)$  est une série de variables aléatoires normales, indépendantes et de variance constante, on admet l'existence d'une rupture en moyenne et une seule. En se proposant de déterminer une loi de probabilité à posteriori de l'amplitude et de l'instant. Le modèle de base de la procédure est la suivante :

$$X_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & i = 1 \dots \tau \dots \\ \mu + \delta + \varepsilon_i & i = \tau + 1 \dots \dots \dots N \end{cases}$$

Où : les  $\varepsilon_i$  sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance  $\sigma^2$ . Les variables  $\tau$ ,  $\mu$ ,  $\delta$  et  $\sigma$  sont des paramètres inconnus.  $\tau$  et  $\delta$  représentent respectivement la position de la rupture dans le temps et l'amplitude du changement sur la moyenne. Le changement éventuel (la position et l'amplitude) correspond au mode des distributions a posteriori de  $\tau$  et  $\delta$ . La méthode fournit donc la probabilité que la rupture se produise au moment  $\tau$  dans une série où on suppose a priori qu'il y a effectivement un changement à un moment indéterminé

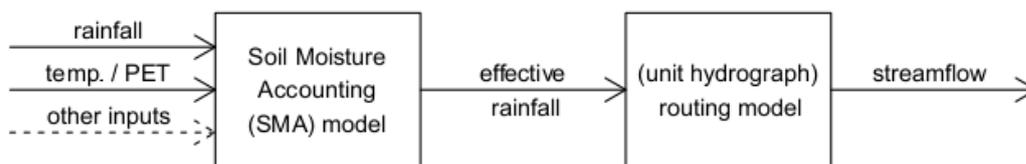
### 3.3- Modélisation hydrologique

#### 3.3.1- Principe de la modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique est une démarche qui vise à faire une représentation simplifiée du processus pluie-débit en réponse à un évènement pluvieux. La démarche de développement d'un modèle se résume en 3 étapes: La construction du modèle; Le calage du modèle par un jeu de miroir « réalité-modèle » et un processus itératif de calage des paramètres pour améliorer la correspondance des comportements et enfin l'évaluation du modèle.

#### 3.3.2- Présentation des modèles hydrologiques du package Hydromad

Hydromad est un package du logiciel R conçu pour la modélisation hydrologique. Il fournit un ensemble de fonctions de production et plusieurs fonctions de transfert qui travaillent ensemble pour construire, manipuler, analyser et comparer des modèles hydrologiques. Les données d'entrées sont les séries chronologiques journalières de pluie, d'ETP et/ou Température observées. La fonction de production est assurée par un réservoir d'humidité relative du sol, le *Soil Moisture Accounting (SMA)*. La fonction de transfert est assurée par un hydrogramme unitaire, le *Routing model*. Le SMA estime les pluies efficaces et le Routing model estime les débits.



**Figure 26:** Modèle IHACRES

Hydromad dispose de plusieurs fonctions de production SMA dont l'IHACRES et le GR4J et de plusieurs fonctions de transfert Routing modèle.

Le modèle IHACRES et le modèle GR4J (Génie Rural a 4 paramètres journaliers) ont une structure de base simple et nécessite peu de données d'entrées de base. Elles conviennent aux bassins situés dans les zones où les données d'entrées sont peu disponibles.

#### Le modèle IHACRES

A chaque fonction de production (CWI ou CMD) du modèle IHACRES, on peut associer une fonction de transfert. On peut citer la fonction de transfert *Armax*, *Powuh*, *Expuh* et *Varuh*.

-La fonction de production convertit la pluie brute en pluie efficace selon cette équation :

$$uk = [c(\phi k - l)]^p * rk$$

Avec:  $rk$  la pluie observée,  $c$  balance de masse,  $l$  seuil de l'index de l'humidité du sol et  $\phi k$  l'index de l'humidité du sol donné par :

$$\phi_k = r_k + \left(1 - \frac{1}{\tau_k}\right) \phi_{k-1}$$

Où  $\tau_k$  est le taux de séchage :

$$\tau_k = \tau_w * \exp(0.062f(T_r - T_k))$$

$\tau_w$  est le taux de séchage de référence,  $f$  la température d'entrée et  $T_r$  la température de référence.

- La fonction de transfert est utilisée pour convertir la pluie efficace en débit simulé en le reliant à l'hydrogramme unitaire.

### Présentation du modèle GR4J

Le modèle GR4J est un modèle pluie-débit global à quatre paramètres. Son développement a été initié au Cemagref au début des années 1980, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications de gestion de la ressource en eau et d'ingénierie (dimensionnement d'ouvrage, prévision des crues et des étiages, gestion de réservoirs, détection d'impact...)

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Edijatno et Michel (1989), Edijatno (1991), Nascimento (1995), Edijatno et al. (1999), Perrin (2000), Perrin (2002) et Perrin et al. (2003) qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. C'est la version de Perrin et al. (2003) qui est présentée ici.

Bien que GR4J soit un modèle empirique, sa structure s'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui permet de tenir compte des conditions antérieures et d'en assurer un fonctionnement en continu. Sa structure associe une fonction de production et une fonction de transfert (associé à un réservoir de routage, à un hydrogramme unitaire avec une possibilité d'échange avec l'extérieur du bassin) permettant de simuler le comportement hydrologique d'un bassin.

#### -Description mathématique

Un schéma de la structure est donné à la Figure 2.  $P_k$  est la pluie journalière du jour  $k$  et  $E$

L'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.

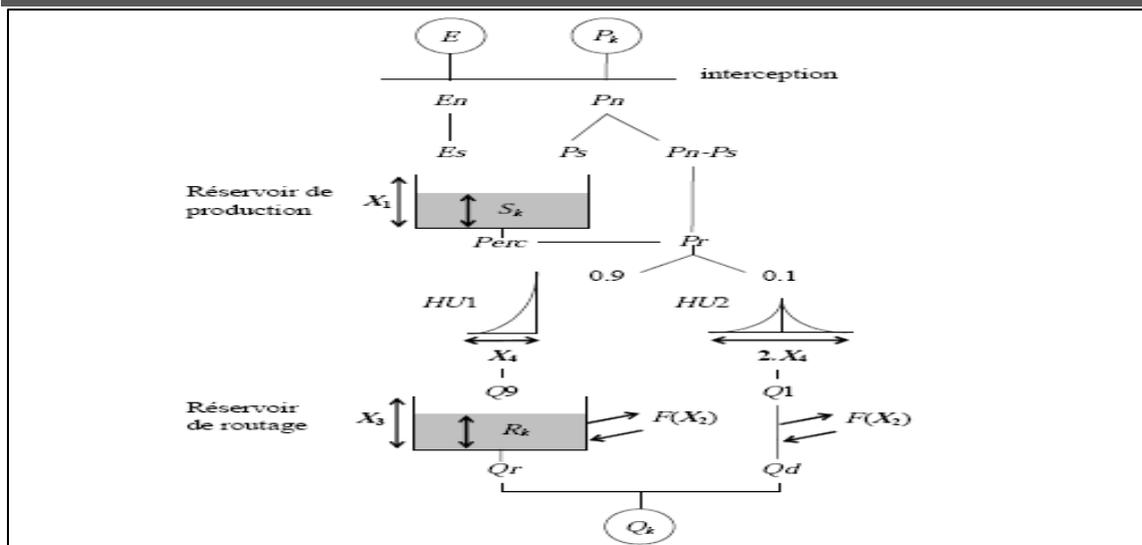


Figure 27: Modèle GR4J

- Neutralisation

La première opération est la neutralisation de  $P_k$  par  $E$  pour déterminer une pluie nette  $P_n$  une évapotranspiration nette  $E_n$  calculée par :

$$\text{Si } P_k \geq E, \text{ then } P_n = P_k - E \text{ and } E_n = 0$$

$$\text{Si } P_k \leq E, \text{ then } P_n = 0 \text{ and } E_n = E - P_k$$

- Fonction de rendement

Dans le cas où  $P_n$  est différente de zéro, une partie  $P_s$  de  $P_n$  alimente le réservoir de production et est calculée par :

$$P_s = \frac{X_1 * \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1}\right)^2\right) * \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)}{1 + \frac{S_k}{X_1} * \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)}$$

Où :  $X_1$ (mm) est la capacité maximum du réservoir de production et  $S_k$  le contenu du réservoir de production au début du jour  $k$ .

Dans le cas contraire, lorsque  $P_n$  est égal à zéro, une quantité d'évaporation  $E_s$  est retirée du réservoir de production. Elle est donnée par :

$$E_s = \frac{S_k * \left(2 - \frac{S_k}{X_1}\right) * \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S_k}{X_1}\right) * \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)}$$

Le contenu du réservoir qui résulte de ces opérations est donnée par :

$$S' = S_k + P_s - E_s$$

▪ Percolation

Une percolation Perc issue du réservoir de production est alors calculée par l'équation suivante :

$$Perc = S' * \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{4 S'}{9 X1} \right)^4 \right]^{-1/4} \right\}$$

Par suite, le contenu du réservoir devient

$$S_{k+1} = S' - Perc$$

Et la quantité d'eau Pr qui atteint finalement la partie routage du modèle est donnée par:

$$Pr = Perc + (Pn - Ps)$$

▪ Hydrogrammes unitaires

Pr est divisé en deux composantes d'écoulement, 90% étant routé par un hydrogramme unitaire HU1 et un réservoir de routage et 10 % par un hydrogramme unitaire symétrique HU2. HU1 et HU2 dépendent du même paramètre X4, temps de base de HU1 exprimé en jours. Les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à partir des courbes en S notées respectivement SH1 et SH2, qui correspondent aux fonctions cumulées de l'hydrogramme. SH1 est définie en fonction du temps par:

Pour  $t \leq 0$ ,  $SH1(t) = 0$

Pour  $0 < t < X4$ ,  $SH1(t) = \left( \frac{t}{X4} \right)^{5/2}$

Pour  $t \geq X4$ ,  $SH1(t) = 1$

Pour  $t \leq 0$ ,  $SH2(t) = 0$

Pour  $0 < t \leq X4$ ,  $SH2(t) = \frac{1}{2} \left( \frac{t}{X4} \right)^{5/2}$

Pour  $X4 < t < 2X4$ ,  $SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left( 2 - \frac{t}{X4} \right)^{5/2}$

Pour  $t \geq 2X4$ ,  $SH2(t) = 1$

Les ordonnées de HU1 et HU2 sont alors calculées par :

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1)$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j - 1) \text{ où } j \text{ est un entier.}$$

A chaque pas de temps  $k$ , les sorties  $Q_9$  et  $Q_1$  des deux hydrogrammes correspondent à la convolution des pluies antérieures par la clé de répartition donnée par l'hydrogramme discrétisé et sont calculées par :

$$Q_9(k) = 0.9 * \sum_{j=1}^l UH1(j) * Pr(k - j + 1)$$

$$Q_1(k) = 0.1 * \sum_{j=1}^m UH2(j) * Pr(k - j + 1)$$

Où  $l = \text{int}(X_4) + 1$  and  $m = \text{int}(2X_4) + 1$ ,  $\text{int}()$  désignant la partie entière.

- Fonction d'échange avec l'extérieur non atmosphérique

Un échange souterrain en eau est calculé par :

$$F = X_2 * \left( \frac{Rk}{X_3} \right)^{7/2}$$

Où :  $Rk$  est le niveau dans le réservoir en début de pas de temps,  $X_3$  la capacité à un jour du réservoir et  $X_2$  le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul. En fait, l'interprétation physique de cette fonction d'échange n'est pas directe.

- Réservoir de routage

Le niveau dans le réservoir de routage est modifié en ajoutant la sortie  $Q_9$  de l'hydrogramme  $HU_1$  et  $F$ .

$$R' = \max(0; Rk + Q_9(k) + F)$$

Il se vidange ensuite en une sortie  $Q_r$  donnée par

$$Q_r = R' * \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{R'}{X_3} \right)^4 \right]^{1/4} \right\}$$

Le niveau dans le réservoir devient :

$$R_{k+1} = R' - Q_r$$

- Ecoulement total

La sortie  $Q_1$  de l'hydrogramme  $HU_2$  est soumise au même échange pour donner la composante d'écoulement  $Q_d$ :

$$Q_d = \max(0; Q_1(k) + F)$$

Le débit total  $Q_k$  est alors donné par :

$$Q_k = Q_r + Q_d$$

Le modèle GR4J ne comporte que quatre paramètres à caler:

X1: capacité du réservoir de production (mm)

X2: coefficient d'échanges souterrains (mm)

X3: capacité à un jour du réservoir de routage (mm)

X4: temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (j)

### Le calage et les critères d'ajustement du modèle (Fonction objectif)

Le calage est la phase où on optimise le jeu de paramètres du modèle. Pour optimiser, on fait généralement appel à un algorithme. Dans Hydromad, à partir d'un intervalle de jeu de paramètres, un algorithme permet automatiquement de déterminer un jeu de paramètres optimum.

Le critère d'ajustement ou fonction objectif permet de mesurer la pertinence du modèle en comparant les débits observés aux débits simulés. Le critère de Nash (Nash and Sutcliffe, 1970) est le plus couramment utilisé. Un Nash nul signifie que la simulation équivaut au modèle de référence utilisé. Si le critère prend une valeur proche de 1, les débits simulés sont proche des débits observés.

$$NS = \left[ 1 - \frac{\sum(Q_{0,i} - Q_{m,i})^2}{\sum(Q_{0,i} - \overline{Q_0})^2} \right]$$

$$NS_{\text{sqrt}} = \left[ 1 - \frac{\sum(\sqrt{Q_{0,i}} - \sqrt{Q_{m,i}})^2}{\sum(\sqrt{Q_{0,i}} - \sqrt{\overline{Q_0}})^2} \right]$$

$$NS_{\text{Log}} = \left[ 1 - \frac{\sum(\log(Q_{0,i} + \epsilon) - \log(Q_{m,i} + \epsilon))^2}{\sum(\log(Q_{0,i} + \epsilon) - \log(\overline{Q_0} + \epsilon))^2} \right]$$

- **NS**: Représentation sensible aux débits forts
- **NS<sub>sqrt</sub>** : Représentation sensible aux débits faibles
- **NS<sub>Log</sub>** : Pour les débits moyens, traitement de manière égale des débits faibles et forts.

Dans la pratique, des études ont considérées que le Nash est acceptable à partir de la valeur 0.6 (NASH and SUTCLIFF, 1970; O'CONNELL et al., 1970). En se basant sur ces considérations, on assumera que la simulation est de mauvaise qualité lorsque le critère de

Nash est faible ( $<0.6$ ), elle est acceptable lorsqu'il est compris entre 0.60 et 0.80 et parfaite lorsqu'il est supérieur à 0.90.

### 3.3. Elaboration des scénarios synthétiques de changement climatique

L'étude des impacts du changement climatique sur les ressources en eau est directement liée à la variation de la pluviométrie. Afin d'évaluer la réponse des sous bassins soudano sahélien du Burkina face à ces variations de la pluviométrie, 9 scénarios synthétiques de variabilité pluviométrique ont été élaborés:

#### **Scenario de diminution du nombre de jour de pluie supérieure à 1mm :**

**Scenario1** : diminution aléatoire du nombre de jour de pluie de 10% pour chaque mois.

**Scenario2** : diminution aléatoire du nombre de jour de pluie de 20% pour chaque mois.

**Scenario3** : diminution aléatoire du nombre de jour de pluie de 30% pour chaque mois.

#### **Scenarios de diminution de l'intensité pluviométrique**

Les premiers scénarios concernent la variation pluviométrique lié au nombre de jours de pluie. Elle permet la diminution de la hauteur de pluie totale annuelle. Un ratio est obtenu entre la nouvelle hauteur de pluie et la hauteur de pluie annuelle initiale pour chacune des scénarios 1, 2 et 3.

Le second type de scénario concerne la diminution de l'intensité de pluie. Il est obtenu en multipliant chaque pluie journalière par les ratios précédemment obtenus.

**Scenario4** : diminution de l'intensité pluviométrique de 10% pour chaque mois.

**Scenario5** : diminution de l'intensité pluviométrique de 20% pour chaque mois.

**Scenario6** : diminution de l'intensité pluviométrique de 30% pour chaque mois.

Notons que le cumul de pluies issues du nombre de jours de pluie diminué est égal au cumul de l'intensité pluviométrique diminué.

#### **Scenarios d'augmentation de la hauteur pluviométrique**

Les scénarios 7,8 et 9 est une augmentation directe de la pluie annuelle totale de 10%, 20% et 30%. Ils sont obtenus en multipliant la série journalière de la pluie brute par 10%, 20% et 30%

**Scenario7** : Multiplication de la pluie brute par 10% pour chaque mois.

**Scenario8** : Multiplication de la pluie brute par 20% pour chaque mois.

**Scenario9** : Multiplication de la pluie brute par 30% pour chaque mois.

Dans la suite du travail, on évaluera la réponse des bassins versants en termes de déficit en ruissellement sous l'influence de ces scénarios de changement climatique.

## 4- Résultats et discussions

### 4.1- Résultats des analyses pluviométriques

#### 4.1.1- Indice de Nicholson et du Filtre passe-bas de Hanning

L'évolution des indices de Nicholson et ceux de l'élimination saisonnière au moyen du Filtre de Hanning montre que la variabilité pluviométrique des différents bassins est marquée par deux périodes climatiques très différentes. Une première période à pluviométrie excédentaire observée sur la période 1961-1969 et une seconde période globalement sèche avec quelques années excédentaires de 1970 à 2004. La reprise de la pluie est plus rapide dans les bassins de la zone soudano-sahélienne (Wayen, Noberé et Dagou) où des indices positifs sont observables dès 2002. Tandis que dans les bassins de la zone sahélienne (Koriziena et Rambo), la reprise est retardée. Des indices positifs sont observés à partir de 2004.

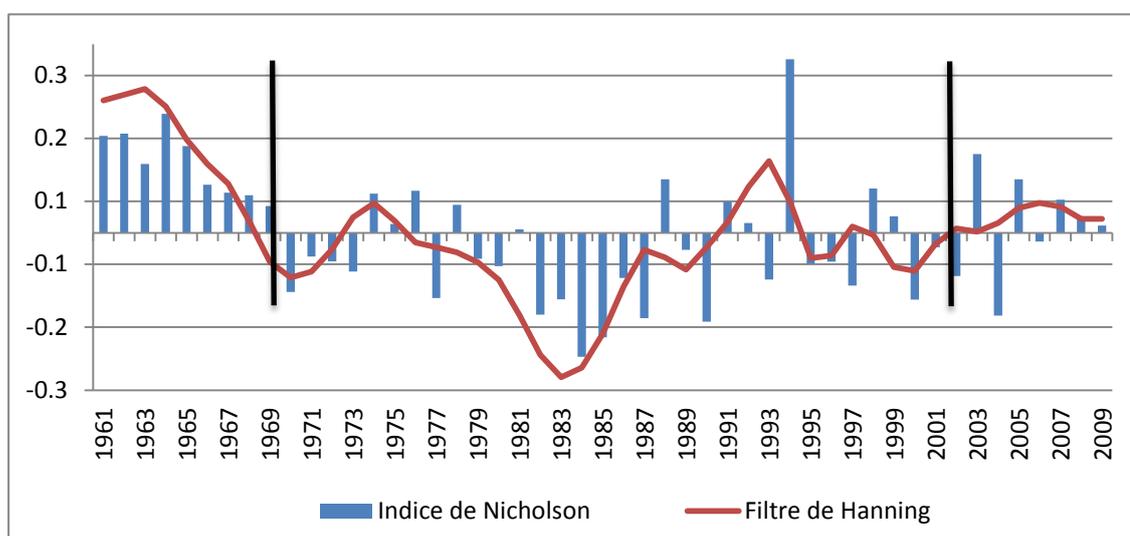


Figure 28: Indice de Nicholson et Filtre pass bas de Hanning de Wayen

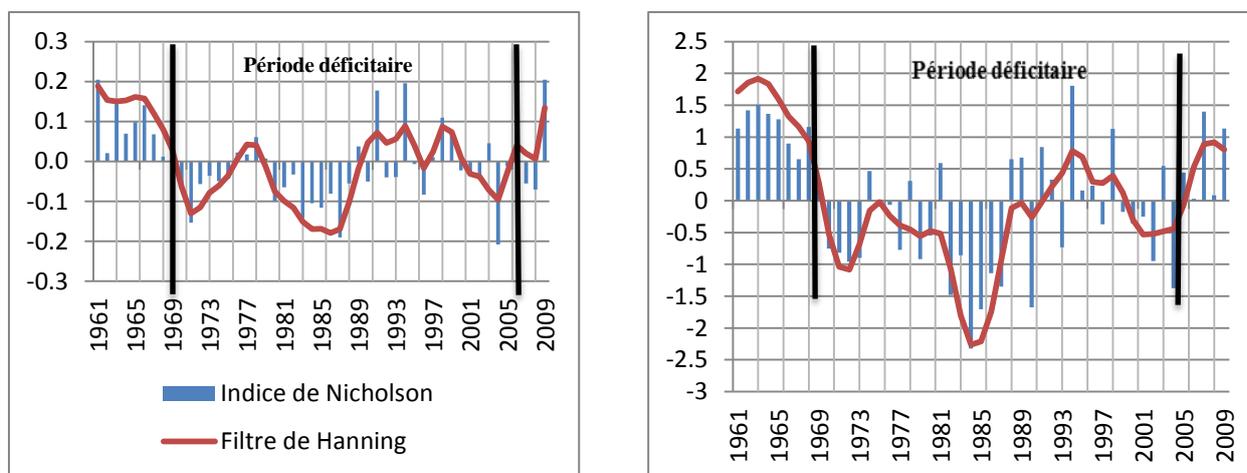
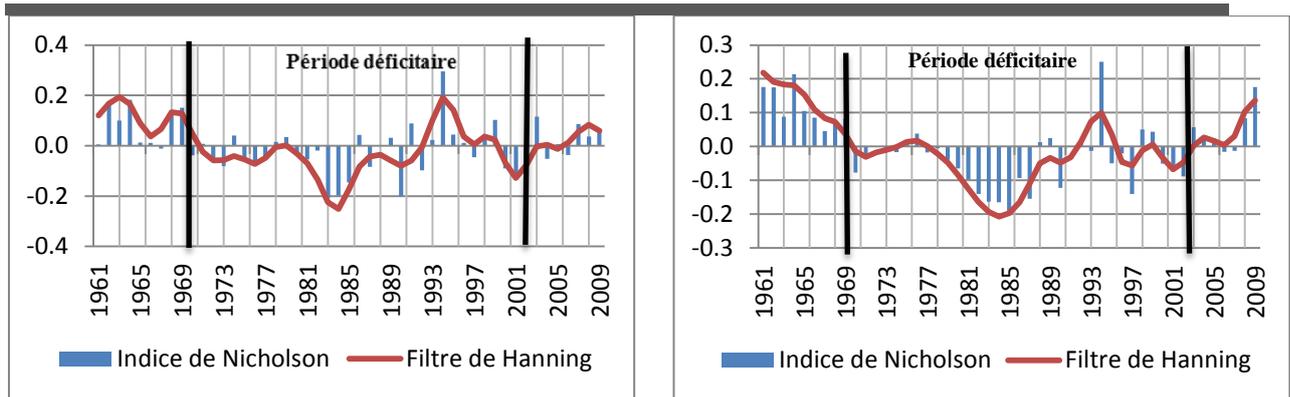


Figure 29: Indices de Nicholson et Filtre pass bas de Hanning (à gauche Koriziena, à droite Rambo)



**Figure 30:** Indices de Nicholson et Filtre pass bas de Hanning (à gauche Noberé, à droite Dagou)

#### 4.1.2- Test de Pettitt et du Test de Lee et Heghenian

Le Test de Pettitt appliqué aux différents bassins montre la présence de rupture au niveau du bassin de Koriziena, Rambo et Dagou. Le résultat du Test de Pettitt est une hypothèse nulle (absence de rupture) rejetée respectivement au seuil de 90%,95% et 90%. Pour le bassin Koriziena, Dagou et Rambo. Toutes les ruptures se situent dans l'année 1969. Par contre pour le bassin de Noberé, l'hypothèse nulle (absence de rupture) est acceptée au seuil de 99% ; 95% et 90%.

Le test de Lee et Heghinian confirme qu'il y'a bel et bien rupture et les positionne dans l'année 1969. Pour le bassin de Noberé cependant, le test de Lee et Heghinian indique qu'il y'a eu rupture dans l'année 1969.

L'application du test de Pettitt a permis d'identifier des ruptures et leurs années dans les séries pluviométriques. L'identification des ruptures permet de distinguer deux périodes de fluctuations pluviométriques sur le bassin. Une période globalement humide avant 1969 et une période sèche après cette date mais on constate une reprise dans les années 2000. Le tableau suivant donne un récapitulatif des résultats et le déficit observé avant et après la rupture.

Stations	Test de Pettitt	Test de Lee et Heghinian	Moyenne précipitations totale	Moyenne avant la rupture	Moyenne après la rupture	Déficit
Wayen	Rupture	Rupture	632.50	745.68	610.47	18.1%
Noberé	Pas de rupture	Rupture	838.60	919.94	820.29	10.8%
Rambo	Rupture	Rupture	581.43	691.69	556.63	19.5%
Koriziena	Rupture	Rupture	627.81	792.90	590.66	25.5%
Dagou	Rupture	Rupture	745.11	886.97	713.19	19.6%

**Tableau 2 :** Tableau récapitulatif du test de Pettitt et du test de Lee et Hagenian appliqué aux bassins d'étude

## 4.2- Résultats de la modélisation hydrologique du bassin de Wayen

### 4.2.1- Calage et validation du modèle IHACRES sur le bassin de Wayen

Le modèle IHACRES a permis d'effectuer des calages et validations en années sèches et en années humides. Les résultats sont récapitulés dans les tableaux 3 et 4.

Le calage en année sèche, sur la période 1981-1990, est satisfaisant. Le jeu de paramètre à l'optimum est :  $a=16.03$  ;  $b=3$  ;  $c=0.5$ . La validation du modèle au regard des différentes valeurs de Nash est meilleure en années humides qu'en années sèches. Toutefois ces valeurs sont proches de 0.60 et donc acceptable.

Le calage année humide sur la période 1991-1994 donne de très bonnes valeurs de Nash, de l'ordre de 0.90. Le jeu de paramètre à l'optimum est  $a=15.88$ ;  $b=3$ ;  $c=0.5$ .

Concernant la validation du modèle, on remarque que pour Wayen, quelle que soit la période de calage et de validation (année sèche ou humide), on obtient de bonnes valeurs de Nash.

**Tableau 3:** Calage en années sèches et validations du modèle IHACRES sur Wayen

Modèle IHACRES	Calage années sèche	Validations année humide			Validations année sèche		
	1981-1990	1991-1994	1997	2002	1976-1980	1995-1996	1998-2001
NS	0.75	0.47	0.47	0.76	0.27	0.51	0.72
NS_sqrt	0.85	0.79	0.71	0.71	0.28	0.52	0.67
NS_log	0.87	0.82	0.73	0.76	0.68	0.66	0.63

**Tableau 4:** Calage en années humides et validations du modèle IHACRES sur Wayen

Modèle IHACRES	Calage année humide	Validations année humide		Validations année sèche		
	1991-1994	1997	2002	1976-1990	1995-1996	1998-2001
NS	0.78	0.78	0.72	0.64	0.73	0.70
NS_sqrt	0.90	0.85	0.78	0.79	0.77	0.77
NS_log	0.90	0.86	0.77	0.85	0.78	0.75

### 4.2.2- Calage et validation du modèle GR4J sur le bassin de Wayen

Le modèle GR4J inclus dans Hydromad reproduit moyennement les débits de Wayen. Les valeurs de Nash obtenues sont plus ou moins égales à 0.60. Le jeu de paramètres optimum du calage est  $x_1=513.13$ ,  $x_2=0.075$ ,  $x_3=1.36$ ,  $x_4=2.53$ ,  $S_0=0.2$ ,  $R_0=0.5$ .

**Tableau 5:** Calage et validations du modèle GR4J sur Wayen

Modèle GR4J	Calage année sèche	Validations année humide			Validations année sèche		
	1981-1990	1991-1994	1997	2002	1976-1990	1995-1996	2001-2002
NS	0.23	-2.50	0.57	0.59	0.15	-0.08	0.12
NS_sqrt	0.60	0.33	0.65	0.67	0.55	0.54	0.55
NS_log	0.45	0.56	0.65	0.67	0.44	0.37	0.48

### 4.3- Résultat de la modélisation hydrologique du bassin de Koriziena

#### 4.3.1- Calage et validation du modèle IHACRES sur le bassin de Koriziena

Le modèle IHACRES a permis de faire un bon calage et validations en années sèches (tableau 6) et en années humides (tableau 7).

En années sèches, le calage du modèle IHACRES sur la période 1985-1990 donne des bons résultats. Le jeu de paramètre optimum obtenu pour la période est  $a=7.27$  ;  $b=3$  ;  $c= 1.36$ .

En années humides, le modèle IHACRES est bien calée sur la période 1991-1994. Le jeu de paramètre optimum obtenu est  $a= 4.44$ ;  $b= 2.99$ ;  $c= 0.5$ .

On remarque qu'à Koriziena, Quelle que soit la période de calage (années sèches ou humides), le NS\_log est le plus élevé. Cette valeur indique que le modèle donne autant de poids aux valeurs des débits les plus élevés tout comme les plus faibles.

On remarque que quelle soit la période de calage, (années sèches ou humides), lors de la validation, les Nash sont élevés en années humides. La validation en année humide donne parfois des valeurs de Nash plus élevé que celui obtenue lors du calage.

Le modèle calé en années sèches donne des valeurs de Nash satisfaisantes ( $NS>0.60$ ) lors de la validation dans la période 1991-2002.

**Tableau 6:** Calage en année sèches et validations du modèle IHACRES de Koriziena

Modèle IHACRES	Calage année sèche	Validations année humide		Validations année sèche	
	1985-1990	1991-1994	1976-1979	1980-1984	1995-2002
NS	0.71	0.69	0.42	0.49	0.63
NS_sqrt	0.81	0.67	0.39	0.41	0.77
NS_log	0.83	0.73	0.12	0.38	0.82

**Tableau 7:** Calage en années humides et validations du modèle IHACRES sur Koriziena

Modèle IHACRES	Calage année humide	Validations année humide	Validations année sèche	
	1991-1994	1976-1979	1980-1990	1995-2002
NS	0.64	0.51	0.52	0.52
NS_sqrt	0.79	0.64	0.74	0.75
NS_log	0.85	0.58	0.81	0.85

#### 4.3.2- Calage et validation du modèle GR4J sur le bassin de Koriziena

Le modèle GR4J inclus dans Hydromad ne reproduit pas bien les débits quel que soit la période de calage (années sèches ou humides). Le jeu de paramètres du calage est  $x_1=199.8$ ,  $x_2=0.031$ ,  $x_3=0.37$ ,  $x_4=3.31$ ,  $S_0=0.2$ ,  $R_0=0.5$ .

**Tableau 8:** Calage en années sèche du modèle GR4J de Koriziena

Modèle GR4J	Calage année sèche	Validations année humide		Validations année sèche	
	1985-1990	1991-1994	1976-1979	1980-1990	1995-2002
NS	0.45	-0.08	0.42	0.043	0.11
NS_sqrt	0.63	0.62	0.64	0.44	0.52
NS_log	0.64	0.74	0.71	0.56	0.63

#### 4.4- -Résultat de la modélisation hydrologique du bassin de Noberé

##### 4.4.1- Calage du modèle IHACRES sur le bassin de Noberé

Le calage du modèle IHACRES sur le bassin de Noberé en années sèches (tableau 1) n'est pas satisfaisant. Les Nash obtenus sont faibles. On obtient même des valeurs négatives du Nash lors de la validation.

**Tableau 9:** Calage en années humides et validations du modèle IHACRES sur Noberé

Modèle IHACRES	Calage année humide	Validations année sèche	
	1993-1999	1971-1992	2000-2002
NS	0.03	0.01	-0.04
NS_sqrt	0.18	-0.01	0.12
NS_log	0.23	-0.17	0.41

#### 4.4.2- Calage du modèle GR4J sur le bassin de Noberé

Le calage du modèle GR4J sur le bassin de Noberé sur les années humides (tableau 10) n'est pas satisfaisant. Les Nash obtenus sont faibles. On obtient même des valeurs négatives du Nash lors de la validation.

**Tableau 10:** Calage en années et validations du modèle GR4J sur Noberé

Modèle GR4J	Calage années humides	Validations années sèches	
	1993-1999	1971-1992	2000-2002
NS	0.02	-0.008	-0.06
NS_sqrt	0.29	0.17	0.05
NS_log	0.39	0.32	0.35

#### 4.5. Résultat de la modélisation hydrologique du bassin de Dagou

##### 4.5.1- Calage du modèle IHACRES sur le bassin de Dagou

Le calage du modèle IHACRES sur le bassin de Noberé en années sèches (tableau 11) n'est pas satisfaisant. Les Nash obtenus sont faibles.

**Tableau 11:** Calage en années sèches et validations du modèle IHACRES sur Dagou

Modèle IHACRES	Calage années sèches	Validations années humides	Validations années sèches
	1996-2000	1992-1995	2000-2002
NS	0.25	0.21	0.13
NS_sqrt	0.33	0.15	0.11
NS_log	0.37	0.44	0.14

##### 4.5.2- Calage du modèle GR4J sur le bassin de Dagou

Le calage du modèle GR4J sur le bassin de Dagou dans les années humides (tableau 12) n'est pas satisfaisant. Les Nash obtenus sont faibles.

**Tableau 12:** Calage en années sèches et validations du modèle GR4J sur Dagou

Modèle GR4J	Calage année sèche	Validations année humide	Validations année sèche
	1996-2000	1992-1995	2000-2002
NS	0.15	0.19	0.13
NS_sqrt	0.21	0.15	0.81
NS_log	0.36	0.34	0.23

## 4.6. Résultat de la modélisation hydrologique du bassin de Rambo

### 4.6.1- Calage du modèle IHACRES sur le bassin de Rambo

Le calage du modèle IHACRES sur le bassin de Noberé en années sèches (tableau 13) n'est pas satisfaisant. Les Nash obtenus sont petits par rapport à 0.60.

**Tableau 13:** Calage et validations du modèle IHACRES sur Rambo

Modèle IHACRES	Calage année sèche	Validations année humide	Validations année sèche
	1983-1989	1992-1999	2000-2002
NS	0.19	0.16	0.11
NS_sqrt	0.37	0.27	0.15
NS_log	0.37	0.30	0.26

### 4.6.2- Calage du modèle GR4J sur le bassin de Rambo

Le calage du modèle GR4J sur le bassin de Rambo dans les années humides n'est pas satisfaisant. Les Nash obtenus sont petits par rapport à 0.60.

**Tableau 14:** Calage et validations du modèle GR4J sur Rambo

Modèle GR4J	Calage année sèche	Validations année humide	Validations année sèche
	1983-1989	1992-1999	2000-2002
NS	0.17	0.12	0.11
NS_sqrt	0.19	0.20	0.15
NS_log	0.34	0.21	0.26

Les différents résultats de calage obtenus sur le bassin de Noberé, Dagou et Koriziena ne permettent pas de valider le modèle. Pour la suite du travail, on effectuera les simulations sous les scénarios de variabilité pluviométrique sur les bassins de Wayen et de Koriziena uniquement.

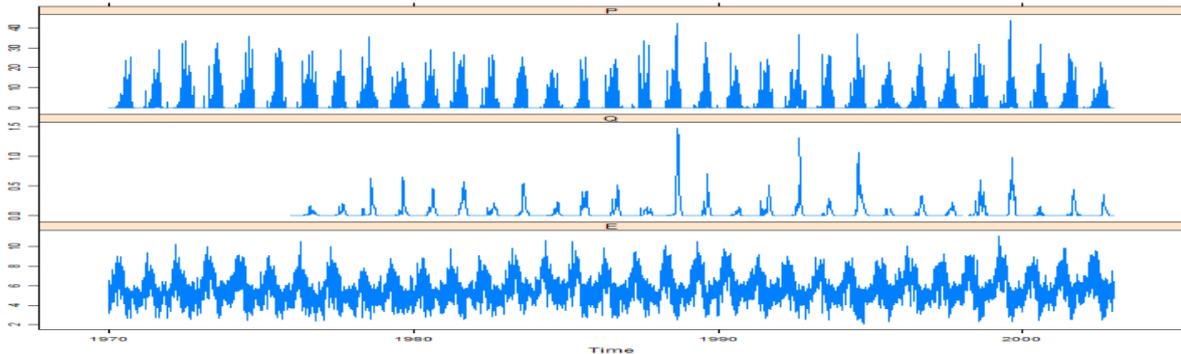
## 4.7. Récapitulatif des modèles retenus pour les simulations

Pour la suite du travail (simulations sous les scénarios de variabilités pluviométriques), on retiendra pour le bassin de Wayen et celui de Koriziena, le modèle IHACRES. Le modèle le plus performant du bassin de Wayen a été calé en année humide dans la période 1991-1994. Pour le bassin de Koriziena, la période de 1985-1990 est celle qui a donné un modèle le plus performant. Le tableau ci-dessous récapitule les résultats.

**Tableau 15:** Modèle et Paramètres retenus pour le bassin de Wayen et Koriziena

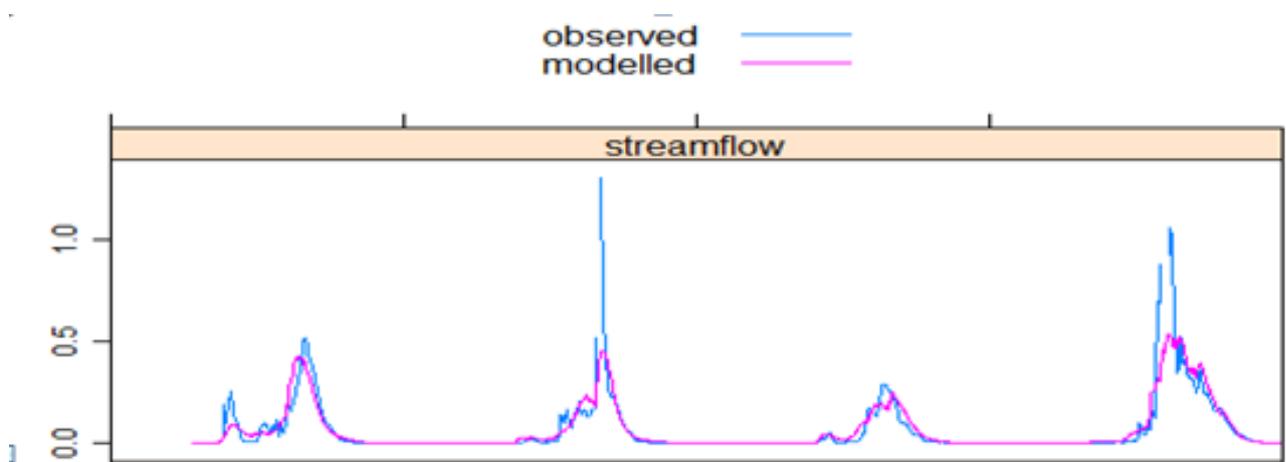
Modèle IHACRES	Nash Wayen	Paramètres du modèle	Nash de Koriziena	Paramètres du modèle
NS	0.78	a=15.88	0.71	7.27
NS_sqrt	0.90	b= 3	0.81	3
NS_log	0.90	c=0.5	0.84	1.36

#### 4.8. Graphe des données d'entrées (P, Q, E) et des données de sorties (débits observés et simulés) de Wayen

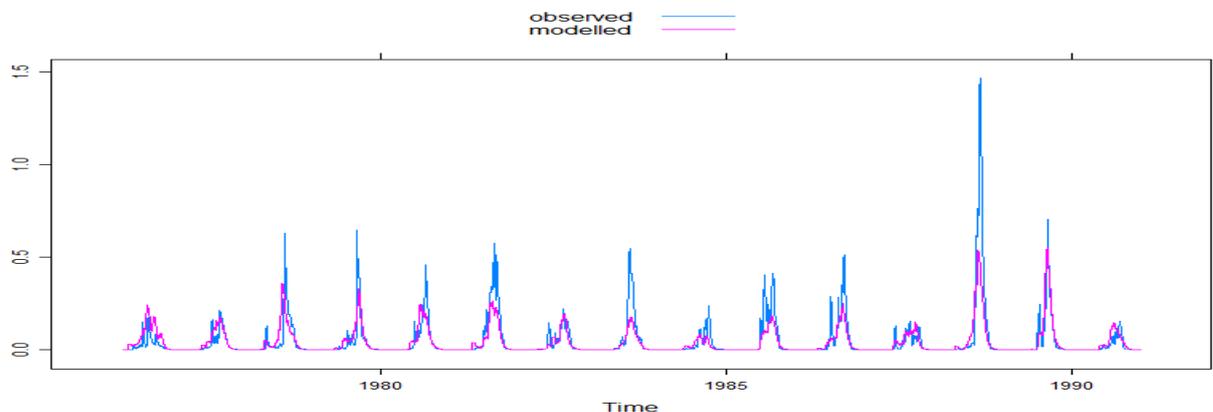


Le résultat graphique de la simulation des débits sur la période 1991-1994 (Figure 32) et la validation sur la période 1980-1990 (Figure 33) montrent un assez bon synchronisme entre les lames d'eau calculées et observées. Cependant les débits de pointe des hydrogrammes simulés sont sous-estimés, mais l'écart demeure acceptable

**Figure 31:** Graphe des données d'entrées du modèle (Pluie, Débit, Evapotranspiration) de Wayen

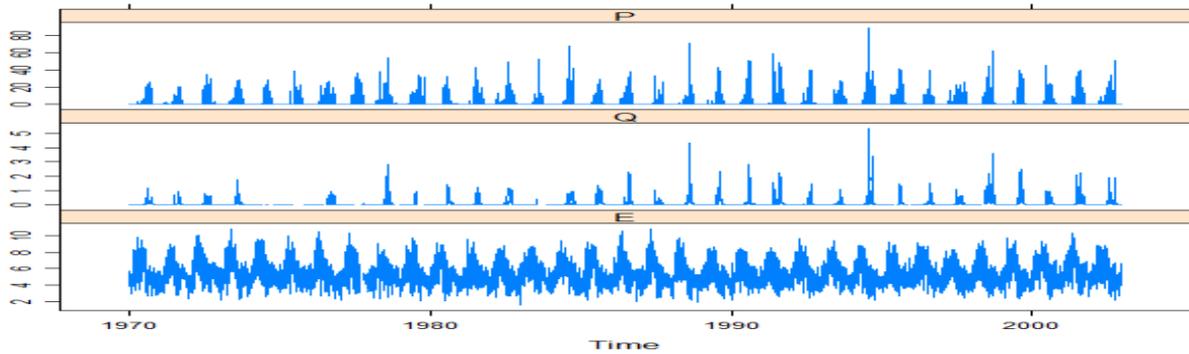


**Figure 32 :** Graphe des débits observés et simulés lors du calage de Wayen (1991-1994)



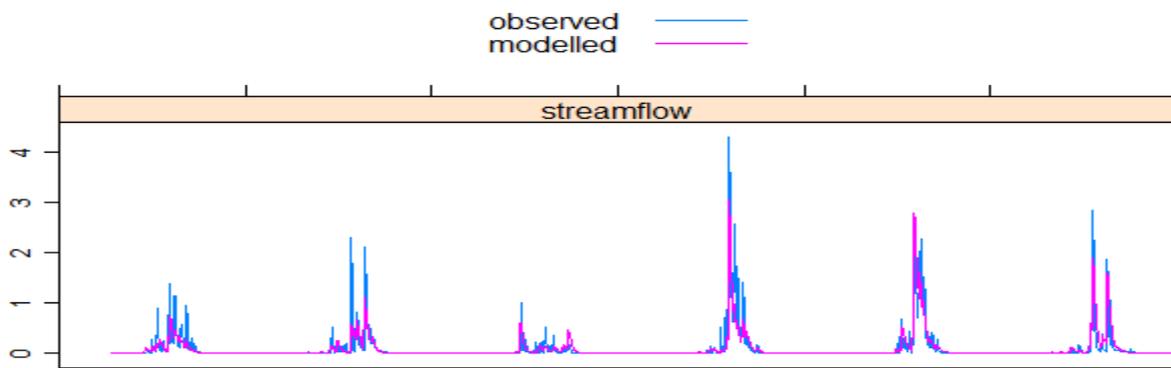
**Figure 33:** Graphe des débits observés et simulés lors de la validation de Wayen (1980-1990)

#### 4.9. Graphe des données d'entrées (P, Q, E) et des données de sorties (débits observés et simulés) de Wayen

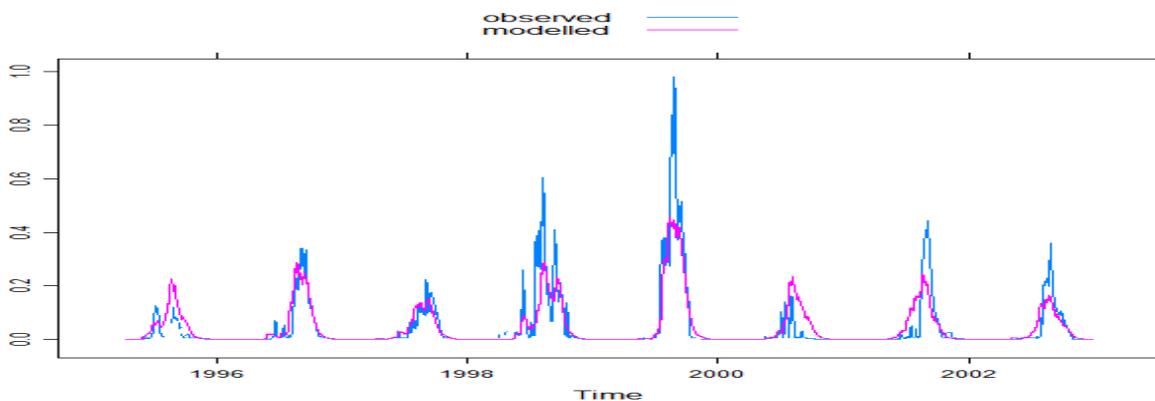


**Figure 34 :** Graphe des données d'entrées du modèle (Pluie, Débit, Evapotranspiration) de Koriziena

Le résultat graphique de la simulation des débits sur toute la période 1985-1990 (Figure 34) et la validation montrent un assez bon synchronisme entre les lames d'eau calculées et observées. Cependant les débits de pointe des hydrogrammes simulés sont sous-estimés, mais l'écart demeure acceptable



**Figure 35:** Graphe des débits observés et simulés lors du calage de Koriziena (1985-1990)



**Figure 36:** Graphe des débits observés et simulés lors de la validation de Koriziena (1996-2002)

## 4.10. Simulations sous les scénarios de variabilités pluviométriques

### 4.10.1- Bassin de Wayen

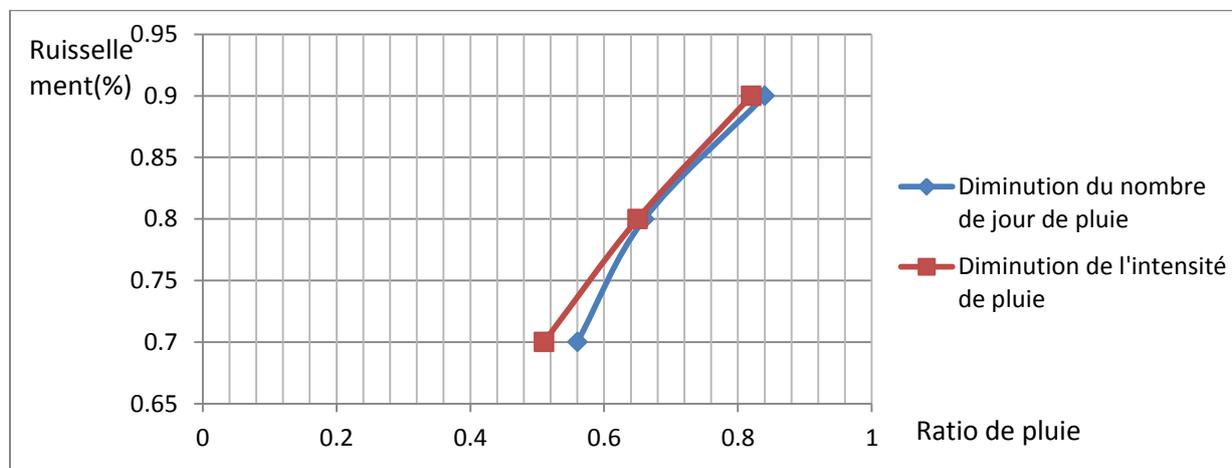
#### ▪ Diminution de la fréquence et de l'intensité pluviométrique

La diminution de la fréquence de pluie a comme conséquence une diminution exponentielle du ruissellement. En effet, à nombre de jour de pluie moins 10%, la perte en ruissellement est de 16% et à nombre de jour de pluie moins 30%, la diminution est de 44%.

La diminution de l'intensité de pluie entraîne sur le ruissellement un effet similaire à la diminution de la fréquence de pluie mais plus élevée. En effet, pour 30% d'intensité de pluie en moins, on a une perte en ruissellement de 49% alors qu'elle était de 44% lors de la diminution de la fréquence pluviométrique.

**Tableau 16:** Diminution de la fréquence et de l'intensité pluviométrique à Wayen

	Diminution de la fréquence de pluie			Diminution de l'intensité de pluie		
	Scenario1	Scenario2	Scenario3	Scenario4	Scenario5	Scenario6
Pluie restant	90%	80%	70%	90%	80%	70%
Ruissellement restant	84%	66%	56%	82%	65%	51%
Pertes en ruissellement	16%	34%	44%	18%	35%	49%



**Figure 37 :** Graphe des scénarios de diminution de la hauteur et de l'intensité de Wayen

#### ▪ Augmentation de la fréquence pluviométrique de Wayen

L'augmentation linéaire de la hauteur de pluie de 10%, 20% et 30% entraîne une augmentation du ruissellement respectivement de 19, 44 et 69%. A chaque augmentation de la pluie, on a un apport en ruissellement d'approximativement le double. Par exemple, pour 20% de hauteur de pluie en plus, l'apport en ruissellement est de 44%.

**Tableau 17:** Augmentation de la hauteur de pluie de 10, 20 et 30%, bassin de Wayen

	Augmentation de la pluie		
	Scenario 7	Scenario 8	Scenario 9
Pluie augmenté	110%	120%	130%
Ruissellement	119%	144%	169%
Apport en ruissellement	19%	44%	69%

#### 4.10.2- Bassin de Koriziena

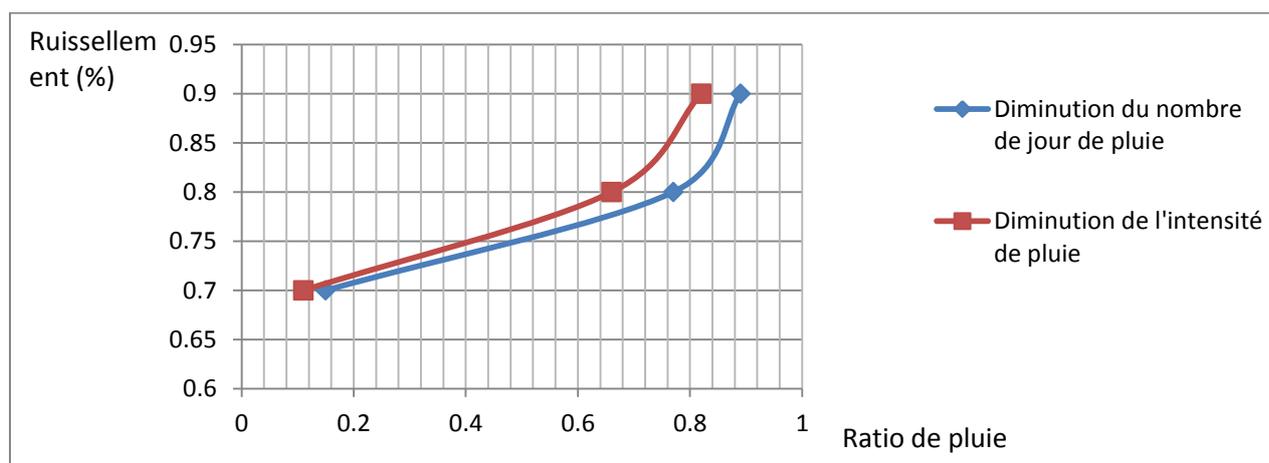
##### 5. Diminution de la fréquence et de l'intensité pluviométrique

La diminution de la fréquence de pluie entraîne une diminution du ruissellement. Pour 10% de la fréquence de pluie en moins, on a 11% de perte en ruissellement et pour 30% de diminution, on a 85% de perte en ruissellement.

Lorsqu'on diminue l'intensité pluviométrique de 10%, la perte en ruissellement est de 18% et pour une diminution de l'intensité de 30%. La perte en ruissellement est de 89%. Le ruissellement restant au sein de Koriziena est quasiment nul. La diminution de l'intensité pluviométrique a un impact plus élevé sur le ruissellement par rapport à la diminution de la fréquence pluviométrique

Tableau 18: Scenario de diminution de la hauteur et de l'intensité pluviométrique de Koriziena

	Diminution du jour de pluie			Diminution de l'intensité de pluie		
	Scenario1	Scenario2	Scenario3	Scenario4	Scenario5	Scenario6
Pluie restant	90%	80%	70%	90%	80%	70%
Ruissellement restant	89%	77%	15%	82%	66%	11%
Perte en ruissellement	11%	23%	85%	18%	34%	89%



**Figure 38:** Graphe des scenarios de diminution de la hauteur et de l'intensité de pluie de Koriziena

▪ **Augmentation de la fréquence pluviométrique de Koriziena**

L'augmentation linéaire de la hauteur de pluie de respectivement 10%, 20% et 30% entraîne une augmentation exponentielle des écoulements de 15%, 35% et 49%. Ainsi à seulement 30% de pluie en plus, on aura un apport en ruissellement de presque la moitié.

**Tableau 19** : Augmentation de la hauteur de pluie de 10, 20 et 30%, bassin de Koriziena

	Scenario d'augmentation de la pluie		
	Scenario 7: + 10%	Scenario 8: +20%	Scenario 9: +30%
Pluie augmenté	110%	120%	130%
Ruissellement	115%	135%	149%
Apport en ruissellement	15%	35%	49%

#### 4.11- Discussions

Les simulations effectuées précédemment montrent que sur les deux bassins étudiés, la baisse de l'intensité pluviométrique a un impact plus élevé sur la diminution du ruissellement comparée à la diminution de la fréquence pluviométrique. Et cela qu'elle que soit la position géographique du bassin (Koriziena situé à l'extrême Nord et Wayen situé au Centre du Burkina Faso)

Il en ressort que le bassin de Wayen a une diminution en ruissellement plus faible que le bassin de Koriziena. Par exemple pour une réduction à 30% de l'intensité de pluie, le ruissellement a chuté de 49% à Wayen et de 89% à Koriziena. Pour le même scénario, les deux bassins ont une réponse très différente.

Ce résultat peut s'expliquer par le taux d'occupation de Wayen. Les cartes d'occupations des sols dressés (voir Figure 15 et 23) à partir des images LANDSAT montrent que le bassin de Wayen est fortement occupé à l'opposé du bassin de Koriziena qui est faiblement occupé. On peut s'attendre à ce que les surfaces inoccupées de Koriziena participent plus aux écoulements et donc à une augmentation du ruissellement. Ce qui n'est pas le cas. Dans une étude publiée dans la revue Sècheresse, (Mahé et al. 2010) ont montré que dans le bassin de Nakambe en amont de la station de Wayen, depuis 1970, les crues sont plus précoces, plus intenses et moins étalées dans le temps.

La population a plus que doublé sur le bassin de Nakambe à Wayen, passant de 0.8 millions à 1.8 millions (Mahé et al. 2010). On sait qu'en Afrique de l'Ouest, et particulièrement en milieu sahélien, l'accroissement de la population est un facteur induisant des variations des états de surfaces. Les terres arables sont surexploitées, les espaces jadis en végétation sont défrichés et cultivés, les terres jadis marginales sont colonisées en faisant appel à des nouvelles pratiques de conservation et de restauration de sols.

Tous ces effets conjugués sur le sol par l'homme à entraîner sa dégradation. Les surfaces de sols nus et cultivés ont considérablement augmenté avec comme conséquence l'augmentation du ruissellement. L'impact de la variabilité pluviométrique dû à un changement climatique sur le ruissellement est plus à craindre sur le bassin de Koriziena que sur le bassin de Wayen.

## 5- Proposition des stratégies d'adaptation au changement climatique

Avec plus de 80% de sa population pratiquant les activités agro-pastorale et sa position géographique bordant le désert du Sahara, le Burkina Faso est particulièrement concernée par l'adaptation au changement climatique. Les modèles climatiques actuels sont plus ou moins satisfaisants pour prévoir les évolutions de températures et ils prédisent des hausses de température pour le continent africain supérieures de 1,5°C à la moyenne mondiale (GIEC, 2007). Si la hausse de températures est imminente, des grandes incertitudes demeurent quant aux projections des précipitations au Sahel, ce qui rend difficiles l'élaboration et la mise en œuvre de stratégies et de politiques d'adaptation adéquates aux différentes échelles. (Sokona and Touré, 2009). Cependant, la sécheresse qui a sévit au Sahel dans les années 70 à 80 a mis à nus la vulnérabilité de la population. Les conséquences étaient bien visibles et permet la mise en place des stratégies d'adaptation à pareil aléas climatiques.

S'adapter au changement climatique en cours consiste donc à réduire la vulnérabilité des pays concerné pour poser les jalons d'un développement plus durable. Cette adaptation peut s'opérer à plusieurs niveaux. Entre autres par l'atteinte et la préservation de la sécurité alimentaire, l'atteinte et la sécurité de l'eau et de l'assainissement, la mise en place des systèmes de prévention et de gestion des catastrophes, la protection des écosystèmes, l'amélioration de la santé et de la protection des personnes.

L'atteinte et la préservation de la sécurité alimentaire sur le plan agricole peuvent être atteintes par le développement des variétés plus adaptés à la sécheresse, des mesures de préservation des sols, la subvention pour les engrais et les semences, l'amélioration des méthodes de transformation et de conservation des aliments ; Sur le plan pastorale, la mise en place des couloirs de transhumance pour les nomades, la gestion des ressources naturelles pour le pâturage, l'augmentation des points d'abreuvement des bétails et même la sédentarisation pour faire face aux cas extrêmes d'absence de pâturage.

L'atteinte et la sécurité de l'eau et de l'assainissement par la recherche, la pratique d'autres alternatives à l'eau de surface tel que la collecte de l'eau de pluie et la réhabilitation des forages et puits, concevoir des techniques d'irrigation économes en eau (par exemple le système goutte à goutte ou des réseaux enterrés). L'assainissement prend en compte la préservation d'un environnement de vie sain, l'intégration de la notion de recyclage dans les gestes quotidien ;

La mise en place des systèmes de prévention et de gestion des catastrophes par la construction des ouvrages hydrauliques prenant en compte l'évolution des régimes hydrologiques, l'état des sols..., la réinstallation des communautés exposées aux risques, le développement des stations météorologiques, la collecte et le suivi des données hydro-climatiques, l'établissement des cartes d'intervention ainsi qu'itinéraires d'évacuation associés.

La protection des écosystèmes par reboisement, la réhabilitation et la gestion des espaces naturelles, le réensemencement des pâturages, la mise en place des techniques de luttés contre l'érosion, le désenclavement des barrages.

---

l'amélioration de la santé et de la protection des personnes des zones vulnérables au changement climatique par la mise en place d'un système d'assainissement efficace, d'un accès à l'éducation, à l'eau potable, à des programmes de prise en charge sanitaire, la création et la réhabilitation des centres de soins de santé. De façon rudimentaire, on peut procéder à la distribution des moustiquaires, des aliments thérapeutiques pour enfants tel que Plumpy'Nut produit localement au Burkina Faso...

Ces mesures d'adaptations évoquées précédemment ne sont pas exhaustives. Elles peuvent être adaptées à chaque communauté. Il est cependant pertinent de noter que l'insuffisance des ressources financières, logistiques et humaines des pays sahéliens en général et du Burkina Faso en particulier est un handicap pour une adaptation appropriée. Il faut noter que pour l'heure, l'aide publique au développement au Sahel est 100 fois moins importante que les besoins estimés dans le rapport Stern de 40 milliards de dollars par an (Banque mondiale, 2006).

Cette aide qui est loin de permettre l'atteinte des Objectifs de Développement du Millénaire au Sahel ne pourra pas en plus prendre en charge des programmes d'adaptation au changement climatique. Il est donc impératif que des ressources additionnelles soient disponibles (Sokona and Touré, 2009) De plus le Sahel qui n'a pas un niveau de pollution « attractif » pour le marché international du carbone ne bénéficie pas des ressources disponibles dans le cas d'un développement durable intégré.

Un partage juste des responsabilités dans la situation climatique actuelle voudrait que le Sahel soit pour le moins tenu non coupable. Les pays développés devraient partager le savoir et transférer des compétences aux différents niveaux et sphères où les risques et vulnérabilités sont élevés au Sahel et ainsi permettre de minimiser la vulnérabilité des pays sahéliens.

---

## Conclusion

La région sahélienne du Burkina Faso de par sa position géographique bordant par le désert du Sahara et les activités agro-sylvo-pastorales de plus de 80% de sa population est très vulnérable au changement climatique. La sécheresse de années 70-80 et les récentes prévisions climatiques futures sont des signaux d'alarmes sur les risques qui pèsent sur la zone. Les sous-bassins soudano-sahéliens du Burkina Faso sont les principales ressources en eau du pays. La modélisation hydrologique a permis de faire de simulations des débits à l'exutoire de ces sous bassins en réponse à un évènement pluvieux grâce au package Hydromad sous R.

Récemment développé, ce package permet d'effectuer des simulations à partir d'un certain nombre de combinaison de fonction de production et de fonction de transfert. Les simulations sous les scénarios hypothétiques de variations pluviométriques a permis de reproduire les ruissellements au sein d'un sous bassin. Il en ressort que la diminution de l'intensité pluviométrique a plus d'impact sur le ruissellement que la diminution du nombre de jours de pluie quelque soient la position géographique et le climat du bassin. L'augmentation du ruissellement est légèrement supérieure à l'augmentation de la hauteur de pluie.

Des études ont montré que l'état de sol d'un bassin a un impact non négligeable sur les écoulements d'un bassin. Ainsi, plus le bassin est occupé par les hommes plus la superficie des sols nus et cultivés sont grandes, les ruissellements augmentent et par conséquent les débits à l'exutoire. Les aménageurs devraient tenir compte de l'évolution des états de surface afin de tirer parti au maximum lors de la conception des ouvrages hydrauliques.

Outre les risques liés aux changements climatiques sur les ressources en eau, d'autres risquent pèsent sur la santé des personnes, les écosystèmes... Des mesures adéquates devraient être mise en place pour réduire la vulnérabilité de la région sahélienne à ces changements.

## BIBIographies

- Bates, B., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., Palutikof, J., 2008. Le Changement climatique et l'eau Document technique VI du GIEC.
- Ibrahim, B., 2012. Caractérisation des saisons de pluies au Burkina Faso dans un contexte de changement climatique et évaluation des impacts hydrologiques sur le bassin du Nakanbé.
- Buontempo, C., Booth, B., Rowell, D., Moufouna-Okia, W., 2010. Climat sahélien : rétrospective et projections.
- Chappell, A., Agnew, C.T., 2004. Modelling climate change in west african sahel rainfall (1931 – 90) as an artifact of changing station locations.
- DIRH, 1993. Carte hydrogéologique du Burkina Faso.
- Hulme, M., Doherty, R., Ngara, T., New, M., Lister, D., 2001. African climate change: 1900–2100. Publ. August 15 17: 145–168, 2001.
- Kandji, S.T., Verchot, L., Mackensen, J., 2006. Climate Change and Variability in the Sahel Region: Impacts and Adaptation Strategies in the Agricultural Sector.
- Karambiri, H., Galiano, S.G.G., Giraldo, J.D., Yacouba, H., Ibrahim, B., Barbier, B., Polcher, J., 2010. Assessing the impact of climate variability and climate change on runoff in West Africa: the case of Senegal and Nakambe River basins. Publ. Online Wiley Online Libr. 2010 Royal Meteorological Society.
- Karambiri, H., Niang, D., 2012. le bassin versant et son complexe.
- Mahe, G., Jean Claude, O., Eric, S., 2005. Sensibilité des cours d'eau ouest-africains aux changements climatiques et environnementaux: extrêmes et paradoxes.
- Meylan, P., Favre, A.-C., Musy, A., 2008. Hydrologie fréquentielle: une science prédictive.
- Mounirou, L.A., 2012. Etude du ruissellement et de l'érosion à différentes échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahélienne du Burkina Faso : Quantification et transposition des données.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. J. Hydrol. 10, 282–290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6
- NASH, J.E., SUTCLIFF, J.V., 1970. RIVER FLOW FORECASTING THROUGH CONCEPTUAL MODELS PART I - A DISCUSSION OF PRINCIPLES.
- O'CONNELL, P.E., NASH, J.E., FARRELL, J.P., 1970. RIVER FLOW FORECASTING THROUGH CONCEPTUAL MODELS PART II -THE BROSNA CATCHMENT AT FERBANE.
- Seguin, J.J., 2005. Projet Réseau SIG-Afrique Carte hydrogéologique de l'Afrique à l'échelle du 1/10 Million.
- Sokona, Y., Touré, A., 2009. Global Chance, L'adaptation en zone sahélienne : état des lieux, perspectives et contraintes.

## ANNEXE

### Annexe I : Script pour déterminer la répartition et le pourcentage des lacunes des séries de débits

#### ## Cet programme permet de déterminer les lacunes des données pluviométriques

```
chemin="C:/Users/KoubraGoudja/Documents/projet/"noms="nobere_colonne.txt" fichier=paste(chemin,noms,sep="")
data=read.table(fichier, header=T,sep="\t")
```

#### ## Détermination des dimensions du tableau

```
nb_lign=nrow(data) #nombre de lignes
nb_col=ncol(data) # nombre de colonnes
```

#### ## Détermination des nombres de lacunes

```
nb_lacune=length(which(is.na(data[1:nb_lign,2])))
```

#### ## periode des donnees nb\_ans

```
datei=as.character(data[1,1]) #premiere date de la liste
ani=as.numeric(substr(datei,start=7,stop=10)) #conversion premiere année en numerique
datef=as.character(data[nb_lign,1]) #derniere date de la liste
anf=as.numeric(substr(datef,start=7,stop=10)) #derniere année en numerique
nb_ans=(anf-ani)+1 #periode des données
```

#### # verification du nombre de jours reelle des données

```
datei=paste(ani,"/1/1",sep="")
datef=paste(anf,"/12/31",sep="")
dates=seq(as.Date(datei), as.Date(datef), "days")
njr_r=length(dates) #nombre de jours reelles des données
```

#### ## Calcul des lacunes par mois

```
table_lacune=matrix(NA,nrow=nb_ans,ncol=12)
nb_lac_mois=0
nb_jrs_mois=0
```

#### #initialisation

```
i=1
jour_données=as.character(data[i,1])
jj1=as.numeric(substr(jour_données,start=1,stop=2))
mois1=as.numeric(substr(jour_données,start=4,stop=5))
annee1=as.numeric(substr(jour_données,start=7,stop=10))
```

```
for (i in 1:nb_lign) {

  jour_données=as.character(data[i,1])
  jj=as.numeric(substr(jour_données ,start=1,stop=2))
  mois=as.numeric(substr(jour_données ,start=4,stop=5))
  annee=as.numeric(substr(jour_données ,start=7,stop=10))
  debit=as.numeric(data[i,2])

  if (mois==mois1) {
    nb_jrs_mois=nb_jrs_mois+1

    if (is.na(debit)) {
      nb_lac_mois=nb_lac_mois+1
    } #fin 2eme if
  } #fin 1er if

  if (mois!=mois1) {
    taux_lac=(nb_lac_mois/nb_jrs_mois)*100

#Inscription du lacune dans la table_lacune
    ilac=annee1-ani+1
    table_lacune[ilac,mois1]=taux_lac

#initialisation
    jj1=as.numeric(substr(jour_données ,start=1,stop=2))
    mois1=as.numeric(substr(jour_données ,start=4,stop=5))
    annee1=as.numeric(substr(jour_données ,start=7,stop=10))
    nb_lac_mois=0
    nb_jrs_mois=0
    nb_jrs_mois=nb_jrs_mois+1

    if (is.na(debit)) {
      nb_lac_mois=nb_lac_mois+1
    }
  } #fin 2eme if
} #fin de for

taux_lac=(nb_lac_mois/nb_jrs_mois)*100
ilac=annee1-ani+1
table_lacune[ilac,mois1]=taux_lac
colnames(table_lacune)=1:12
rownames(table_lacune)=ani:anf
fichier=paste(chemin,"taux_lacunes_",noms,sep="")
```

```
write.table(table_lacune, file = fichier, append = FALSE, sep = "\t", eol = "\r", na = "NA", dec = ".", row.names = T, col.names = T)
```

## Annexe II : Procédure de délimitation des sous bassins sous Arc Gis

Comblent les dépressions du MNT avec l'outil Fill;



Ressortir la grille de direction du MNT en calculant son sens d'écoulement sans dépression ;



Calculer l'accumulation d'eau dans les cellules à partir de la grille de direction du MNT.



Fixer un seuil d'émergence de rivière pour extraire un réseau hydrographique.



Ressortir les contours du bassin à partir d'un exutoire



Effectuer l'intersection entre le contour du bassin et le réseau hydrographique



## Annexe III : Script pour extraire les séries chronologiques (Pluie, ETP, Températures) d'un bassin à partir de données spatialisées.

### # Chemin d'accès au proportion des maillages d'un bassin

```
chemin= "C:/Users/Koubra Goudja/Documents/Stage/koubra_programs/Données climatiques burkina/Proportion des mailles 02degres/"
```

### # chemin d'accées aux séries chronologiques

```
chemincru="C:/Users/Koubra Goudja/Documents/Stage/koubra_programs/Données climatiques burkina/"
```

```
fichierpropor=paste(chemin,"Korizienamaille02.txt",sep="") # repertoire des maillages
```

```
maillesproportions=read.table(fichierpropor, header=T,sep="\t")
```

```
days=seq(as.Date("1961/1/1"), as.Date("1961/12/31"), "days")
```

```
dataout=NULL
```

```
rep_pluiemoy=paste(chemincru, "pluie02/",sep="") #répertoire des pluies moy journalière
```

```
period_pluiemoy=1961:2009 # définition de la période totale des pluies moy observés
```

```
dates_pluiemoy=seq(as.Date("1961/1/1"), as.Date("2009/12/31"), "days") #séquence de traitement
```

```
pluiemoy=NULL
```

```
for (iyr in period_pluiemoy){ #
```

```
fichier=paste(rep_pluiemoy,iyr, ".txt",sep="")
```

```
data=read.table(fichier, header=F,sep="\t")# lecture des fichiers de pluie années apres année
```

```
nbmailles=nrow(maillesproportions) #nombre de lignes du fichier proportions de mailles
```

```
databassins=NULL
```

```
for (im in 1:nbmailles){
```

```
lat_stat=as.numeric(maillesproportions[im,2])
```

```
lon_stat=as.numeric(maillesproportions[im,3])
```

```
distance=((data[,1]-lat_stat)^2+(data[,2]-lon_stat)^2)^0.5
```

```
mindist=min(distance,na.rm=TRUE)
```

```
num=which(distance==mindist)
```

---

```
databassins=rbind(databassins,as.numeric(data[num[1],])) #fin de boucle permettant
l'extraction des données data burkina correspondant à notre bassin }

nbmois=ncol(data)

for(ijr in 3:nbmois){

value=sum(as.numeric(databassins[,ijr])*as.numeric(maillesproportions[,5]))

pluiemoy=c(pluiemoy,value)

}

}

pluiemoy=c("pluiemoy(mm/d)",pluiemoy)

noms=c("Dates",as.character(dates_pluiemoy))

mat=cbind(noms,pluiemoy)

fichier=paste(rep_pluiemoy,"donneemoyennepluiekorizienanew.txt")#fichier des donnees
pluie moy

write.table(mat, file=fichier, append = FALSE, sep="\t" , eol = "\r", na = "NA", dec = ".",
row.names =F, col.names =F)
```

## Annexe IV : Script des simulations hydrologiques

### #ce programme fait des simulations avec Hydromad

```
library(hydromad)
chemin="C:/Users/Koubra Goudja/Documents/Stage/montravail/"
fichierpqe=paste(chemin,"nobere3.txt",sep="")
datapqe=read.table(fichierpqe, sep="\t", header=T)
colnames(datapqe)=c("Date", "P", "Q1", "Q2", "E")
datapqe$Q1=as.numeric(datapqe$Q1)
datapqe$Q2=as.numeric(datapqe$Q2)
str(datapqe)
datapqe$Date=seq(as.Date("1970/1/1"), as.Date("2002/12/31"), "days")
datapqe$Date=as.Date(datapqe$Date, "%d/%m/%Y")
```

```
library(zoo)
num=c(2,4,5)
datanobere = zoo(datapqe[, num], datapqe$Date, frequency = 1)
colnames(datanobere)=c("P", "Q", "E")
head(datanobere, 6)
summary(datanobere)
```

```
dates=seq(as.Date("1970/1/1"), as.Date("2002/12/31"), "days")
xyplot(datanobere)
ok <- complete.cases(datanobere[, 1:2])
with(datanobere, sum(Q[ok])/sum(P[ok]))
```

```
ts70s <- window(datanobere, start = "1971-01-01", end = "1979-12-31")
ts80s <- window(datanobere, start = "1980-01-01", end = "1989-12-31")
ts00s <- window(datanobere, start = "2000-01-01", end = "2002-12-31")
ts93_99s <- window(datanobere, start = "1993-01-01", end = "1999-12-31")
```

```
datac=ts80s
```

### #Modélisation hydrologique

```
datanobereMod <- hydromad(datac, sma = "cwi", routing = "expuh", tau_s = c(5, 100), tau_q = c(0, 5), v_s = c(0,1) )
```

```
datanobereMod <- hydromad(datac, sma = "cwi", routing = "powuh", a = c(0.01, 60), b = c(0.50, 3), c = c(0.50,2))
```

```
datanobereMod <- hydromad(datac, sma = "cmd", routing = "lambda", tau_s = c(5, 100), tau_q = c(0, 5), v_s = c(0,1) )
```

```
datanobereMod <- hydromad(datac, sma = "gr4j", routing = "gr4jrouting", x1 = c(0,4000), x2 = c(0,2), x3 = c(0,200), x4 = c(0.6, 10), S_0 = 0.2, R_0 = 0.5)
```

```
datanobereFit <- fitByOptim(datanobereMod, samples = 300,method = "PORT")  
datanobereFit <- fitBySampling(datanobereMod)  
datanobereFit <- fitByDE(datanobereMod)  
summary(datanobereFit)  
xyplot(datanobereFit, with.P = TRUE, xlim = as.Date(c("1990-01-01","1999-12-31")))
```

### **#Validations**

```
ts71_92s <- window(datanobere, start = "1971-01-01",end = "1992-12-31")  
sim71_92s <- update(datanobereFit, newdata = ts71_92s)  
summary(sim71_92s)  
ts00_02s <- window(datanobere, start = "2000-01-01",end = "2002-12-31")  
sim00_02s <- update(datanobereFit, newdata = ts00_02s)  
summary(sim00_02s)
```