

PAS-PNA

BENIN



## Etude de Vulnérabilité Sectorielle face aux changements climatiques au Bénin

### Secteur : Ressources en Eau


Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation.

Janvier 2019

Mis en oeuvre par :

**giz** Deutsche Gesellschaft  
für Internationale  
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Mandaté par :

 Ministère fédéral  
de l'Environnement, de la Protection de la Nature  
et de la Sécurité nucléaire  
  
de la République fédérale d'Allemagne

Sous la tutelle de :

 MINISTÈRE DU CADRE DE VIE  
ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE  
RÉPUBLIQUE DU BÉNIN

Avec la coopération de :

 CENTRE DE PARTENARIAT ET  
D'EXPERTISE POUR LE  
DÉVELOPPEMENT DURABLE

## AUTEURS

Luc O. SINTONDI (Coordonnateur de l'étude)

Jean HOUNKPE

Félicien D. BADOU

Maurice AHOANSOU

Charlène O. U GABA

Romaine ASSOGBA BALLE

## *Personne-ressource*

Expédit Wilfrid VISSIN

## COMITE DE REVISION

Sarah D'HAEN

Edmond TOTIN

Alcade SEGNON

Nestor AHO

Eustache BOKONO-GANTA

Cette publication a été développée avec le support des équipes scientifiques de Climate Analytics, dans le cadre de la Composante 2, Activité II.3 du projet PAS-PNA.

Cette publication peut être reproduite en tout ou partie, sous quelque forme que ce soit, à des fins pédagogiques et non lucratives, sur autorisation spéciale de Climate Analytics, à condition que sa source soit mentionnée et référencée.

Cette publication ne peut être revendue ou utilisée à des fins commerciales sans autorisation écrite préalable de Climate Analytics.

Nous regrettons toutes erreurs ou omissions qui auraient été commises involontairement.

Ce document peut être cité sous le titre :

SINTONDI L., HOUNKPE J., AHOANSOU M., ASSOGBA BALLE R., BADOU F., GABA C., VISSIN E., 2019. Etude de Vulnérabilité face aux changements climatiques du Secteur Ressources en Eau au Bénin. Report produced under the PAS-PNA project. Climate Analytics GmbH, Berlin.

Une copie numérique de ce rapport est disponible en ligne sur :  
[www.climateanalytics.org/publications](http://www.climateanalytics.org/publications).

Ce rapport est financé dans le cadre du Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation (PAS-PNA), relevant de l'Initiative Internationale pour le Climat (IKI) soutenue par le Ministère fédéral de l'Environnement, de la Protection de la Nature et de la Sécurité Nucléaire (BMU) en vertu d'une décision du Parlement de la République fédérale d'Allemagne, et mis en oeuvre par Climate Analytics et la Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).

## Tableau des matières

<b>Tableau des matières .....</b>	<b>1</b>
<b>Sigles et abréviations .....</b>	<b>2</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>5</b>
<b>Résumé analytique .....</b>	<b>6</b>
<b>1 Introduction .....</b>	<b>7</b>
1.1 Point sur le projet PAS-PNA et la composante 2 .....	7
1.2 Objectifs de l'étude et pertinence dans le contexte des politiques sectorielles .....	7
<b>2 Approche méthodologique.....</b>	<b>8</b>
2.1 Description du site de mise en œuvre de l'étude.....	8
2.1.1 Description géographique du site .....	8
2.1.2 Profil socio-économique de la zone d'étude.....	9
2.1.3 La problématique de l'eau dans la zone d'étude .....	10
2.1.4 Description de l'horizon temporel et justification du choix de cet horizon .....	11
2.2 Cadre conceptuel de l'étude de vulnérabilité.....	12
2.2.1 Définition du concept de la vulnérabilité et de ses composantes.....	12
2.2.2 Description de la chaîne d'impacts .....	13
2.2.3 Description et justification des données de projections, les RCPS, l'horizon temporel .....	21
2.3 Approche méthodologique de l'étude de vulnérabilité .....	21
<b>3 Résultats .....</b>	<b>22</b>
3.1 Vulnérabilité passée, actuelle et future aux inondations pluviales.....	22
3.1.1 Évaluation de la vulnérabilité actuelle .....	22
3.1.2 Évaluation de la vulnérabilité future .....	29
3.2 Vulnérabilité passée, actuelle et future à la pénurie d'eau dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Savè.....	32
3.2.1 Évaluation de la vulnérabilité actuelle .....	32
3.2.2 Évaluation de la vulnérabilité future .....	37
<b>4 Analyse des options d'adaptation et de la vulnérabilité actuelle et future du secteur de l'eau au Bénin .....</b>	<b>47</b>
4.1 Stratégies et mesures d'adaptation à la récurrence des inondations .....	47
4.2 Stratégies et mesures d'adaptation à la pénurie probable d'eau .....	48
<b>5 Conclusions et recommandations .....</b>	<b>50</b>
<b>6 Références.....</b>	<b>51</b>
<b>7 Annexes : Étude préliminaire des variables hydroclimatiques.....</b>	<b>53</b>

## Sigles et abréviations

ANAEPMR	: Agence Nationale d'Approvisionnement en eau Potable en milieu Rural
ANOPER	: Association Nationale des Organisations Professionnelles des Eleveurs de Ruminants du Bénin
ASTER	: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global
GDEM	Digital Elevation Model (radiomètre spatial perfectionné pour la mesure de la réflectance et des émissions thermiques terrestres modèle numérique de terrain global)
CENATEL	: Centre National de Télédétection et de Suivi Ecologique du Bénin
CePED	Centre de Partenariat et d'Expertise pour le Développement Durable
DCN	: Deuxième Communication Nationale du Bénin sur les Changements Climatiques
DGEau	: Direction Générale de l'Eau
ETR	: Evapotranspiration Réelle
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	: Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GIRE	: Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GIZ	: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
INSAE	: Institut National de la Statistiques et de l'Analyse Economique
MCVDD	Ministère du Cadre de Vie et du Développement Durable
ORSTOM	: Office pour la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer (actuel Institut de Recherche pour le Développement, IRD)
PAS-PNA	: Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation
PMA	: Pays les Moins Avancés
PNA	: Plans Nationaux d'Adaptation
RGPH4	: Quatrième Recensement General de la Population et de l'Habitat
RIVERTWIN	: Regional Model for Integrated Water Management in Twinned River Basins
SAP-Bénin	: Système d'Alerte Précoce du Bénin
SDAGE-Ouémé	: Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux de l'Ouémé
SWAT	: Soil and Water Assessment Tools (outils d'évaluation des sols et des terres)

## Liste des figures

Figure 1: Localisation du bassin de l'Ouémé au Bénin y compris le sous bassin de Savè et les stations pluviométriques utilisés.....	9
Figure 2: Pénurie d'eau à Parakou en 2017 .....	10
Figure 3 Vues aérienne et au sol des inondations de 2010 ; Source: Gouvernement de la République du Bénin (2011), et (Zannou, 2013) .....	12
Figure 4: Les composantes de la vulnérabilité ; Source : Kerstin et al. (2014) .....	12
Figure 5: Chaîne d'impact relative à la vulnérabilité aux risques d'inondations ; Source: adaptée de Kerstin et al. (2014) .....	13
Figure 6: Typologie des inondations au Bénin entre 1984-2010 (Source: DCN, 2011).....	14
Figure 7 : Chaîne d'impact relative à la vulnérabilité aux pénuries d'eau ; Source: adaptée de Kerstin et al. (2014) .....	17
Figure 8: Principes de fonctionnement du modèle hydrologique SWAT. ; Source : SWAT Error Checker – Version 1.2.0.4, July 2015 ( <a href="https://swat.tamu.edu/software/swat-check/">https://swat.tamu.edu/software/swat-check/</a> ) .....	18
Figure 9: Spatialisation du nombre moyen annuel (a) et maximal annuel (b) de pluie journalière supérieure ou égale à 60mm (1970-2015) sur le bassin de l'Ouémé. ....	22
Figure 10: Occurrence des pluies extrêmes pour les trois seuils retenus (Tableau 2) sur la période 1970-2015 .....	23
Figure 11: Tendances dans les séries du nombre de pluies supérieures ou égales à 60 mm. ....	23
Figure 12: Quantiles de périodes de retour 2ans (a), 5ans (b) et 10ans (c) .....	24
Figure 13: Degré d'exposition des arrondissements du bassin de l'Ouémé aux pluies extrêmes.....	25
Figure 14: Indicateurs de sensibilité aux inondations dans le bassin de l'Ouémé.....	26
Figure 15: Impact potentiel des pluies extrêmes dans les arrondissements du bassin de l'Ouémé ....	27
Figure 16: Indice de richesse monétaire correspondant à une capacité d'adaptation ainsi que la capacité moyenne d'adaptation de chaque commune. ....	28
Figure 17: Indice de vulnérabilité aux pluies extrêmes des arrondissements du bassin versant du l'Ouémé.....	29
Figure 18: Degré d'exposition future aux pluies extrêmes des arrondissements suivant différents modèles climatiques .....	30
Figure 19: Degré d'impact potentiel des pluies extrêmes sur les arrondissements du bassin de l'Ouémé.....	31
Figure 20: Indice de vulnérabilité future des arrondissements du bassin de l'Ouémé aux pluies extrêmes et ampleur de la variation par rapport à la vulnérabilité passée .....	32
Figure 21: Spatialisation des indicateurs d'exposition (précipitation, ruissellement, recharge et ETR) dans le bassin de l'Ouémé à Savè .....	33
Figure 22: Degré d'exposition des sous bassins de l'Ouémé à Savè à la pénurie d'eau .....	33
Figure 23: Sensibilité suivant la densité de la population (a) et le taux de non desserte (b) à la pénurie des ressources en eau dans le bassin de l'Ouémé à Savè .....	34
Figure 24: Potentiel d'impact des sous bassins à la disponibilité en eau dans le bassin de l'Ouémé à Savè.....	35
Figure 25: Capacité d'adaptation à la pénurie d'eau .....	36
Figure 26 : Indice de vulnérabilité actuelle des sous bassins à la pénurie d'eau dans le bassin de l'Ouémé à Savè.....	37

Figure 27: Impact des scenarios climatiques sur les précipitations et les écoulements à l'horizon 2035 .....	40
Figure 28: Impact des scenarios climatiques sur la recharge et l'ETR à l'horizon 2035 .....	41
Figure 29: Impact des scenarios climatiques sur les précipitations et les écoulements à l'horizon 2050 .....	42
Figure 30: Impact des scenarios climatiques sur la recharge et l'ETR à l'horizon 2035 .....	43
Figure 31: Valeur normalisée de la composante exposition issue des modèles climatiques ECEARTH et HADGEM2 .....	44
Figure 32: Niveau d'impact potentiel futur des changements climatiques sur les ressources en eau dans les sous bassins de l'Ouémé à Savè .....	45
Figure 33: Indice de vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques sur le bassin de l'Ouémé a Bonou.....	46
Figure 34: Variation des précipitations annuelles dans le bassin de l'Ouémé à Savè sur la période de 1970 à 2015) .....	53
Figure 35: Tendence des pluies annuelles au niveau de quelques stations sur la période 1970-2015	54
Figure 36: Variation des pluies mensuelles au niveau des stations synoptiques du bassin de l'Ouémé à Savè (Période de 1970 – 2015) .....	54
Figure 37: Variation des températures maximales et minimales moyennes annuelles au niveau des stations synoptiques du bassin de l'Ouémé à Savè (Période de 1970 – 2015) .....	55
Figure 38: Variation des humidités relatives maximales et minimales moyennes annuelles au niveau des stations synoptiques du bassin de l'Ouémé à Savè (Période de 1970 – 2015) .....	56
Figure 39: Variation de l'insolation et vitesse de vent moyens annuels au niveau des stations synoptiques du bassin de l'Ouémé à Savè (Période de 1970 – 2015) .....	57
Figure 40: Débits moyens journaliers au niveau des stations de Bétérou et d'Atchakpa dans le bassin de l'Ouémé à Savè.....	58
Figure 41: Coefficient Mensuel de Débit des principales stations hydrométriques du bassin de l'Ouémé à Savè.....	58

## Liste des tableaux

Tableau 1: Seuil et niveau d'alerte associables aux inondations pluviales dans le bassin de l'Ouémé (SAP-BENIN, 2015). Les chiffres indiquent pour chacune des villes concernées les valeurs de pluie journalière à partir desquelles différents niveaux d'alerte (matérialisés par les couleurs) peuvent être atteints. ....	14
Tableau 2: Indicateurs relatifs à l'exposition, méthodes et données utilisées pour les évaluer.....	15
Tableau 3: Indicateurs relatifs à la sensibilité, et les méthodes et données utilisées pour les évaluer .....	15
Tableau 4: Indicateurs relatifs à la capacité d'adaptation, les méthodes, et données utilisées pour les évaluer .....	16
Tableau 5: Indicateurs relatifs à l'exposition, méthodes, et données utilisées pour les évaluer.....	19
Tableau 6: Indicateurs relatifs à la sensibilité, les méthodes et données utilisées pour les évaluer ...	20
Tableau 7: Indicateurs relatifs à la capacité d'adaptation, les méthodes et données utilisées pour les évaluer .....	20
Tableau 8: Comparaison des données de référence aux sorties des quatre modèles climatiques à l'horizon 2035 .....	38
Tableau 9: Comparaison des données de référence aux sorties des quatre modèles climatiques à l'horizon 2050 .....	39

## Résumé analytique

Il n'y a aucun doute que les effets des changements climatiques se font ressentir sur le quotidien des Bénéinois. Plusieurs cultures, dont notamment le riz irrigué de contre-saison, dans la partie ouest africaine, est sous la menace du réchauffement climatique. Cette hausse de température risque de créer une grande perte au niveau de la production rizicole dans une région où plusieurs pays ont lancé des programmes pour atteindre l'autosuffisance. Il est important d'identifier des solutions pour faire face aux effets néfastes des changements climatiques. Pour définir ces options d'adaptations, il faut d'abord évaluer le degré de vulnérabilité des populations et des écosystèmes. Le présent rapport ainsi, vise à évaluer la vulnérabilité du secteur eau aux changements climatiques dans le bassin de l'Ouémé, qui abrite environ 40% de la population du Bénin. Cette étude a porté sur deux (02) axes principaux à savoir : (i) l'évaluation du niveau de la vulnérabilité actuelle et future, face aux risques d'inondation dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou ; et (ii) l'évaluation du niveau de la vulnérabilité actuelle et future, face aux pénuries d'eau dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Savè (essentiel pour une bonne application de la GIRE). Les périodes de 1970-2015 et 2016-2050 ont été retenues pour les vulnérabilités actuelle et future respectivement.

La méthodologie développée a consisté en (i) la définition de la chaîne d'impacts (qui s'articule autour du cadre conceptuel pour l'étude de la vulnérabilité aux changements climatiques), (ii) l'identification et la détermination des indicateurs, et (iii) la détermination du niveau de vulnérabilité des unités d'exposition. Diverses données ont été utilisées dont les données climatiques historiques de l'Agence Météo Bénin (1970-2016), les données de quatre modèles climatiques régionaux (ECEARTH, HADGEM2, IPLS et MPIESN, scénario RCP4.5), les données de débit de la DGEau, des données géospatiales (modèle numérique de terrain, carte de végétation, carte pédologique, etc.) et des données socio-économiques (indice de pauvreté, accès à l'information des ménages, etc.).

Les résultats indiquent que le bassin de l'Ouémé est très vulnérable aux impacts néfastes des changements climatiques aussi bien par rapport à la pénurie d'eau que par rapport aux inondations. A l'horizon 2050, une grande partie du bassin serait très vulnérable tant aux inondations pluviales qu'aux probables pénuries d'eau. Les communes les plus potentiellement vulnérables aux inondations pluviales dans le futur seraient celles de Djougou, N'Dali, Pèrèrè et Ouaké au nord du bassin ; les communes de Glazoué, Ouèssè, Savalou et Djidja au centre du bassin ; Bohicon, Zakpota, Zagnanado, Zogbodomey au sud du bassin versant. Les communes de la zone deltaïque, notamment Adjohoun et Bonou continueront de subir les affres de l'inondation fluviale en l'absence d'infrastructures adéquates. En ce qui concerne la pénurie des ressources en eau, les localités les plus affectées seront le nord de la commune de Djougou, Ouèssè et ses environs. Cette vulnérabilité provient en particulier de la faible capacité d'adaptation des populations, dans ces régions de l'étude. N'ayant pas une grande marge de manœuvre en ce qui concerne les impacts potentiels, l'effort doit être concentré sur le renforcement des capacités d'adaptation des populations à travers des options d'adaptation réalistes qui contribueraient à renforcer leur résilience. L'originalité de ce rapport découle du fait que le travail est fait par une équipe pluridisciplinaire, avec des compétences complémentaires, ce qui a permis une évaluation de la vulnérabilité sous différents angles, à partir des composantes de l'approche des chaînes d'impacts.



# 1 Introduction

## 1.1 Point sur le projet PAS-PNA et la composante 2

Les changements climatiques sont une réalité et il existe désormais un consensus mondial par rapport aux effets du réchauffement climatique sur différents secteurs d'activités. L'Afrique est souvent présentée comme l'une des régions les plus vulnérables. Depuis 2010, la Conférence des Parties s'est accordée sur le processus des Plans Nationaux d'Adaptation (PNA) comme moyen pour les Pays les Moins Avancés (PMA) et d'autres pays en développement de recenser les besoins d'adaptation à moyen et à long terme et de définir des stratégies et programmes pour y répondre. Les PNA doivent permettre de réduire la vulnérabilité aux changements climatiques et intégrer l'adaptation dans les processus et stratégies de planification du développement. Le Bénin, en conformité avec l'évolution des négociations internationales sur le climat, a lancé son processus PNA depuis 2013.

C'est dans ce contexte que le Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation (PAS-PNA) a été initié grâce à la coopération entre l'Etat Béninois et la République Fédérale d'Allemagne pour renforcer les capacités de mise en œuvre du processus PNA. Ce projet a été lancé officiellement au Bénin en Mars 2017 et mis en œuvre par la *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ), en collaboration avec *Climate Analytics*, sous la tutelle du Ministère du Cadre de Vie et du Développement Durable (MCVDD) et en collaboration avec le Centre de Partenariat et d'Expertise pour le Développement Durable (CePED) pour la période 2016-2019. Quatre champs d'action sont prioritaires au niveau du PAS-PNA : (i) renforcer le cadre de gouvernance et intégrer l'adaptation dans les processus de planification du développement, (ii) fournir un appui scientifique au processus des Plans Nationaux d'Adaptation, (iii) faciliter l'accès des pays cibles aux fonds climat et (iv) mettre ses acquis à la disposition de tous les pays les moins avancés (PMA) de l'Afrique subsaharienne à travers une plateforme créée à cet effet.

Les mécanismes de financement internationaux dédiés au climat exigent désormais que la vulnérabilité aux changements climatiques soit clairement démontrée et évaluée par une expertise scientifique avérée et que les stratégies d'adaptation développées répondent de manière évidente aux impacts causés par la variabilité et les changements climatiques. Il est donc nécessaire de « prouver » la vulnérabilité climatique des secteurs de développement du pays et d'identifier des mesures d'adaptation concrètes basées sur des évidences scientifiques robustes.

Le projet PAS-PNA et en particulier sa composante 2 envisage de répondre à ce défi par le renforcement des capacités scientifiques des différents acteurs pour la planification et la programmation de mesures d'adaptation. Dans ce cadre, il a été retenu au Bénin, comme point d'entrée pour l'analyse et l'intégration de la vulnérabilité face aux changements climatiques dans le Plan National d'Adaptation, trois secteurs à savoir l'agriculture, la santé de la population et les ressources en eau. Les études de vulnérabilité relative au secteur de l'eau portent sur les risques hydrométéorologiques et la gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin de l'Ouémé.

## 1.2 Objectifs de l'étude et pertinence dans le contexte des politiques sectorielles

Cette étude de vulnérabilité a pour finalité de contribuer aux Processus d'Appui Scientifique au Plan National d'Adaptation (PAS-PNA) aux changements climatiques pour le secteur de l'eau dans le Bassin de l'Ouémé. Pour y parvenir deux objectifs ont été définis :

- Évaluer la vulnérabilité historique, actuelle et future aux risques d'inondation pluviale dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou ; et
- Évaluer vulnérabilité historique, actuelle et future aux pénuries d'eau dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Savè (essentiel pour une bonne application de la GIRE).

In fine, et sur la base des résultats de ces deux objectifs, il s'agira de faire des recommandations afin de renforcer la résilience des unités d'expositions (populations, écosystèmes, et infrastructures).

## 2 Approche méthodologique

Cette section présente la zone de l'étude, le cadre conceptuel et l'approche méthodologique adoptée.

### 2.1 Description du site de mise en œuvre de l'étude

#### 2.1.1 Description géographique du site

Long de 548 km, le fleuve Ouémé draine une superficie d'environ 49.256 km<sup>2</sup> à l'exutoire de Bonou (Deng, 2007). Prenant sa source à Kpabégou, à une dizaine de km de Djougou au Nord-ouest du Bénin, le fleuve s'écoule du nord vers le sud et il est rejoint par ses principaux affluents, l'Okpara (200 km) sur la rive gauche et le Zou (150 km) sur la droite. Il traverse plusieurs zones agro-écologiques et alimente en aval une zone deltaïque, le système lagunaire lac Nokoué-lagune de Porto-Novo (Afouda et al., 2014).

Le bassin de l'Ouémé est situé entre les latitudes 10°09'33"N et 6° 20'14"N et les longitudes 1°30'E et 2° 30' E (Figure 1) et présente un relief relativement plat (pente moyenne de 0,9 m/km), sauf en tête du bassin où celle-ci dépasse 2%.

Sur le plan de la géologie, deux grands ensembles se dégagent : le bassin supérieur et le bassin inférieur. Le bassin supérieur repose sur un socle cristallin du Précambrien connu sous le nom de Dahoméyen. Il est essentiellement constitué de granites, de gneiss granitoïdes et de gneiss. Il est limité au sud par la station hydrométrique du pont de Savè, au nord-ouest par le bassin de la Pendjari (principal affluent de la Volta) et par les Monts Tanéka et au nord-est par le bassin du Niger. Dans son bassin supérieur, l'Ouémé a un profil coupé de rapides. Son bassin versant est rejoint à l'est par le sous-bassin de l'Okpara et au sud-ouest par celui du Zou. Dans son bassin inférieur, l'Ouémé coule dans le bassin sédimentaire côtier à partir de la latitude de Zagnanado pour se jeter dans l'océan par le lac Nokoué et la lagune de Porto Novo. Son relief est peu marqué avec une pente très faible (5 m de dénivelée sur 85 km (Le Barbé et al., 1993) favorisant l'étalement des eaux pendant la crue (Afouda et al., 2014) .

D'un point de vue climatique, le bassin de l'Ouémé peut être subdivisé en trois zones climatiques suivant les régimes de précipitations (Deng, 2007) : (i) le régime pluviométrique unimodal du nord du bassin comprenant deux saisons, à savoir la saison des pluies de mai à octobre et la saison sèche; (ii) le régime pluviométrique bimodal du sud de l'Ouémé comportant deux saisons humides, soit une longue saison entre mars et Juillet et une courte saison entre septembre et mi-novembre et une longue saison sèche entre novembre et mars; et (iii) le régime pluviométrique de transition au centre du bassin , une saison des pluies entre mars et octobre, avec ou sans courte saison sèche en août. Les pluies proviennent des agglutinations mobiles (lignes de grains) qui ont une trajectoire est-ouest. Il faut, cependant, noter que celles-ci circulent le long de l'Equateur Météorologique, qui lui-même se

déplace du sud vers le nord ce qui donne l'impression que les pluies proviennent du sud. Les précipitations annuelles moyennes varient entre 700 mm au nord (Badou et al., 2015) et 1340 mm au sud. Ainsi, les précipitations diminuent vers le nord et entraînent un fort gradient. Les températures annuelles moyennes oscillent entre 26° et 30 °C (Bossa et al., 2014).

La relation pluie-débit est très variable dans le bassin et conduit à des coefficients de ruissellement variant entre 0.1 et 0.26, les plus petites valeurs correspondant aux zones de savanes et forêts. De plus pour tous les sous-bassins les coefficients de ruissellement les plus élevés correspondent à des années exceptionnellement humides.

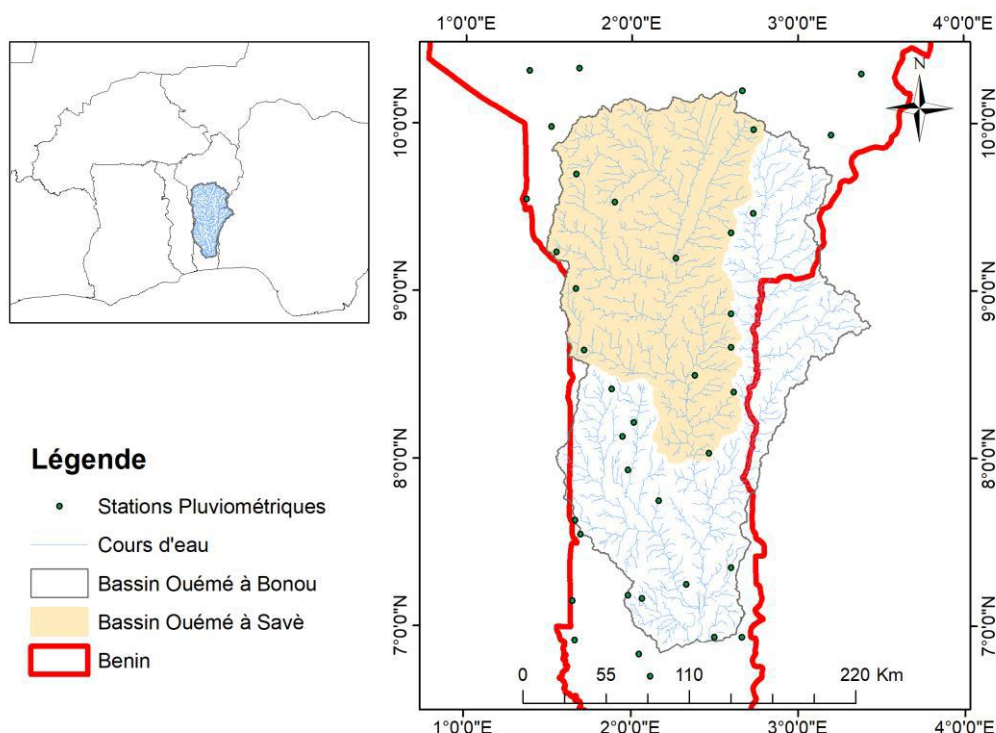


Figure 1: Localisation du bassin de l'Ouémé au Bénin y compris le sous bassin de Savè et les stations pluviométriques utilisés

### 2.1.2 Profil socio-économique de la zone d'étude

L'agriculture est une activité majeure qui occupe environ 60% de la population (Alimi et al., 2015). Cette agriculture est essentiellement pluviale ce qui l'expose aux chocs climatiques. Une des caractéristiques des exploitations agricoles familiales dominantes dans le bassin de l'Ouémé est la pratique quasi systématique par 60% des ménages du petit élevage comprenant la volaille, et les petits ruminants, notamment les caprins et les ovins. Selon Alimi et al. (2015), l'agriculture est suivie des activités de commerce et de restauration (19,4%). L'économie de la région repose aussi sur le commerce avec le Nigéria. En outre, presque toutes les communes du bassin de l'Ouémé sont prisées par les éleveurs transhumants en provenance du Nigeria et du Niger (ANOPER, 2014). En effet, ce bassin présente des ressources fourragères et des ressources en eau favorables à l'élevage. La pêche constitue une activité économique majeure dans certaines communes et localités surtout à l'extrême Sud du bassin. Ainsi, elle emploie entre 40 et 65% de la population active dans les communes comme Zagnanado et Bonou (Alimi et al., 2015).

### 2.1.3 La problématique de l'eau dans la zone d'étude

Le bassin de l'Ouémé est le plus grand et le plus peuplé des quatre bassins hydrologiques du Bénin. Il abrite près de 44 % de la population béninoise. Cette population exerce une plus grande pression sur les terres et conduit à la conversion des zones de végétations naturelles en terres agricoles et zones d'habitation. La végétation a un effet atténuateur sur les inondations en ce sens que les forêts et savanes favorisent l'infiltration et l'évapotranspiration réelle, limitent le ruissellement et l'érosion, et par ricochet les inondations. Cette conversion des forêts et savanes en terres agricoles se traduit par une baisse de la capacité d'infiltration des sols, une augmentation du coefficient de ruissellement qui a un effet aggravateur sur les inondations. La conversion des forêts en terres agricoles influe également sur le cycle hydrologique et conduit dans certains cas à l'atteinte rapide des étiages de certains cours d'eau. Les impacts du changement d'affectation des terres, amplifiés par ceux des changements climatiques semblent exposer les populations à la fois aux risques d'inondations et aux pénuries d'eau.

A l'échelle annuelle, le bassin de l'Ouémé semble disposer suffisamment de ressources en eau. Cette disponibilité est cependant soumise à une variabilité saisonnière. En effet, pendant la saison sèche, les sources alternatives tarissent de même que les puits et forages peu profonds qui sont les principales sources d'approvisionnement en eau potable<sup>1</sup> (IGIP-AFRIQUE, 2017). En effet, des exemples d'assèchement saisonnier (de novembre à avril) de barrages, de forages et de puits peu profonds ont récemment affecté les populations de Djougou, Dassa-Zoumè, et Parakou (Figure 2).



Figure 2: Pénurie d'eau à Parakou en 2017

En outre, une partie de la ressource disponible est impropre à l'utilisation car polluée par les déchets ménagers, industriels, les pesticides et les résidus d'engrais. Le fluorure émanant des interactions eau-roche (c'est à dire d'origine géologique) et présent dans la zone centrale du Bassin de l'Ouémé (Bantè, Dassa-Zoumè, Glazoué, Ouèssè, Savalou et Savè) constitue une menace sérieuse à la qualité de l'eau souterraine (Tossou et al., 2017).

La transhumance animale en provenance des pays voisins (par exemple, le Niger et le Nigeria) augmente la pression sur la végétation et les ressources en eau et favorise les conflits liés à l'eau dans le bassin et le delta de l'Ouémé (Alimi et al., 2015).

---

<sup>1</sup>Seules 4 des 35 communes du bassin de l'Ouémé (Savalou, Savè, Djougou, et Parakou) sont alimentées en eau de surface.

En ce qui concerne les inondations, le bassin de l'Ouémé a enregistré entre 1984 et 2010 plusieurs événements extrêmes notamment en 1985, 1988, 1991, 1996, 1997, 1998, 2004, 2007, 2008, et 2010. Les exemples illustrés montrent que les inondations constituent une problématique majeure dans le bassin de l'Ouémé.

Le SDAGE Ouémé (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) a été élaboré pour relever les défis liés à l'eau dans le bassin de l'Ouémé. Ce document de référence sur la gestion des eaux de l'Ouémé planifie pour les années à venir (DGEau, 2013) :

- La mobilisation de 3.94 milliards de m<sup>3</sup> d'eau à des fins multi-usages (construction de 3 grands barrages structurants et de 27 petits barrages) ;
- La production de 420 GWhs d'énergie électrique pour une puissance de 280 MW à partir des 3 grands barrages structurants ;
- L'irrigation et la mise en valeur agricole de 132300 ha de terres dans le bassin ;
- L'exploitation aquacole de plus de 32000 ha de plans d'eau artificiels pour atteindre une production halieutique de près de 66 960 tonnes par an ;
- L'abreuvement du bétail à partir d'abreuvoirs installés sur les 27 petits barrages et le long du cours principal du fleuve régularisé ; et
- Le développement de l'écotourisme autour des barrages, notamment par la valorisation de la biodiversité.

Selon les projections climatiques, la pluviométrie pourrait augmenter ou diminuer dans le bassin de l'Ouémé (Francois and Essou, 2013). Une diminution de la pluviométrie entraînera à la fois une faible recharge des nappes souterraines et un faible remplissage des réservoirs. Une telle diminution de la ressource en eau permettra-t-elle la mise en œuvre du SDAGE ?

#### 2.1.4 Description de l'horizon temporel et justification du choix de cet horizon

Se basant sur l'état de l'art, la période 1970-2015 a été choisie pour évaluer la vulnérabilité actuelle, tandis que la période de 2016-2050 a été choisie pour évaluer la vulnérabilité future.

Selon le rapport du GIEC (2007), l'Afrique de l'Ouest est l'une des régions les plus vulnérables aux effets néfastes des changements climatiques. Si les décennies 1970s et 1980s ont été marquées par la grande sécheresse (Lebel and Ali, 2009; Nicholson, 2001) qui a négativement impacté l'économie de la région, les années 2000 enregistrent de nombreuses inondations. En Afrique de l'Ouest, le nombre annuel moyen d'événements d'inondations est passé de moins de 5 en 1966 à plus de 20 en 2010 et est de l'ordre de 10 en 2017 (EM-DAT, 2017)).

Le Bénin n'échappe pas à cette réalité. Entre 1984 et 2010, les inondations ont coûté la vie à 71 personnes, affecté en moyenne 279 971 personnes par an, provoqué, en moyenne par an, la destruction d'environ 12 865 ha de cultures, de 9 949 tonnes de céréales et de coton, 4 611 habitations, 170 écoles, 2705 km de routes, ainsi que la destruction de 201 ponts, de centres de santé, d'installations électriques ; elles ont engendré des épidémies de gastroentérite (Ministère de l'Environnement, de l'Habitat et de l'Urbanisme, 2011). En 2010, le Bénin a connu les inondations les plus dévastatrices de son histoire (Figure 3) qui ont provoqué la mort de 46 personnes, affecté 680 000 personnes et occasionné des pertes estimées à 48.8 milliards de francs CFA (Gouvernement de la République du Bénin, 2011).





Figure 3 Vues aérienne et au sol des inondations de 2010 ; Source: Gouvernement de la République du Bénin (2011), et (Zannou, 2013)

## 2.2 Cadre conceptuel de l'étude de vulnérabilité

### 2.2.1 Définition du concept de la vulnérabilité et de ses composantes

Le concept de la « vulnérabilité aux changements climatiques » permet de mieux comprendre les relations de causes à effets entre les changements climatiques et leurs impacts sur les populations, les secteurs de l'économie et les systèmes socio-écologiques. Selon le GIEC, la vulnérabilité exprime le « degré de sensibilité d'un système aux effets néfastes des changements climatiques », y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes, sans pouvoir y faire face. La vulnérabilité dépend du caractère, de l'ampleur et du rythme des changements climatiques auquel un système est exposé, ainsi que de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation (Parry, 2007). La Figure 4 ci-dessous montre comment de l'exposition, et de la sensibilité on aboutit aux impacts potentiels ; et des impacts potentiels et de la capacité d'adaptation, il est possible de déterminer la vulnérabilité.

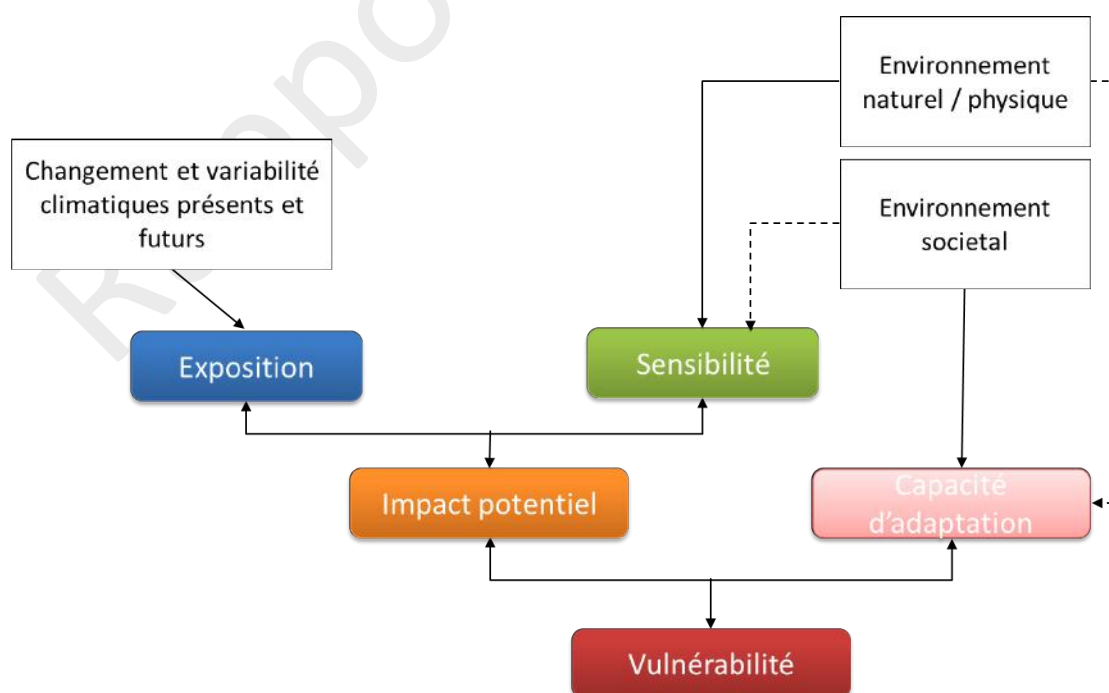


Figure 4: Les composantes de la vulnérabilité ; Source : Kerstin et al. (2014)

## 2.2.2 Description de la chaîne d'impacts

Dans cette partie, pour chacun des deux objectifs, la chaîne d'impacts est d'abord définie, puis les facteurs pris en compte dans l'évaluation de la vulnérabilité actuelle et future sont présentés. Des facteurs pertinents ont été choisis pour apprécier chacune des composantes de la chaîne d'impacts. Par exemple, la pauvreté, la gouvernance de l'eau, et l'accès à l'information sont les « facteurs » choisis pour apprécier la composante « capacité d'adaptation » (Figure 7). Les facteurs sont caractérisés au moyen d'indicateurs. Pour l'exemple ci-dessus, le pourcentage de la population du bassin ayant un poste radio et le pourcentage ayant un poste téléviseur (Figure 5) sont choisis comme indicateurs pour apprécier l'accès à l'information.

### 2.2.2.1 Risques d'inondations dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou

La Figure 5 présente la chaîne d'impacts relatifs aux risques d'inondations. L'échelle spatiale retenue est l'arrondissement.

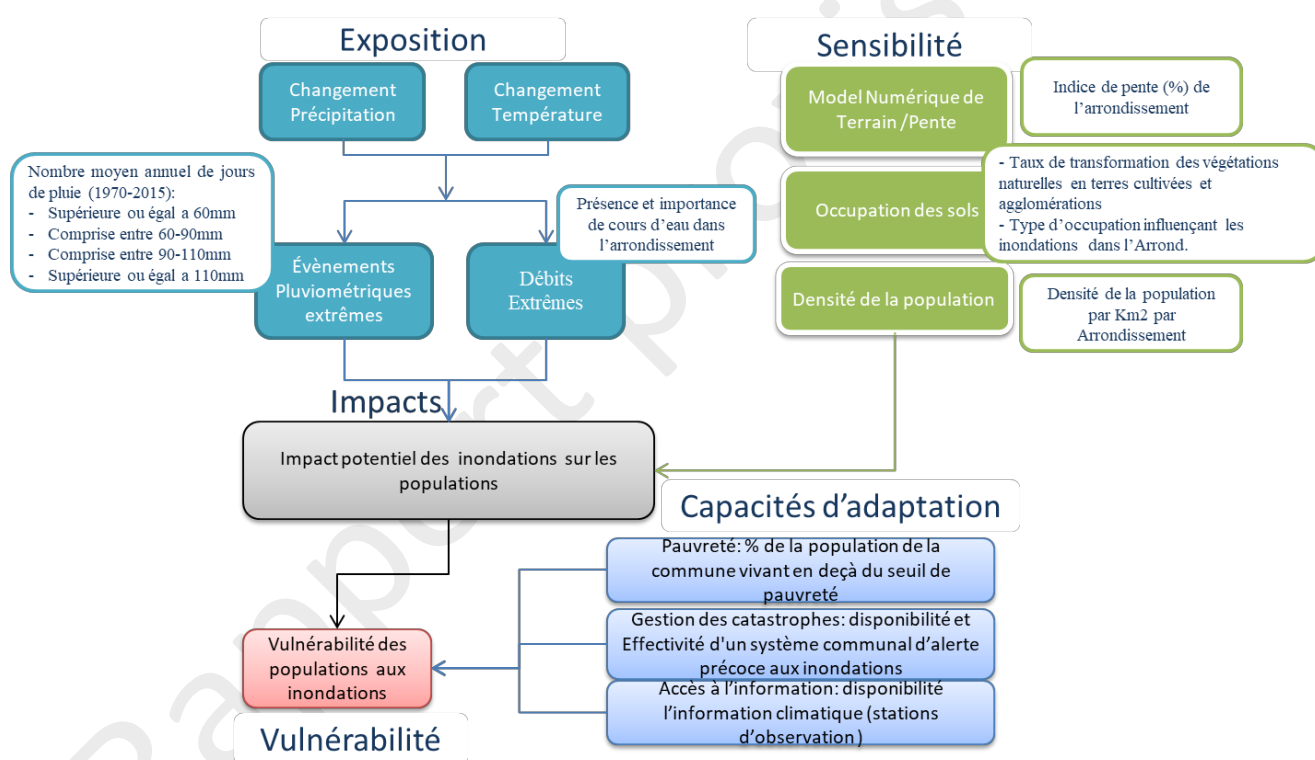


Figure 5: Chaîne d'impact relative à la vulnérabilité aux risques d'inondations ; Source: adaptée de Kerstin et al. (2014)

#### ▪ Exposition

Au Bénin, trois inondations sur quatre sont causées par des pluies torrentielles et/ou diluviennes (Figure 6).

La pluie semble donc être la principale cause des inondations au Bénin et dans le Bassin de l'Ouémé. Les inondations du 1<sup>er</sup> Octobre 2010 à Cotonou pourraient être expliquées par le fait qu'en Septembre 2010, il est tombé près de 267 mm de pluie dans le mois contre une moyenne de 150 mm pour les 4

dernières décennies. Cet état de fait pourrait justifier l'attention particulière que le projet SAP-Bénin a accordé au problème en y consacrant une étude intitulée «Détermination des seuils et niveaux d'alerte relatifs au risque d'inondation pluviale au Bénin» (SAP-BENIN, 2015). Cette étude a identifié les villes les plus sujettes aux inondations pluviales au Bénin. Des seuils et niveaux d'alerte associables aux inondations pluviales ont été déterminés en se basant sur l'analyse des chroniques de données pluviométriques combinées aux informations recueillies sur le terrain, à la topographie et à la nature du sol de chacune des communes (SAP-BENIN 2015). Pour les villes situées dans le bassin de l'Ouémé, ces seuils et niveau d'alerte sont consignés dans le **Tableau 1** ci-dessous. Les couleurs du tableau 1 représentent les niveaux d'alerte. Ainsi donc, la couleur verte indique un niveau de risque presque nul tandis que la couleur rouge indique un niveau de risque maximal. Les couleurs intermédiaires (jaune et orange) font références aux niveaux de risque compris entre les deux extrêmes.

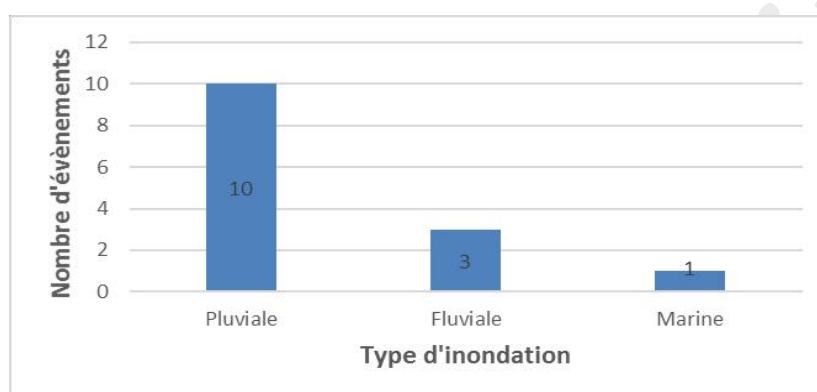


Figure 6: Typologie des inondations au Bénin entre 1984-2010 (Source: DCN, 2011)

Pour chaque station et seuil considérés, le nombre de jours ayant une pluie comprise entre les seuils définis a été déterminé. Cela a abouti à trois séries temporelles du nombre de jours de pluie pour chaque station. Une spatialisation de ces résultats a été faite et le test de Mann Kendall (Yue et al., 2002) a été appliqué aux séries temporelles du nombre de jours dont la pluie journalière est comprise entre les intervalles identifiés afin de détecter une éventuelle tendance.

Après un échantillonnage suivant l'approche des maxima annuels, nous avons appliqué la loi généralisée des valeurs extrêmes pour estimer les quantiles<sup>2</sup> correspondant à différentes périodes de retour. Les quantiles de petites périodes de retour<sup>3</sup> (2 ans, 5ans et 10ans) ont été priorisés en raison des faibles incertitudes qui y sont associées et de leur fréquence élevée (Hounkpè et al., 2015). La spatialisation des quantiles s'est faite toujours à l'aide du Krigeage.

Tableau 1: Seuil et niveau d'alerte associables aux inondations pluviales dans le bassin de l'Ouémé (SAP-BENIN, 2015). Les chiffres indiquent pour chacune des villes concernées les valeurs de pluie journalière à partir desquelles différents niveaux d'alerte (matérialisés par les couleurs) peuvent être atteints.

<sup>2</sup>Le quantile est le nombre qui divise une suite ordonnée de valeurs en parties d'égale étendue.

<sup>3</sup>La période de retour, ou temps de retour, caractérise le temps statistique entre deux occurrences d'un événement naturel d'une intensité donnée.



Niveau d'alerte	Vertes (mm)	Jaune (mm)	Orange (mm)	Rouge (mm)
Bohicon	<60	60-90	90-110	>110
Abomey	<60	60-90	90-110	>110
Savalou	<60	60-100	100-120	>120
Savè	<80	80-130	130-150	>150

Dans cette étude, la pluie a été considérée comme le facteur essentiel de l'analyse de l'exposition. L'ensemble des indicateurs d'exposition est présenté dans le Tableau 2.

Tableau 2: Indicateurs relatifs à l'exposition, méthodes et données utilisées pour les évaluer

Composantes	Facteurs	Indicateurs	Méthode	Données	Sources
Exposition	Fréquence des pluies extrêmes (Nombre d'évènements pluvieux extrêmes)	Nombre moyen annuel de jours de pluie supérieure ou égale à 60mm	Analyse statistique	Pluie journalière (1970-2015)	Météo Bénin
		Nombre moyen annuel de jours de pluie comprise entre 60 et 90 mm	Analyse statistique	Pluie journalière (1970-2015)	Météo Bénin
		Nombre moyen annuel de jours de pluie comprise entre 90 et 110mm	Analyse statistique	Pluie journalière (1970-2015)	Météo Bénin
		Nombre moyen annuel de jours de pluie supérieure ou égale à 110mm	Analyse statistique	Pluie journalière (1970-2015)	Météo Bénin
	Amplitude des débits extrêmes	Présence et importance de cours d'eau dans l'arrondissement	Ordre du cours pour l'arrondissement (Méthode de Strahler)	Modèle Numérique de terrain (30 m de résolution <sup>4</sup> )	ASTER GDEM

#### ▪ **Sensibilité**

La topographie (l'indice de pente), et l'occupation du sol (le taux de transformation des végétations naturelles en zones de cultures et en agglomérations) contribuent à la vitesse d'écoulement de l'eau et ont été retenus comme indicateurs de la sensibilité. Il en est de même pour la densité de la population (Tableau 3).

Tableau 3: Indicateurs relatifs à la sensibilité, et les méthodes et données utilisées pour les évaluer

Composantes	Facteurs	Indicateurs	Méthode	Données	Sources
Sensibilité	Topographie (lien entre degré de pente et vitesse d'écoulement)	Indice de pente (%) de l'arrondissement	Traitement SIG et analyse statistique	Modèle Numérique de terrain (30 m de résolution)	ASTER GDEM

<sup>4</sup>Résolution : Quantité mesurant la plus petite variation de donnée qu'un instrument de mesure ou de reproduction est capable de prendre en compte. Elle exprime la dimension du plus petit élément qu'il est possible de détecter. La précision des détails discernables sur une image ou une carte dépend donc de la résolution.

Occupation des sols	Taux de transformation des végétations naturelles en terres cultivées et agglomération	Traitement SIG et analyse statistique	Carte d'occupation des sols (Années)	RIVERTWIN
Population	Densité de la population par km <sup>2</sup>	Traitement statistique	Données démographiques (RGPH, 2015)	(INSAE, 2016)

▪ **Capacité d'adaptation**

La capacité d'adaptation est l'ensemble des mécanismes et actions permettant de faire face aux risques d'inondations. Les indicateurs de richesse, la disponibilité d'un plan de contingence communal et la disponibilité de l'information hydro-climatique ont permis d'apprécier la capacité d'adaptation des populations du bassin de l'Ouémé (Tableau 4).

Tableau 4: Indicateurs relatifs à la capacité d'adaptation, les méthodes, et données utilisées pour les évaluer

Composantes	Facteurs	Indicateurs	Méthode	Données	Sources
Capacité d'adaptation	Richesse monétaire	Indice de la richesse monétaire (pourcentage de la population de l'arrondissement vivant en deçà du seuil de pauvreté)	Traitement statistique	Données socio-économiques	INSAE, (2015)
	Gestion des catastrophes	Disponibilité d'un plan de contingence communal, d'un Comité Communal de Protection civile	Recherche documentaire et analyse (-Non-disponible=1, Disponible=3, Disponible et Effectif=5)	Plan de contingence communal	Internet (google.bj)
	Accès à l'information	Disponibilité de l'information hydro-climatique (stations d'observations)	Traitement SIG (Non-disponible= 1; station hydro ou pluvio=3; Stations hydro et pluvio=5)	Coordonnées géographiques des stations de mesures	Météo-Bénin et DG-Eau

La vulnérabilité historique et actuelle, et la vulnérabilité future ont été déterminées sur la base des indicateurs présentés ci-dessus. Dans cette étude, la différence entre ces deux types de vulnérabilité se situe principalement au niveau de l'exposition. Pour la vulnérabilité historique et actuelle, l'exposition a été évaluée à partir des données climatiques observées de la période 1970-2015 tandis que pour la vulnérabilité future ce sont plutôt les données des modèles (ECEARTH, HADGEM2, IPSL, et MPIESM) climatiques régionaux qui ont servi à évaluer l'exposition sur la période 2016-2050.

## ▪ Pénuries d'eau dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Savè

La chaîne d'impacts développée pour schématiser les relations de cause à effets, systématiser et prioriser les facteurs responsables de la vulnérabilité aux pénuries d'eau dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Savè est présentée à la Figure 7.

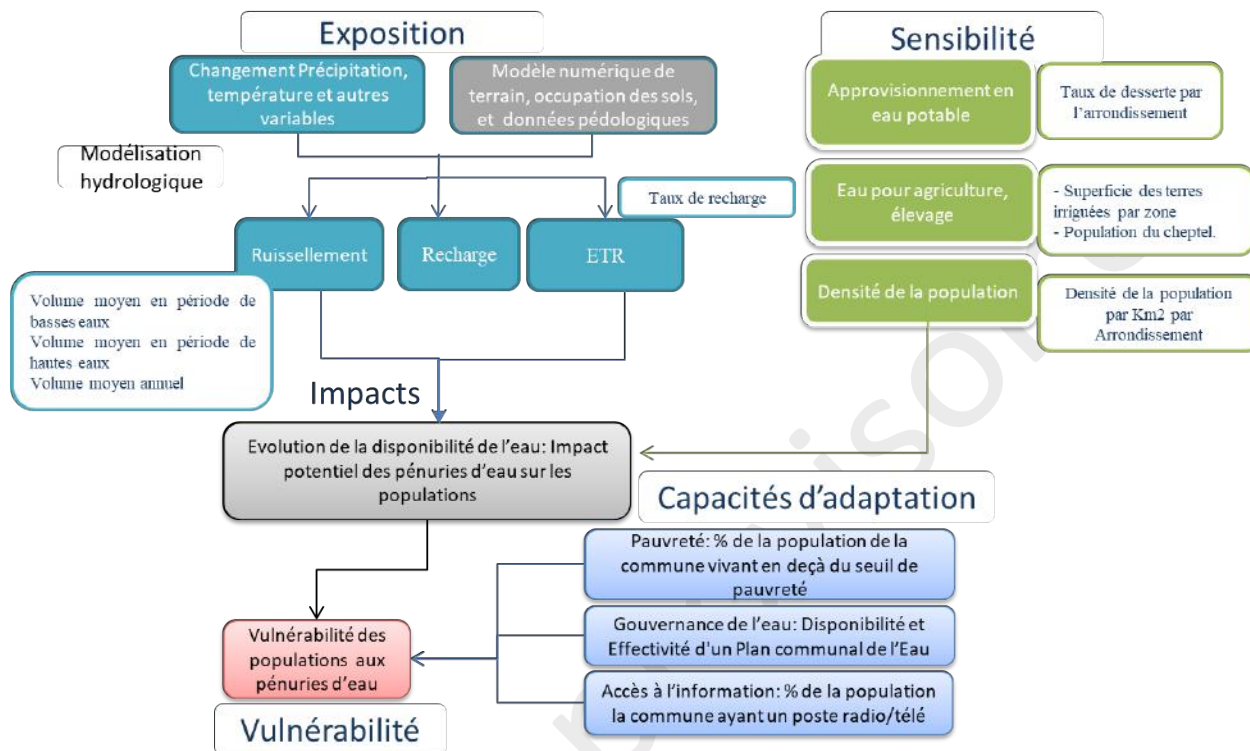


Figure 7 : Chaîne d'impact relative à la vulnérabilité aux pénuries d'eau ; Source: adaptée de Kerstin et al. (2014)

## ▪ Exposition

L'étude de la vulnérabilité aux pénuries d'eau nécessite que l'on puisse caractériser les pénuries d'eau, c'est-à-dire établir le bilan de l'eau afin d'en déduire le ruissellement, la recharge et l'humidité du sol. Pour cela, nous avons eu recours à la modélisation hydrologique. Le modèle<sup>5</sup> SWAT (outils d'évaluation des sols et de l'eau, (Arnold et al., 1998)) a été utilisé (Figure 8). Ce modèle, communément utilisé en hydrologie, a l'avantage de prendre en compte les caractéristiques géospatiales (modèle numérique de terrain, types de végétation, et types de sols) dans la modélisation.

<sup>5</sup>Modèle hydrologique : représentation mathématique simplifiée de tout ou d'une partie des processus du cycle hydrologique. Il permet de transformer des séries temporelles décrivant le climat d'un bassin versant donné (séries de précipitations et de températures par exemple, qui sont les entrées du modèle hydrologique) en une série de débits (sortie du modèle hydrologique)

Le modèle a été calibré<sup>6</sup> et validé<sup>7</sup> pour les périodes 1990-2000 et 2001-2010 respectivement. La performance du modèle peut être consultée en annexe. Partant des résultats de la modélisation les volumes de ruissellement, de la recharge de la nappe et de l'évapotranspiration réelle ont été extraits.

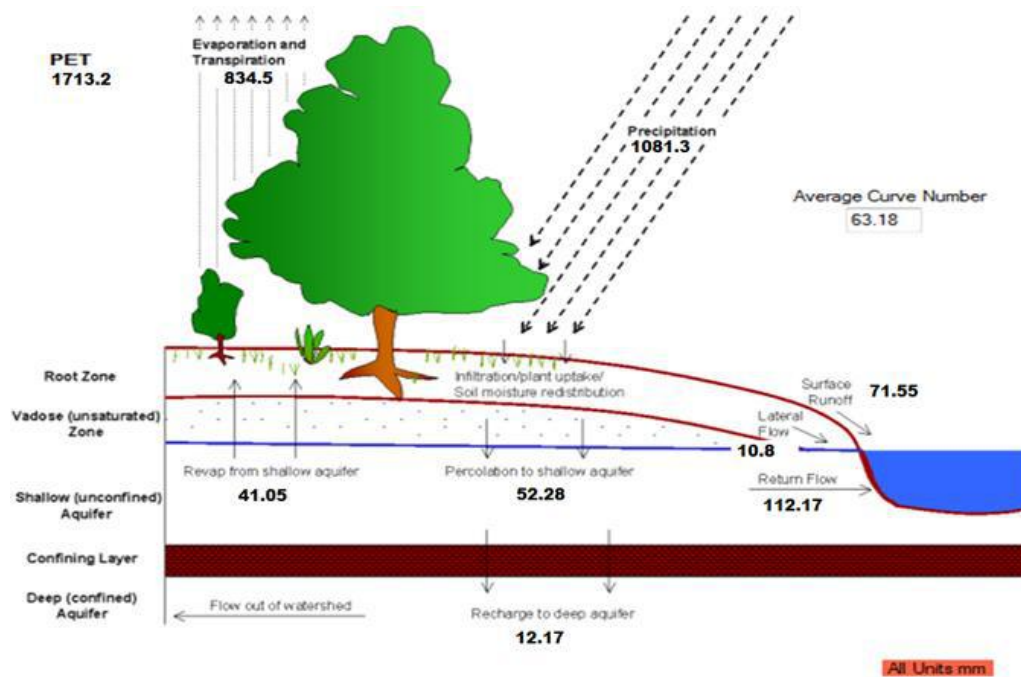


Figure 8: Principes de fonctionnement du modèle hydrologique SWAT. ; Source : SWAT Error Checker – Version 1.2.0.4, July 2015 (<https://swat.tamu.edu/software/swat-check/>)

<sup>6</sup>**Calibrer** un modèle consiste à déterminer pour une période donnée les paramètres auxquels le modèle est sensible puis d'identifier les valeurs de ces paramètres qui permettent de rapprocher au mieux les variables modélisées (exemple débit modélisé à partir de SWAT à l'exutoire de Bonou) à celles observées (exemple débit mesuré à la station de Bonou)

<sup>7</sup> Valider un modèle consiste à tester que les paramètres identifiés pendant le calage restent valables pour une période différente de celle utilisée pendant le calage.

Tableau 5: Indicateurs relatifs à l'exposition, méthodes, et données utilisées pour les évaluer

Composantes	Facteurs	Indicateurs	Méthode	Données	Sources
Exposition	Volume de ruissellement	Volume moyen en période de basses eaux	Modélisation hydrologique/ Analyse statistique	Données hydroclimatiques, modèle numérique de terrain, occupation du sol et données pédologiques	Météo-Benin, DGEau, CENATEL, ORSTOM
		Volume moyen en période de hautes eaux	Modélisation hydrologique/ Analyse statistique	Données hydroclimatiques, modèle numérique de terrain, occupation du sol et données pédologiques	Météo-Benin, DGEau, CENATEL, ORSTOM
		Volume moyen annuel	Modélisation hydrologique/ Analyse statistique	Données hydroclimatiques, modèle numérique de terrain, occupation du sol et données pédologiques	Météo-Benin, DGEau, CENATEL, ORSTOM
	Recharge	Volume moyen en période de basses eaux	Modélisation hydrologique/ Analyse statistique	Données hydroclimatiques, modèle numérique de terrain, occupation du sol et données pédologiques	Météo-Benin, DGEau, CENATEL, ORSTOM
		Volume moyen en période de hautes eaux	Modélisation hydrologique/ Analyse statistique	Données hydroclimatiques, modèle numérique de terrain, occupation du sol et données pédologiques	Météo-Benin, DGEau, CENATEL, ORSTOM
		Volume moyen annuel	Modélisation hydrologique/ Analyse statistique	Données hydroclimatiques, modèle numérique de terrain, occupation du sol et données pédologiques	Météo-Benin, DGEau, CENATEL, ORSTOM
	Evapotranspiration réelle	Volume moyen en période de basses eaux	Modélisation hydrologique/ Analyse statistique	Données hydroclimatiques, modèle numérique de terrain, occupation du sol et données pédologiques	Météo-Benin, DGEau, CENATEL, ORSTOM
		Volume moyen en période de hautes eaux	Modélisation hydrologique/ Analyse statistique	Données hydroclimatiques, modèle numérique de terrain, occupation du sol et données pédologiques	Météo-Benin, DGEau, CENATEL, ORSTOM
		Volume moyen annuel	Modélisation hydrologique/ Analyse statistique	Données hydroclimatiques, modèle numérique de terrain, occupation du sol et données pédologiques	Météo-Benin, DGEau, CENATEL, ORSTOM

▪ **Sensibilité**

L'approvisionnement en eau potable (taux de desserte), les demandes en eau pour l'agriculture (irrigation et abreuvement du cheptel) et la densité de la population peuvent exacerber la situation

de la non-disponibilité de l'eau dans le bassin et ont donc été identifiés comme indicateurs de la sensibilité (Tableau 6). Cependant, il n'a pas été possible d'obtenir des statistiques sur l'irrigation.

Tableau 6: Indicateurs relatifs à la sensibilité, les méthodes et données utilisées pour les évaluer

Composantes	Facteurs	Indicateurs	Méthode	Données	Sources
Sensibilité	Approvisionnement en eau potable	Taux de desserte en eau potable	Recherche documentaire	Statistiques sur l'AEP	ANAEPMR
	Eau pour l'agriculture	Taille du cheptel	Recherche documentaire	Statistiques sur le cheptel	ANOPER
		Superficie des terres irriguées	Recherche documentaire	Statistiques sur l'irrigation	
	Population	Densité de la population par km <sup>2</sup>	Traitement statistique	Données démographiques RGPH4 (2013)	INSAE (2015)

#### ▪ **Capacité d'adaptation**

Les indicateurs de pauvreté, la disponibilité d'un plan communal de l'eau et le pourcentage de population ayant accès à l'information ont permis d'apprécier la capacité d'adaptation des populations du bassin de l'Ouémé (Tableau 7).

Tableau 7: Indicateurs relatifs à la capacité d'adaptation, les méthodes et données utilisées pour les évaluer

Composantes	Facteurs	Indicateurs	Méthode	Données	Sources
Capacité d'adaptation	Richesse	Indice de la richesse monétaire (pourcentage de la population de l'arrondissement vivant en deçà du seuil de pauvreté)	Traitement statistique	Données socio-économiques	INSAE (2015).
	Gouvernance de l'eau	Disponibilité et effectivité d'un Plan Communal de l'Eau (Pceau)	Recherche documentaire et analyse statistique		Internet
	Accès à l'information	Pourcentage des ménages ayant un poste téléviseur	Traitement SIG	Données socio-économiques	INSAE (2013) TBS
		Pourcentage des ménages ayant un poste radio	Recherche documentaire et analyse	Données socio-économiques	

Comme indiqué plus haut, la vulnérabilité actuelle et la vulnérabilité future ont été évaluées sur la base des indicateurs présentés ci-dessus. La différence entre ces deux types de vulnérabilité se situe principalement au niveau de l'exposition. Pour la vulnérabilité historique et actuelle, l'exposition a été évaluée à partir des données climatiques observées de la période 1970-2015 tandis que pour la

vulnérabilité future ce sont plutôt les données des modèles (ECEARTH, HADGEM2, IPSL, et MPIESM) climatiques régionaux qui ont servi à évaluer l'exposition sur la période 2016-2050.

### 2.2.3 Description et justification des données de projections, les RCPS, l'horizon temporel

Pour cette analyse de la vulnérabilité future du secteur des ressources en eau, le scénario climatique qui décrit de façon cohérente et plausible l'état futur du climat du Bénin a été retenu. En effet, le Bénin par son niveau d'industrialisation très faible, est parmi les pays non émetteurs nets des gaz à effet de serre (GES). De ce fait les scénarios RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5 pouvaient être retenus. Le scénario RCP 4.5 représente le scénario moyen le plus plausible pour le Bénin et le RCP 8.5 représente le scénario le plus pessimiste. Du fait que le Bénin n'est pas un pays émetteur des GES, ce dernier n'a pas été retenu. Aussi, le scénario RCP 2.6 n'a pas été retenu pour le fait que les efforts que consent le Bénin à travers ses différentes politiques et stratégies d'atténuation, ne sont pas encore perceptibles. Les données climatologiques (précipitations, températures maximales et minimales) suivant le scénario RCP 4.5 proviennent des modèles climatiques ECEARTH, HADGEM2, IPLS et MPIESN. Ces données futures ont été mises à disposition du groupe thématique Eau par la coordination du PASPNA.

## 2.3 Approche méthodologique de l'étude de vulnérabilité

**Normalisation des indicateurs :** Elle est nécessaire pour ramener tous les indicateurs à la même échelle de 0 à 1 afin de faciliter la comparaison entre eux et leur interprétation. Cette normalisation s'est faite à partir de la formule suivante où le poids maximal de 1 correspond à la plus grande valeur brute de l'indicateur ( $Max\_Ind_i$ ) tandis que le poids minimum de 0 correspond à la plus petite valeur de l'indicateur ( $Min\_Ind_i$ ).

$$VN_i = (Ind_i - Min\_Ind_i) / (Max\_Ind_i - Min\_Ind_i)$$

Avec  $VN_i$  est la valeur normalisée de l'indicateur  $Ind_i$ .

### Agrégation des indicateurs

- Le maximum des valeurs normalisées des **indicateurs d'exposition** de chaque arrondissement notamment ceux relatifs aux pluies intenses sur le bassin de l'Ouémé à Bonou a été considéré comme représentatif de la composante 'exposition' pour l'arrondissement considéré. L'option d'une moyenne de ces indicateurs n'a pas été priorisée du fait de la nature même de ces indicateurs qui réfère aux phénomènes extrêmes susceptibles de se produire.
- Quant aux **indicateurs de sensibilité**, leur moyenne a été faite et considérée comme représentative de la composante 'sensibilité'. En fait, les trois indicateurs de sensibilité quantifiés pour l'objectif 1 (indice de pente, occupation des terres, densité de la population) d'une part et pour l'objectif 2 d'autre part (taux de desserte, densité de la population, superficie des terres irriguées et population de cheptel) sont tous très sensibles presque au même titre.
- La moyenne des indicateurs de **capacité d'adaptation** a été calculée et considérée comme représentative de la composante 'capacité d'adaptation'
- Les composantes 'exposition' et 'sensibilité' ont été agrégées en **impact potentiel** par une moyenne simple.

$$impact\ potentiel = \frac{exposition + sensibilité}{2}$$

- La **vulnérabilité** a été déduite en combinant l'impact potentiel avec la capacité d'adaptation. Il faut noter que ces deux composantes ont un effet contraire sur la vulnérabilité. Une augmentation de l'impact potentiel accroît la vulnérabilité tandis qu'une augmentation de la capacité d'adaptation réduit la vulnérabilité.

$$Vulnérabilité = \frac{impact\ potentiel + (1 - capacité\ d'adaptation)}{2}$$

### 3 Résultats

#### 3.1 Vulnérabilité passée, actuelle et future aux inondations pluviales

##### 3.1.1 Évaluation de la vulnérabilité actuelle

- Exposition (nombre moyen de jours de pluies suivant différents seuils)**

La Figure 9 présente les résultats issus de la spatialisation du nombre moyen / maximal annuel de pluies journalières de 1970 à 2015 supérieures ou égales à 60mm. Les pluies journalières supérieures ou égales au seuil de 60mm sont observées au moins une fois par an dans le bassin de l'Ouémé (Figure 9,a). Ce nombre s'accroît jusqu'à deux fois par an (en moyenne) dans certaines zones comme Agouna et Tchètti au sud-ouest. En général sur l'ensemble du bassin, les pluies de cette envergure sont enregistrées au moins trois fois tous les deux ans. Les moyennes considérées précédemment peuvent cacher des informations quant à l'occurrence des fortes pluies. Ainsi donc, le nombre maximal annuel de pluie journalière supérieure ou égale à 60 mm a été calculé puis spatialisé (Figure 9,b). Il apparaît que ces fortes pluies s'observent plusieurs fois dans une année jusqu'à atteindre onze fois à l'ouest du bassin (par exemple Abomey, Bohicon, Tchètti). Ceci pourrait expliquer l'occurrence presque annuelle des inondations dans la zone d'étude. Les études réalisées dans le cadre du projet Système d'Alerte Précoce (SAP-BENIN, 2015) ont montré que les pluies supérieures ou égales à cette valeur sont susceptibles de créer d'énormes dégâts tant matériels que financiers.

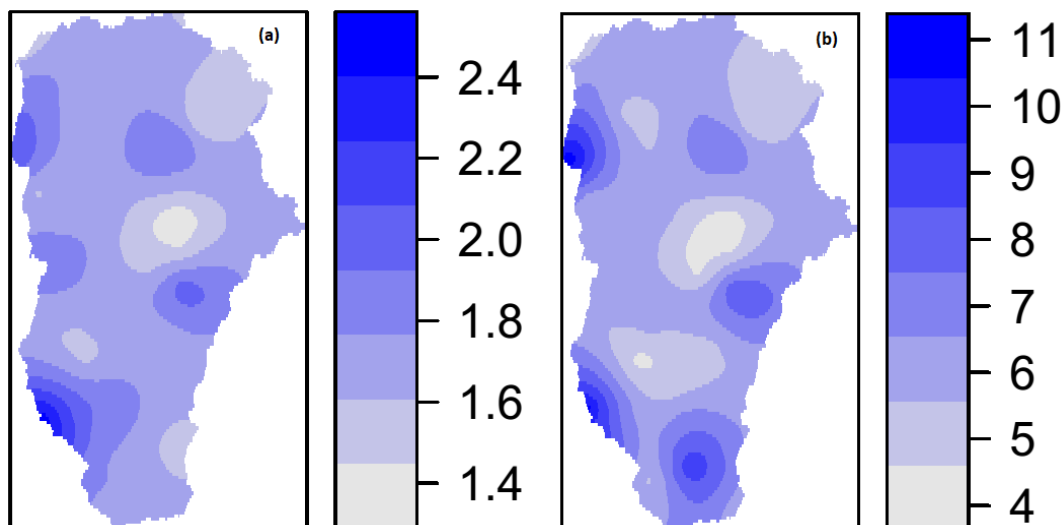


Figure 9: Spatialisation du nombre moyen annuel (a) et maximal annuel (b) de pluie journalière supérieure ou égale à 60mm (1970-2015) sur le bassin de l'Ouémé.



L'occurrence maximale annuelle des pluies pour les différents niveaux d'alerte retenus est montrée à la Figure 10. Les pluies comprises entre 60 et 90mm peuvent s'observer quatre fois en une année et peuvent atteindre sept fois par an au sud-est du bassin (Zangnanado, Bonou, Pobè). Les pluies comprises entre 90 et 110mm ont une occurrence maximale annuelle comprise entre un (au centre sud) et trois (au centre-ouest et sud-ouest du bassin). Les pluies supérieures à 110mm sont rares, cependant, elles s'observent jusqu'à quatre fois à mi-chemin entre le nord et le centre-ouest du bassin (aux environs de Pénésoulou, Sèmèrè).

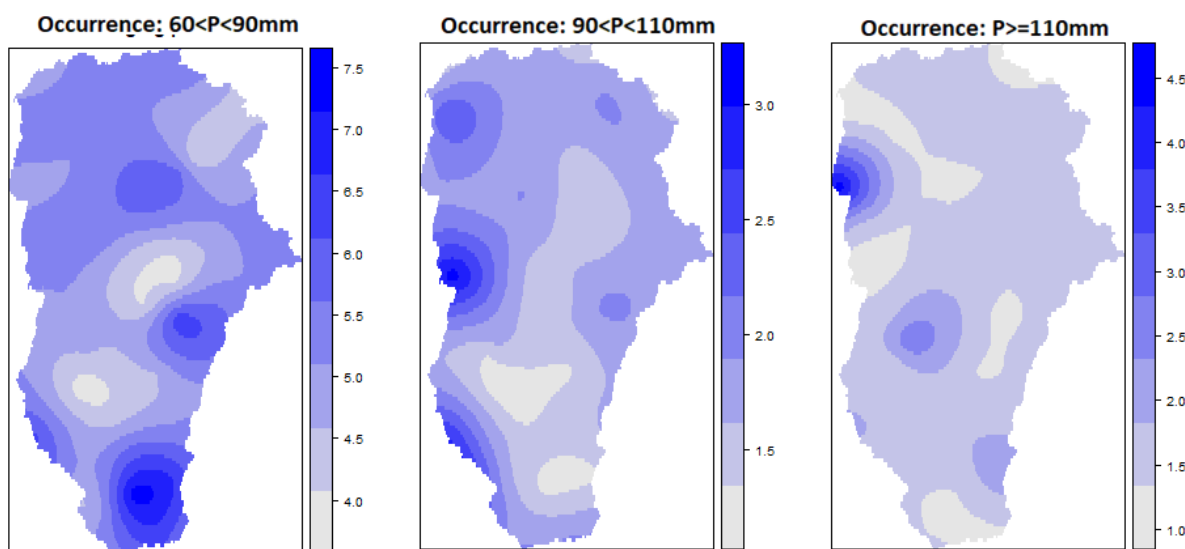


Figure 10: Occurrence des pluies extrêmes pour les trois seuils retenus (Tableau 2) sur la période 1970-2015

En somme, les pluies comprises entre 60 et 90 mm s'observent plus fréquemment au sud du bassin, celles comprises entre 90 et 110 mm au centre-ouest et sud-ouest du bassin tandis que les pluies supérieures à 110 mm s'observent le plus souvent à mi-chemin entre le centre et le nord-ouest.

Le test de Mann Kendall appliqué au nombre annuel de pluies journalières supérieures ou égales à 60 mm révèle que cet indicateur est stationnaire pour la plupart des stations ; mais augmente significativement pour les stations d'Agouna, Kouandé, Lonkly, Okpara, Sèmèrè et Tchaourou au seuil de significativité de 5% (Figure 11). En d'autres termes, les pluies extrêmes ont été de plus en plus fréquentes pour les zones susmentionnées impliquant un risque accru des inondations dans ces zones.

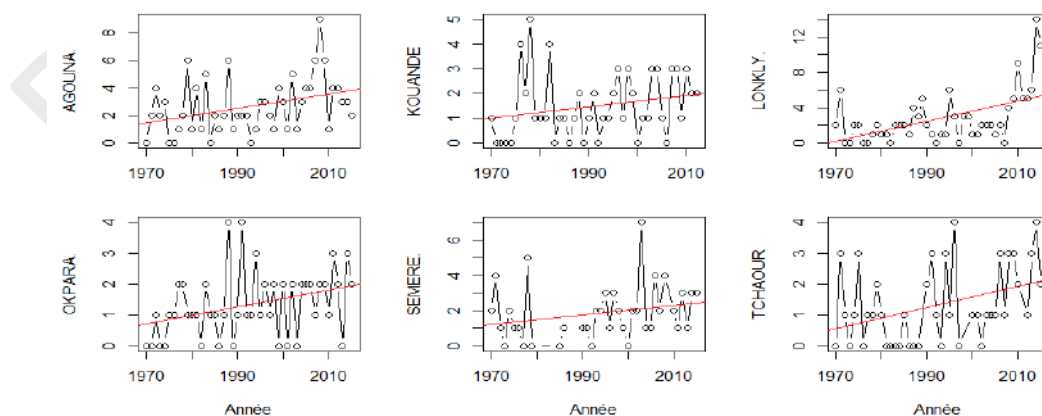


Figure 11: Tendence dans les séries du nombre de pluies supérieures ou égales à 60 mm.

### ■ *Quantiles de pluies extrêmes dans la zone d'étude*

Les pluies extrêmes de période de retour 2ans sont pour la plupart supérieures à 70 mm (Figure 12a). Ce qui indique que le niveau d'alerte jaune dont la borne inferieure est de 60 mm est atteint au minimum tous les 2 ans. Suivant le rapport du SAP-Benin (SAP-BENIN, 2015) sur les inondations pluviales, le niveau d'alerte jaune quoique correspondant au plus faible niveau, est associé déjà à d'énormes dégâts tant financiers, humains que matériels. À titre d'exemple, les inondations associées aux pluies extrêmes de période de retour 2 ans sont susceptibles de créer des dommages de l'ordre d'un milliard de francs CFA sur l'ensemble du Benin (SAP-BENIN, 2015).

Les pluies extrêmes de période de retour 5ans (Figure 12b) sont comprises entre 95 mm (sur la plupart des stations du bassin de l'Ouémé) et 110 mm (au sud-ouest du bassin puis dans la zone de Parakou). Celles de période de retour 10ans (Figure 12b) sont comprises entre 100 mm au nord du bassin puis au sud et 130 mm au sud-ouest du bassin dans la zone de Savalou et Tchètti.

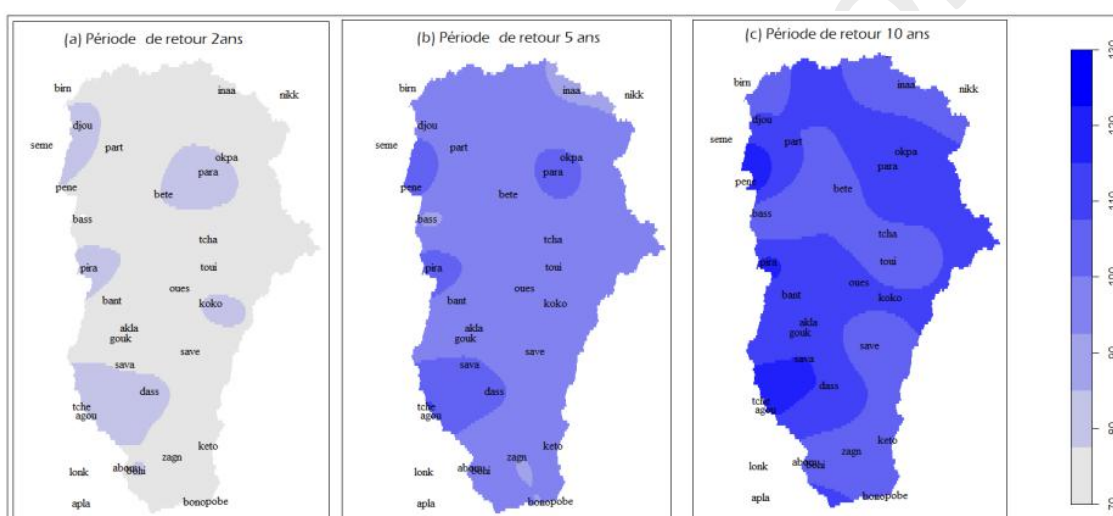


Figure 12: Quantiles de périodes de retour 2ans (a), 5ans (b) et 10ans (c)

A l'échelle des arrondissements considérés comme unités de base d'analyse et après la normalisation de ces indicateurs (voir Figure 13), il apparait que l'ouest du bassin est le plus exposé aux aléas pluviométriques extrêmes notamment les arrondissements situés au sud de Savalou, au nord de Djidja et à l'ouest de Dassa Zoumé mais aussi ceux de Kaboua (Savè), de Challa Ogoi et Kilibo (Ouèssè) ; tous les arrondissements de Parakou ainsi que Tchatchou (Tchaourou) et Pénéssoulou (Bassila) pour les pluies intenses supérieures à 60 mm c'est-à-dire les pluies qui sont susceptibles de causer des dégâts considérables. Plusieurs arrondissements sont exposés aux pluies extrêmes comprises entre 90 et 110 mm comparativement aux pluies extrêmes supérieures à 110 mm.

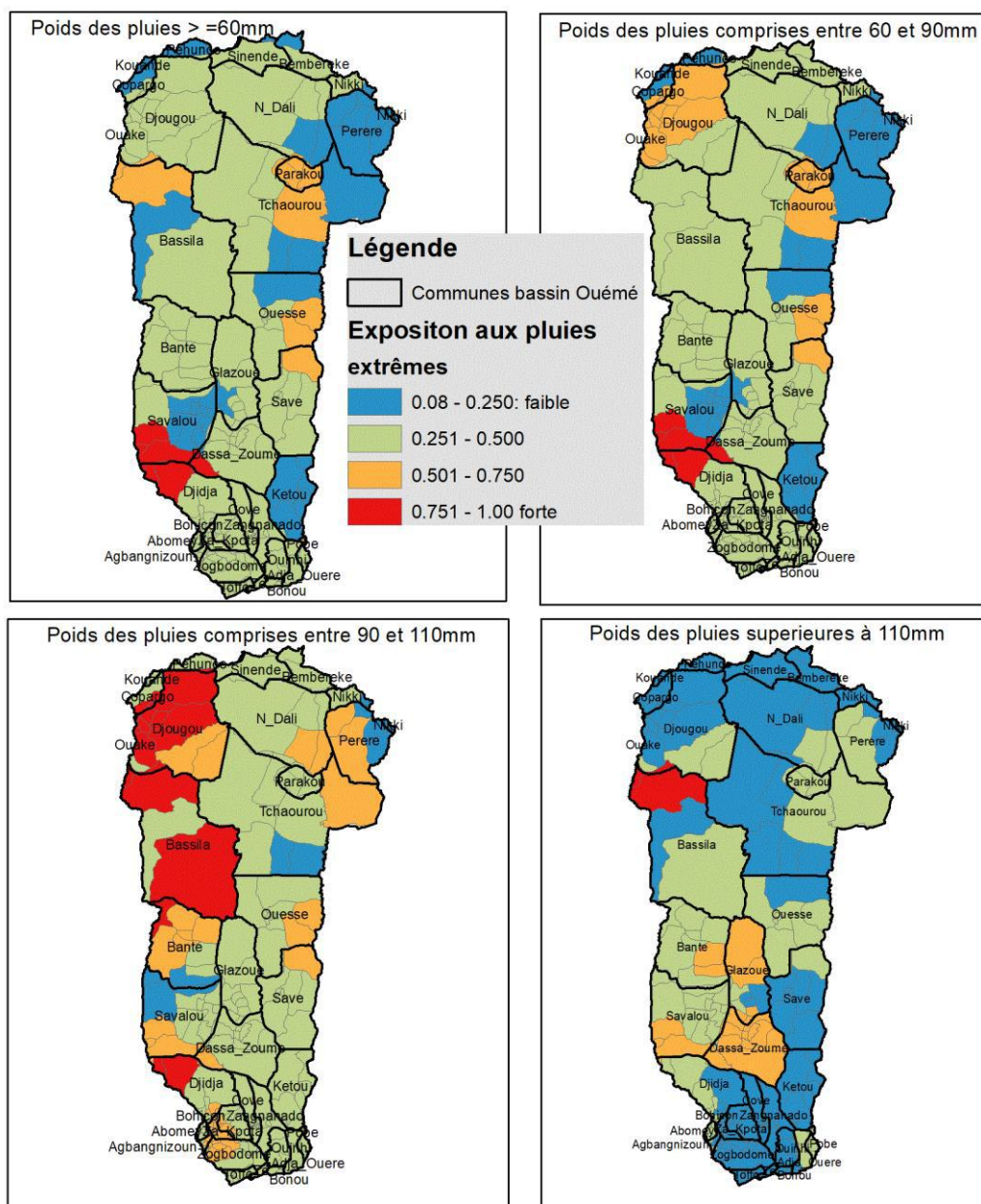


Figure 13: Degré d'exposition des arrondissements du bassin de l'Ouémé aux pluies extrêmes

#### ■ **Sensibilité**

Les trois indicateurs considérés pour la sensibilité dont dépend l'occurrence des inondations surtout pluviales sont la densité de la population, l'occupation des terres et la pente représentative de la topographie.

Les premier et deuxième arrondissements de Bohicon sont de loin les plus peuplés (par unité d'occupation) dans le bassin de l'Ouémé (20022 et 26851 hbts par Km<sup>2</sup> respectivement, INSAE (2015)). Ces grandes valeurs ont joué un rôle prépondérant dans la normalisation de cet indicateur qui est inférieur à 0.25 pour tous les autres arrondissements y compris Parakou, la seule ville à statut particulier du bassin.

Les unités d'occupation des terres ont été classées suivant leurs rôles potentiels dans la survenue des inondations. Ainsi, les agglomérations ont le poids maximal de 5 pendant que les forêts ont le poids minimum de 1 (voir annexe). La normalisation de la moyenne des poids par arrondissement indique

que les zones d'Abomey, Bohicon et Sagon sont les plus sensibles (très sensibles) en termes d'occupation des terres pendant que la moitié nord du bassin en dehors de quelques zones comme Parakou, Pèrèrè et Bariénou dans Djougou sont les moins sensibles pour cet indicateur. La moitié sud du bassin peut être considérée comme une zone assez sensible. La valeur normalisée de la pente moyenne par arrondissement est majoritairement inférieure à 0.25, surtout dans la partie centre et nord du bassin versant.

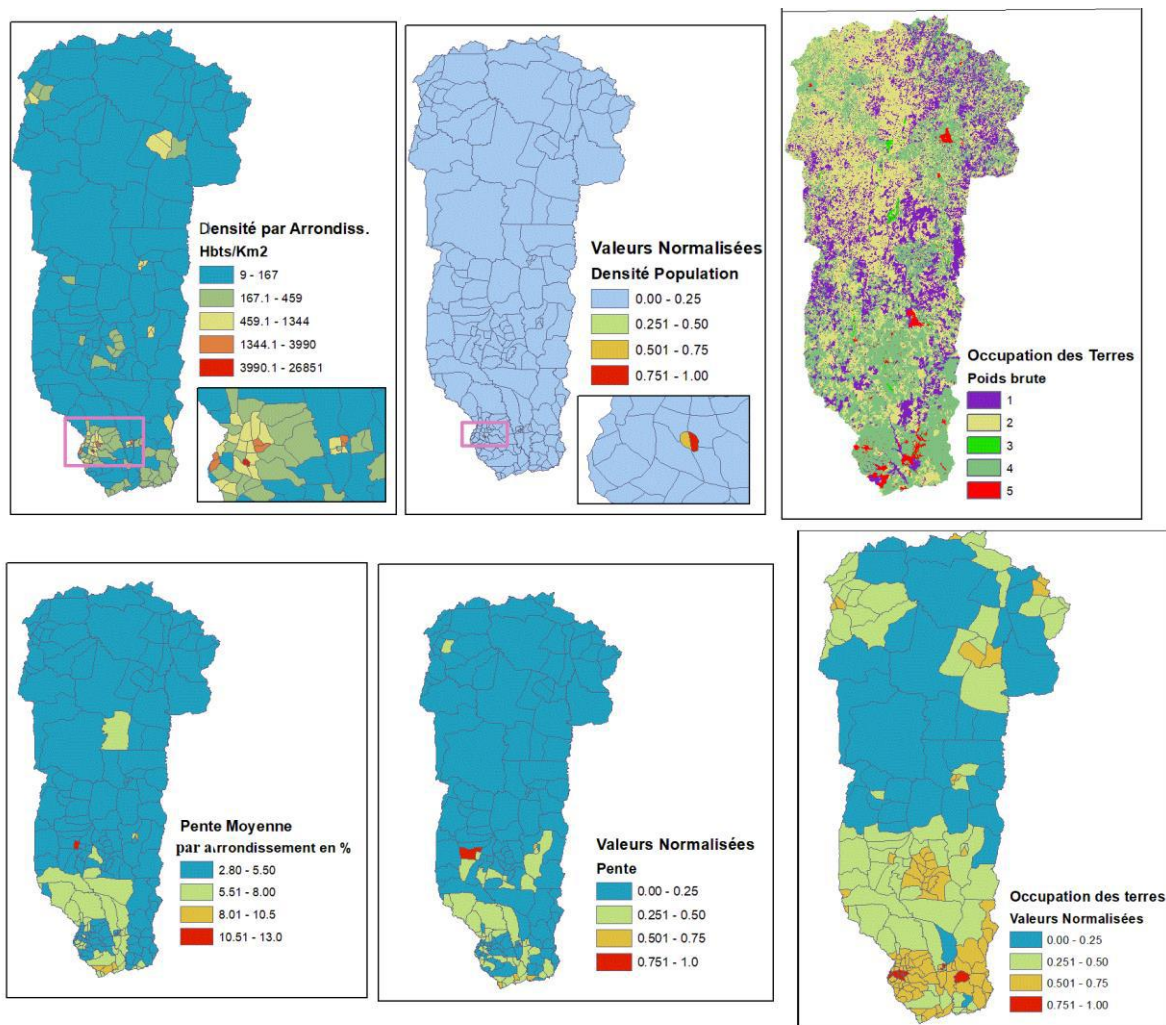


Figure 14: Indicateurs de sensibilité aux inondations dans le bassin de l'Ouémé

■ ***Impacts des aléas et tendances climatiques passés sur le bassin en termes d'inondations pluviales***

La combinaison des indicateurs d'exposition et de sensibilité à l'échelle des arrondissements a permis de déduire les impacts potentiels de l'inondation pluviale sur les populations et les biens dans les arrondissements du bassin de l'Ouémé. Les arrondissements du nord-ouest de la commune de Djidja ainsi que le premier et le deuxième arrondissement de Bohicon apparaissent comme les zones susceptibles d'être très fortement impactées par les pluies extrêmes en tenant compte des conditions physiques. Les zones à potentiel d'impacts considérables se répartissent par endroits (Bassila, le nord de Dassa- Zoumé et de Bantè) sur l'ensemble du bassin versant. Les zones à faible potentiel d'impact par les pluies extrêmes apparaissent dominantes sur l'ensemble du bassin versant.



Il est utile de rappeler que les communes de la zone deltaïque notamment Adjohoun et Bonou continueront de subir les affres de l'inondation fluviale (crue de l'Ouémé) et non pluviale en l'absence d'infrastructures structurantes de régulation masses d'eau venant de l'amont du bassin.

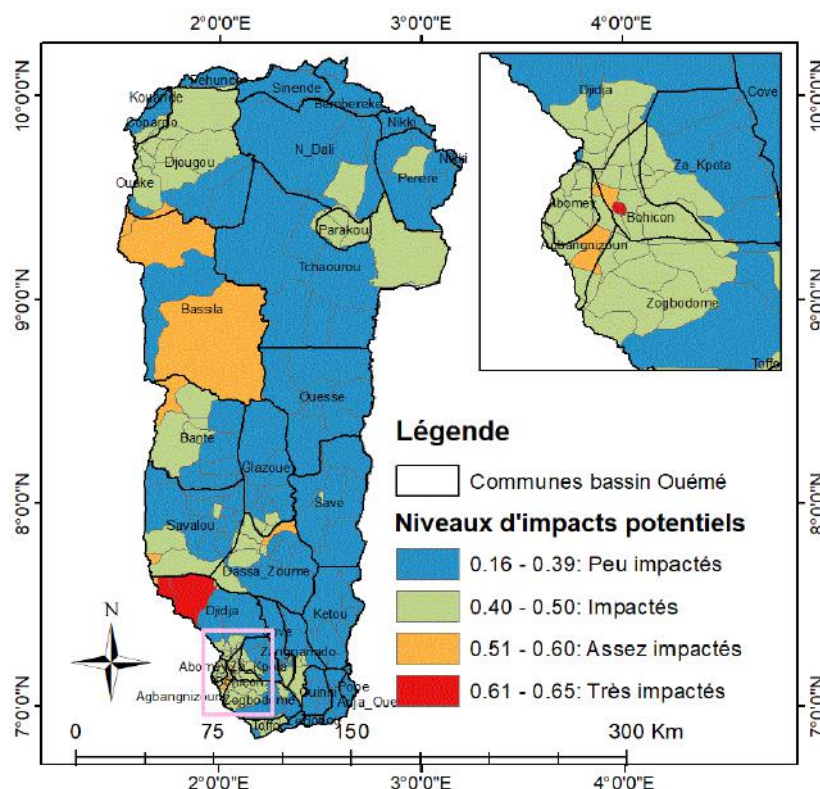


Figure 15: Impact potentiel des pluies extrêmes dans les arrondissements du bassin de l'Ouémé

#### ▪ **Capacité d'adaptation aux inondations pluviales**

Plusieurs indicateurs de capacité d'adaptation ont été identifiés prioritairement à travers la revue de littérature. Compte tenu de la disponibilité des données et du temps imparti pour les études, trois indicateurs de capacité d'adaptation ont pu être quantifiés dans la présente étude. Il s'agit (i) de l'indice de richesse monétaire représentatif du produit intérieur brut pour chaque commune, (ii) de la disponibilité de stations d'observation hydrométéorologique pour quantifier l'information hydro-climatique nécessaire pour l'implémentation d'un système d'alerte précoce efficace, (iii) de la disponibilité d'un plan de contingence communal et/ou d'un comité communal de protection civile. La Figure 16 montre les valeurs normalisées des indicateurs 'indice de richesse monétaire' et la moyenne des indicateurs de capacité d'adaptation disponible à l'échelle presque communale. Les communes ayant les indices de richesse les plus élevés sont situées aux extrémités de bassin versant à l'exception de Toffo et Zè, les moins riches. La moyenne des trois indicateurs de capacité d'adaptation révèle que Parakou est la commune la plus apte à faire face aux inondations suivies par les communes de Tchaourou, Savé et Bonou. En effet, Parakou est la seule ville à statut particulier du bassin, la plus riche en terme monétaire et disposant d'une station synoptique pour la quantification de l'information climatique mais aussi d'un plan de contingence communal et d'un comité communal de protection civile.

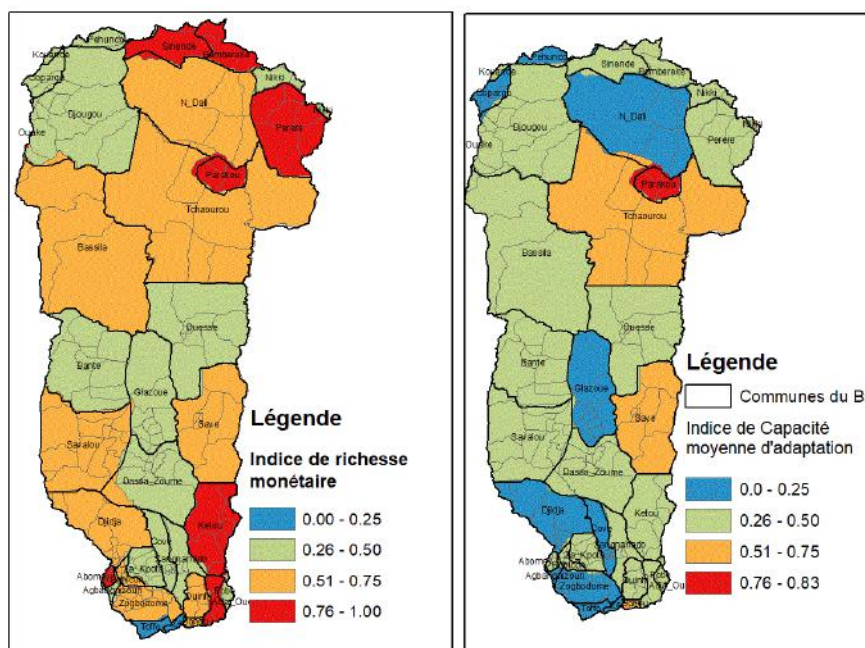


Figure 16: Indice de richesse monétaire correspondant à une capacité d'adaptation ainsi que la capacité moyenne d'adaptation de chaque commune.

#### ▪ **Evaluation de la vulnérabilité actuelle**

La Figure 17 indique la vulnérabilité passée et présente (1970-2015) des arrondissements du bassin de l'Ouémé aux pluies extrêmes. En dehors de la commune de Parakou et de certains arrondissements de Tchaourou et de Savè qui apparaissent peu vulnérables, tous les autres arrondissements sont vulnérables aux risques d'inondation pluviale à divers degrés. Le sud du bassin versant ainsi que la commune de Glazoué et certains arrondissements de Bantè au centre puis la commune de Copargo apparaissent très vulnérables aux effets néfastes des extrêmes pluviométriques. Cette vulnérabilité est fortement due à la capacité d'adaptation très faible des arrondissements. En effet, les impacts potentiels obtenus sont très faibles indiquant une contribution très faible des indicateurs de sensibilité et d'exposition.

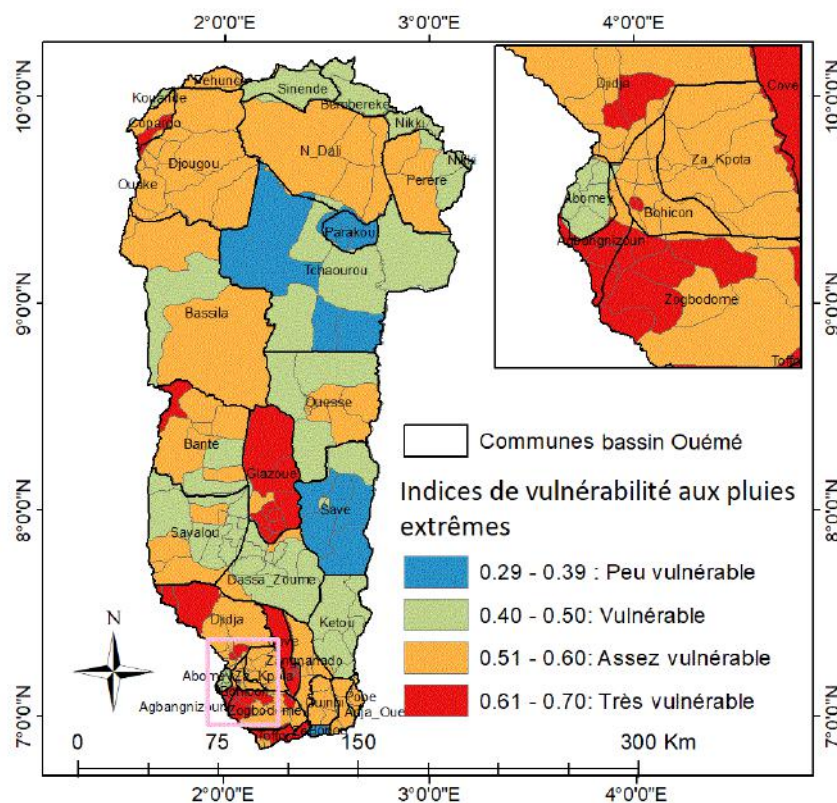


Figure 17: Indice de vulnérabilité aux pluies extrêmes des arrondissements du bassin versant de l'Ouémé

### 3.1.2 Evaluation de la vulnérabilité future

Le Bénin fait partie des pays qui sont très vulnérables aux impacts du réchauffement climatique. Selon le 5ème rapport du GIEC sur les aspects scientifiques des changements climatiques (GIEC 2013), les manifestations du réchauffement global sont fortement en lien avec les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine. De plus, ce rapport montre également des tendances à la hausse de la température, du niveau des mers et des océans, de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes. Ces événements extrêmes s'observent déjà au Bénin (cas des inondations de 2010) et affecteront davantage de nombreux secteurs économiques vitaux et les populations. La vulnérabilité future aux impacts des changements climatiques sera traitée ici pour le secteur des ressources en eau à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé, suivant le scénario RCP 4.5 issu de modèles climatiques (ECEARTH, HADGEM2, IPLS et MPIESN).

#### ■ Exposition

Les projections climatiques pour la période 2035-2050, notamment celles de la pluviométrie indiquent une recrudescence des extrêmes pluviométriques sur la quasi-totalité du bassin de l'Ouémé (Figure 18). Tous les quatre modèles régionaux s'accordent sur la prépondérance des aléas pluviométriques dans la partie septentrionale du bassin et une réduction des extrêmes pluviométriques dans sa partie sud. On note au niveau du modèle ECEARTH et dans une certaine mesure au niveau des modèles IPLS et MPIESM un gradient sud-nord où l'exposition croît avec la latitude. Pour le modèle IPLS, une forte exposition s'observe sur l'ensemble du bassin versant en dehors de l'extrême sud. Cette diminution des extrêmes dans la partie méridionale du bassin devrait être considérée avec précaution compte

tenu des incertitudes liées aux projections climatiques notamment aux projections des extrêmes pluviométriques (Chen et al., 2013). Ce gradient sud-nord d'augmentation des extrêmes pluviométriques est en opposition avec les expositions passées et présentes dans la zone d'étude.

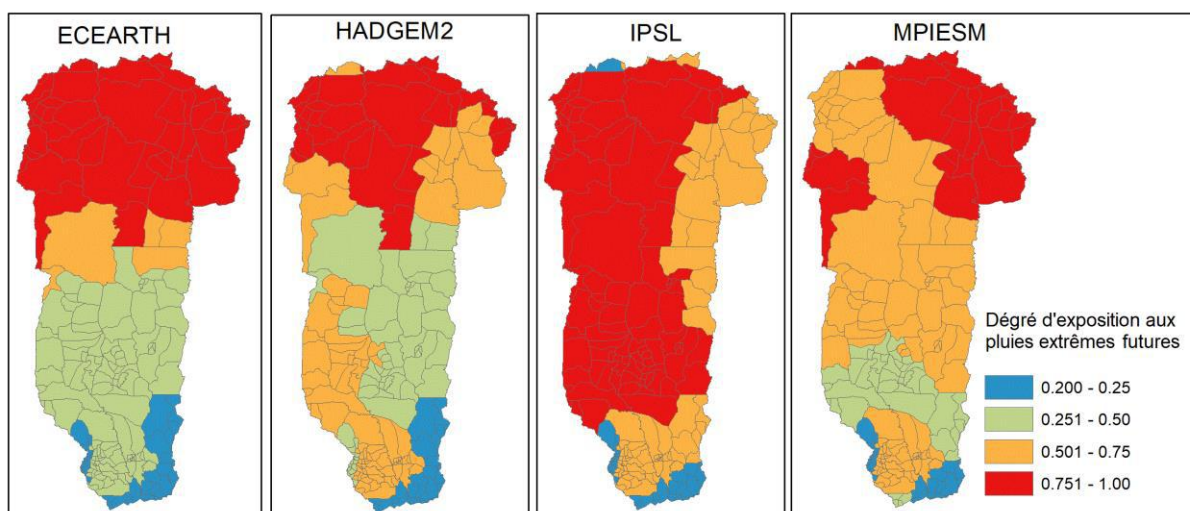


Figure 18: Degré d'exposition future aux pluies extrêmes des arrondissements suivant différents modèles climatiques

#### ▪ **Sensibilité**

Certains indicateurs de la sensibilité tels que la densité de la population et l'occupation des terres varient dans le temps (mais aussi dans l'espace), et une nouvelle quantification de ces indicateurs pour la période 2035-2050 devrait être faite. Cependant, pour déduire exclusivement l'impact du climat futur sur le secteur considéré, les indicateurs de la sensibilité ont été considérés invariants.

#### ▪ **Impact du climat futur sur le secteur**

Les impacts les plus élevés du climat futur en ce qui concerne les inondations pluviales s'observeraient dans la partie nord du bassin suivant les projections des quatre modèles climatiques mais aussi jusque dans la partie centrale sud du bassin (Figure 19). Le sud du bassin, et surtout l'extrême sud (Bonou, Adja-Ouerre, Toffo...), seraient moins sujets aux impacts des inondations pluviales suivant les sorties des quatre modèles. Ces résultats sont à prendre avec précaution car tel qu'indiqué au niveau de l'exposition future, beaucoup d'incertitudes sont liées aux projections futures notamment des extrêmes pluviométriques (Chen et al., 2011). La méthode de correction des biais ou de descente d'échelle utilisée pourrait être aussi questionnable à ce stade des analyses. Contrairement aux projections climatiques, les inondations s'observent de manière prépondérante dans le sud du bassin.



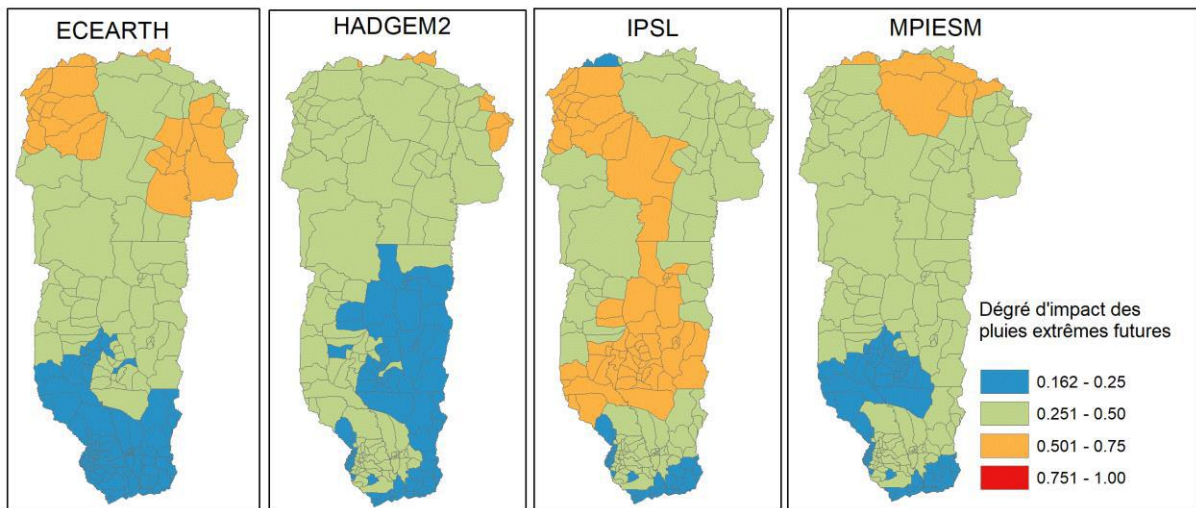


Figure 19: Degré d'impact potentiel des pluies extrêmes sur les arrondissements du bassin de l'Ouémé.

#### ▪ ***Evaluation de la vulnérabilité future***

La vulnérabilité future des populations du bassin de l'Ouémé aux pluies extrêmes telle que calculée à partir des projections climatiques pour l'horizon 2035-2050 se présente sur la Figure 20. On observe une variabilité importante de la vulnérabilité quant aux sorties des modèles. En considérant la carte de la vulnérabilité maximale calculée à partir des quatre modèles climatiques, il apparaît que la vulnérabilité future la plus importante (indice supérieur à 0.50) se répartit sur une grande partie du bassin (couleurs rouge et orange). A titre d'exemple, les communes les plus potentiellement vulnérables aux inondations pluviales dans le futur seraient celles de Djougou, N'Dali, Pèrèrè et Ouaké au nord du bassin ; les communes de Glazoué, Ouèssè, Savalou et Djidja au centre du bassin ; Bohicon, Zakpota, Zagnanado, Zogbodomey au sud du bassin versant. La comparaison entre la vulnérabilité future et à celle présente / passée indique que certaines zones deviendraient moins vulnérables (couleur bleue sur les deux dernières parties de la Figure 20) aux pluies extrêmes dans le futur que précédemment observée. La majorité des arrondissements (notamment coloriés en orange et en rouge) connaîtraient une augmentation de leur vulnérabilité dans le futur, c'est-à-dire, leur situation par rapport aux pluies extrêmes devrait s'empirer si des mesures adéquates ne sont pas prises.

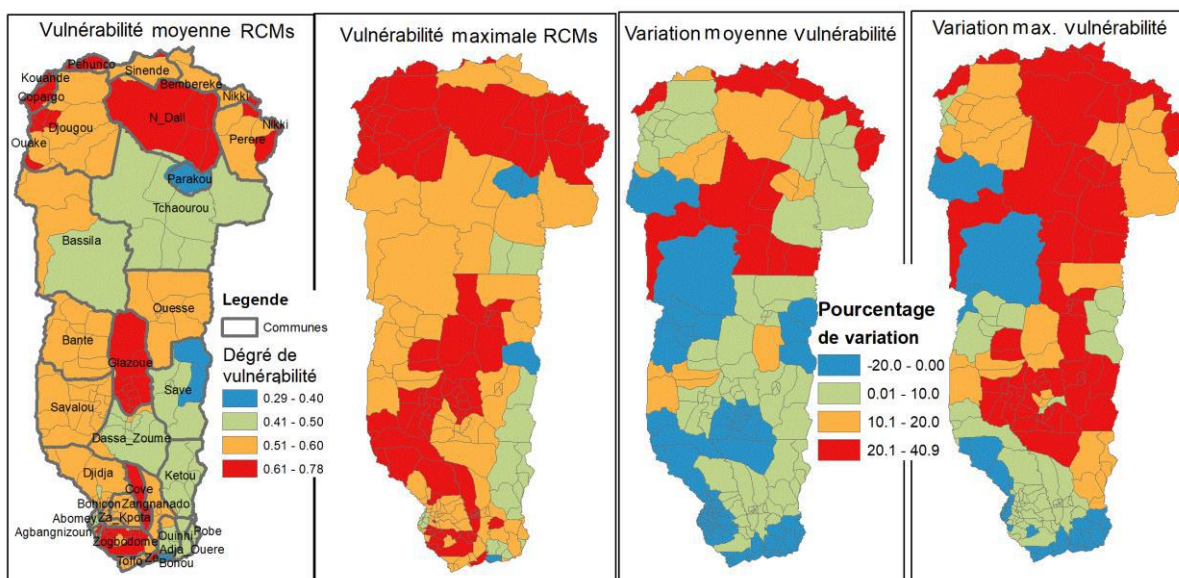


Figure 20: Indice de vulnérabilité future des arrondissements du bassin de l'Ouémé aux pluies extrêmes et ampleur de la variation par rapport à la vulnérabilité passée

### 3.2 Vulnérabilité passée, actuelle et future à la pénurie d'eau dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Savè

#### 3.2.1 Évaluation de la vulnérabilité actuelle

##### ■ Exposition

Les paramètres d'exposition ont été déterminés à travers la modélisation hydrologique en utilisant le modèle SWAT 2012. Les sorties du modèle sur la période de référence ont permis de spatialiser la précipitation, la recharge, le ruissellement et l'évapotranspiration réelle (ETR) qui peut être assimilée au niveau de satisfaction des besoins en eau des plantes (Figure 21). A l'échelle annuelle, les précipitations varient de 1078 à 1350 mm, les écoulements de 68 à 149 mm, la recharge de 42mm à 407mm, l'évapotranspiration de 724 à 1048 mm sur le bassin de l'Ouémé à Savè. On note ainsi une grande variabilité des indicateurs d'exposition au niveau du bassin de l'Ouémé à Savè. Les pluies annuelles maximales s'observent dans la partie ouest du bassin (Djougou, Pira, Bassila...). Il en est de même pour la recharge au niveau du bassin impliquant presque un gradient ouest-est de la recharge.

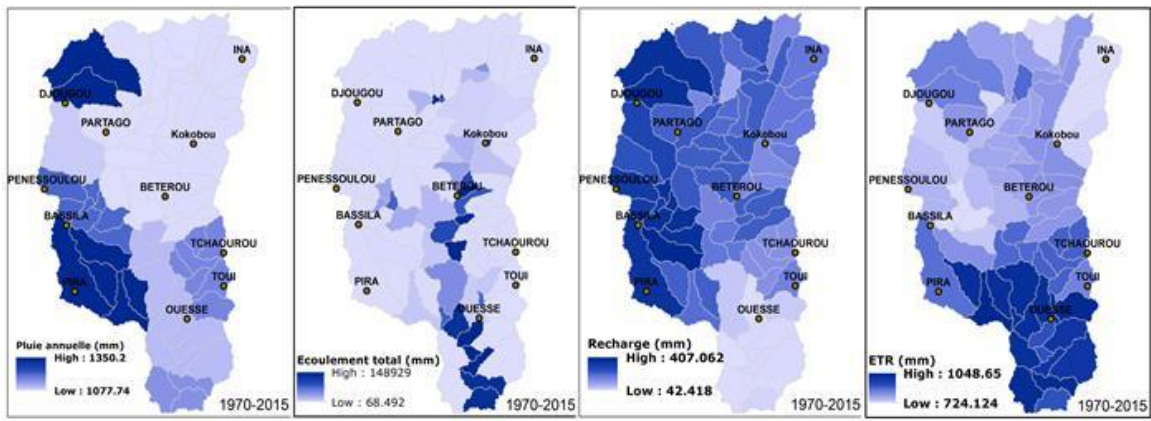


Figure 21: Spatialisation des indicateurs d'exposition (précipitation, ruissellement, recharge et ETR) dans le bassin de l'Ouémé à Savè

A l'échelle des sous bassins de l'Ouémé à Savè et après normalisation des indicateurs d'exposition (Figure 22), il ressort que l'ouest du bassin (Pira, Bassila, Djougou entre autres) est susceptible d'avoir plus de disponibilité de ressource en eau. Ceci se justifie par les fortes précipitations qu'on enregistre dans la zone. Cependant au Nord et au centre du bassin la pénurie d'eau peut s'avérer réelle. Le nord-ouest et le centre ouest du bassin apparaissent ainsi comme les zones les plus exposées aux aléas de la pénurie d'eau. Il s'agit entre autres de Tchaourou, Bétérou, Ina.

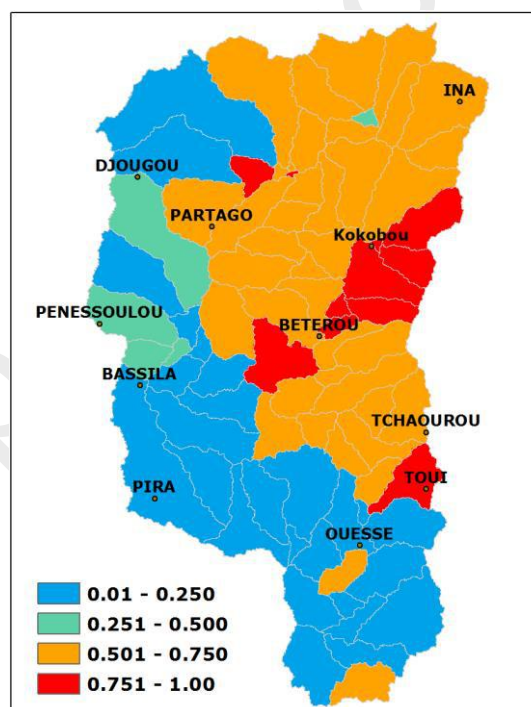


Figure 22: Degré d'exposition des sous bassins de l'Ouémé à Savè à la pénurie d'eau

#### ▪ **Sensibilité**

Pour l'évaluation de la sensibilité à la pénurie d'eau dans le bassin de l'Ouémé à Savè, deux indicateurs ont été retenus à savoir le taux de non desserte (le complémentaire du taux de desserte) et la densité moyenne de population. Les localités de Parakou, Kilibo, Vossa, Gbanlin et Savè sont celles qui ont une forte densité de population. Parmi ces localités, Parakou et Savè ont le plus bas taux de non desserte

(environ 16%) et constituent donc les zones les moins sensibles pour cet indicateur. Cependant les localités qui se retrouvent dans l'arrondissement de Bariénou, commune de Djougou ont un taux de non desserte élevé d'environ 54% (Figure 23) et sont ainsi les zones les plus sensibles en ce qui concerne le taux de non-desserte.

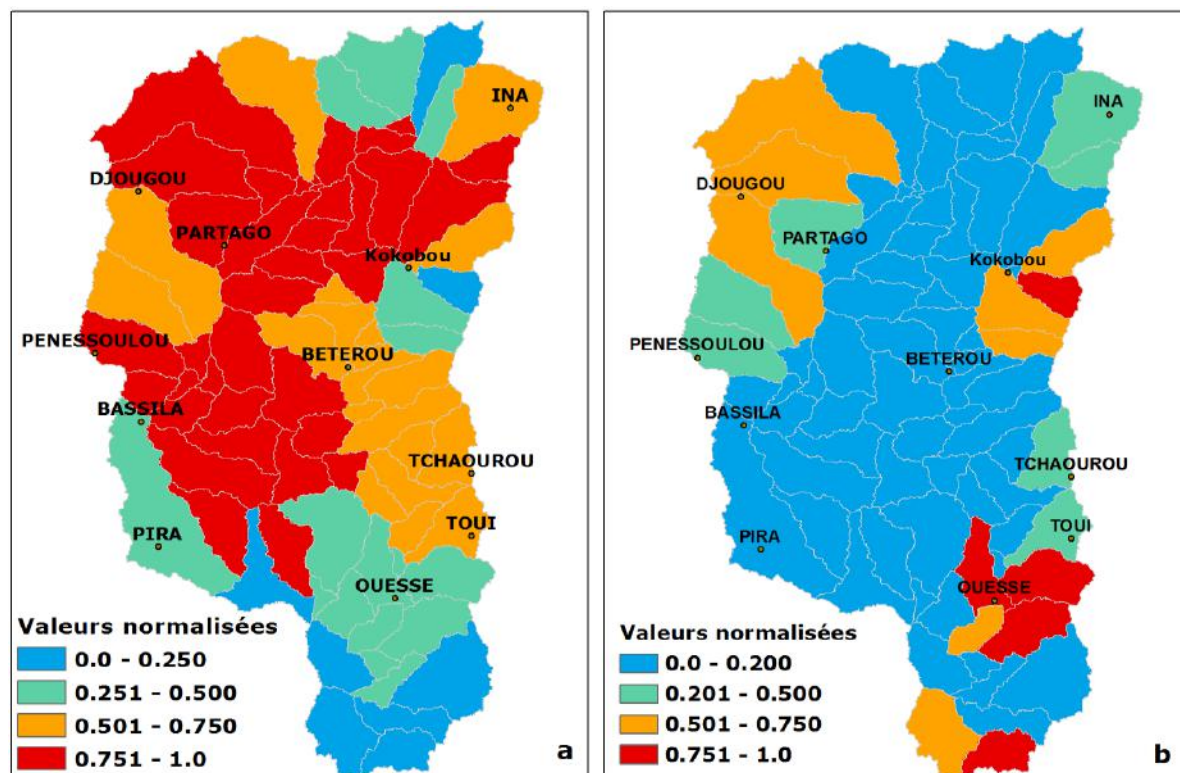


Figure 23: Sensibilité suivant la densité de la population (a) et le taux de non desserte (b) à la pénurie des ressources en eau dans le bassin de l'Ouémé à Savè

▪ ***Impacts des aléas et tendances climatiques passés sur la disponibilité en eau dans le bassin de l'Ouémé à Savè***

La combinaison des indicateurs d'exposition et de sensibilité a permis de déduire les impacts potentiels de la variabilité climatique sur la disponibilité en eau pour les populations au niveau des sous bassins du bassin de l'Ouémé à Savè. Les sous bassins qui sont mieux arrosés semblent être les plus impactés par la pénurie d'eau. Les régions qui paraissent être les plus affectées sont celle de Djougou, Ouèssè et près de Pira (Figure 24). Ceci peut s'expliquer par les volumes d'eau qui ruissellent à cause de la topographie et aussi de la recharge qui est limitée à cause du substratum géologique, car ces sous bassins sont pour la plupart situés en zone de socle.



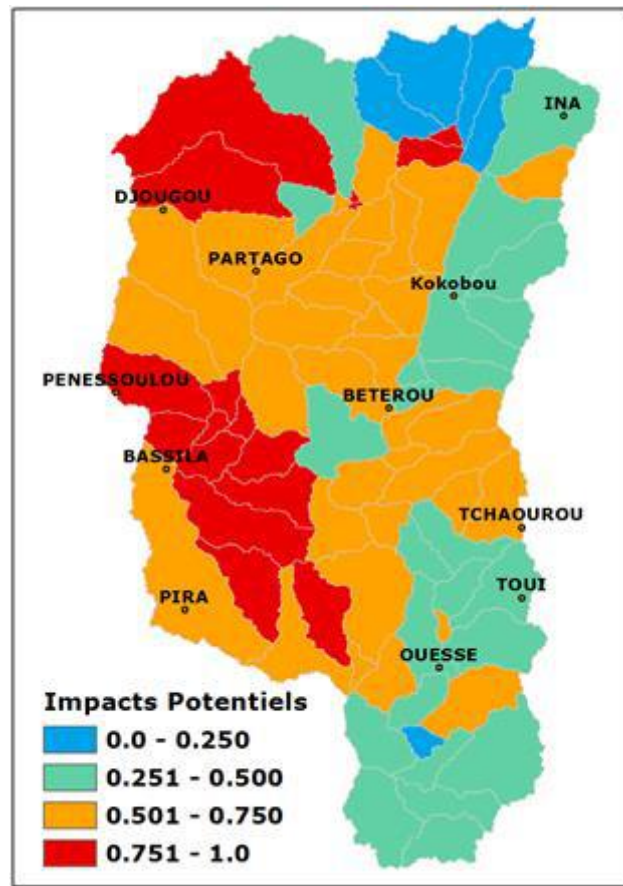


Figure 24: Potentiel d'impact des sous bassins à la disponibilité en eau dans le bassin de l'Ouémé à Savè

#### ▪ **Capacité d'adaptation à la pénurie d'eau**

Les indicateurs de capacité d'adaptation à la pénurie d'eau utilisée sont l'indice de richesse monétaire, la disponibilité et effectivité d'un Plan Communal de l'Eau (PCEau) et l'accès à l'information. La Figure 25 **Figure 25** montre la moyenne des indicateurs de capacité d'adaptation à l'échelle des sous bassins. La moyenne des trois indicateurs de capacité d'adaptation indique que les sous bassins se trouvant dans les environs d'INA, Pénésoulou et à l'Est de Bassila et Pira centre sont plus aptes à faire face à la pénurie d'eau. En revanche, les sous bassins situés à l'extrême Nord (au Nord de la commune Djougou) ont de très faible capacité d'adaptation à la pénurie d'eau. Le centre du bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Savè à une capacité d'adaptation moyenne à la pénurie d'eau. Ceci peut s'expliquer par les grandes villes ou communes comme Parakou, Djougou et Tchaourou qui disposent des PCEau et dont les habitants sont de grands commerçants qui disposent des moyens financiers pour faire face à la pénurie d'eau.

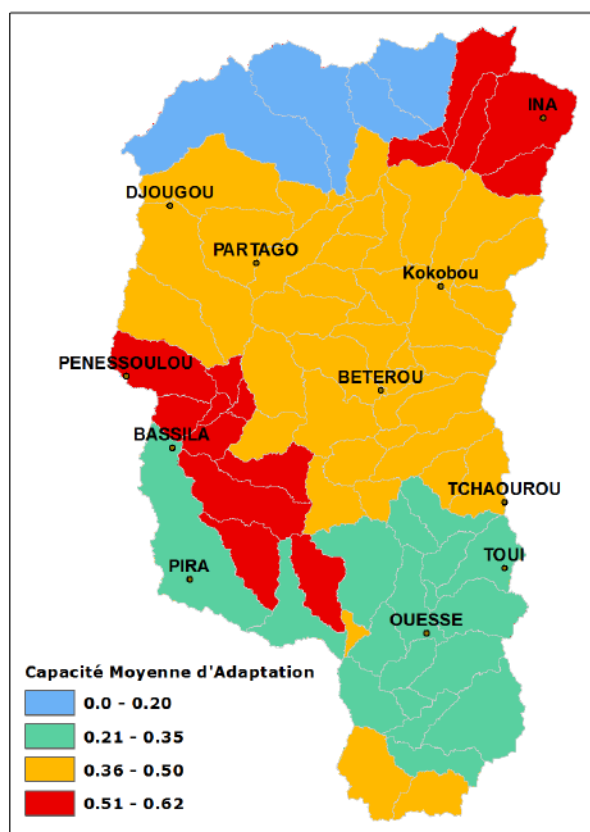


Figure 25: Capacité d'adaptation à la pénurie d'eau

#### ■ *Évaluation de la vulnérabilité actuelle*

La vulnérabilité passée et présente (1970-2015) des sous bassins de l'Ouémé à la pénurie d'eau est présentée à la Figure 26. L'ensemble des sous bassins de l'Ouémé à Savè sont tout au moins moyennement vulnérables à la pénurie d'eau. Les localités les plus affectées sont le nord de la commune de Djougou, Ouèssè et ses environs. Les autres parties du bassin sont aussi vulnérables les unes que les autres.



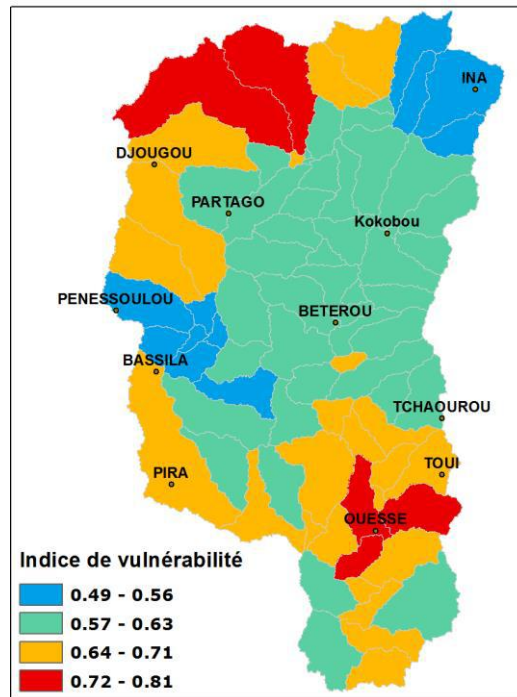


Figure 26 : Indice de vulnérabilité actuelle des sous bassins à la pénurie d'eau dans le bassin de l'Ouémé à Savè

### 3.2.2 Evaluation de la vulnérabilité future

#### ▪ Exposition

L'analyse des paramètres climatiques (pluies et températures) sur la période 1970 à 2015 révèle une augmentation des températures contre une diminution de la pluviométrie. A l'horizon 2035, les écarts des températures moyennes annuelles par rapport à celle de la période de référence varieraient dans l'ensemble entre +1,44 et +4,69°C (Tableau 8). A l'horizon 2050, elles varieraient entre +1,83 et +4,91°C (Tableau 9). Il faut noter ici que les sorties des quatre modèles climatiques considérés prédisent tous une augmentation des températures maximales et minimales. Cette augmentation sera plus prononcée au niveau des températures minimales qui connaîtront des hausses allant jusqu' à +8,6 °C (Tableau 8 et Tableau 9).

En ce qui concerne les régimes pluviométriques et sur la base des stations de référence considérées, les quatre modèles prédisent également une hausse des précipitations annuelles à Djougou (6,8 % à 12,7 %) et Bohicon (1,85 % à 32,6 %) à l'horizon 2035. Seuls les modèles HADGEM2 et MPIESN prédisent une baisse des précipitations annuelles à Parakou (1%) et à Savè (7,4 %). Les mêmes tendances sont observées à l'horizon 2050.

Cette variabilité observée aura forcément de conséquences sur la disponibilité en eau (eau de surface, eau souterraine et humidité du sol) dans le bassin versant de l'Ouémé à Savè. Les résultats de simulation obtenus dans le cadre de la présente étude, à partir du modèle hydrologique SWAT 2012, montrent que le bassin de l'Ouémé à Savè connaîtra une nette diminution de la ressource en eau aux horizons 2035 et 2050, en raison d'une augmentation des températures moyennes de +1,44 et +4,69°C, malgré une augmentation de la pluviométrie annuelle de +1 à +36,7 %. Ceci peut être expliqué par le fait qu'une température élevée donne un air chaud, qui absorbe plus d'eau sous forme de vapeur. Ainsi donc, une augmentation de la température moyenne de 1°C entraîne une augmentation de l'ETP de 10%.

Dans ce contexte, combiné à une démographie en perpétuelle croissance, la disponibilité d'eau par habitant, va diminuer (en raison d'une faible augmentation de la précipitation et d'une forte augmentation de la température). Ainsi, dans le bassin de l'Ouémé à Savè, l'impact conjugué des changements climatiques et de la pression démographique affectera forcément la disponibilité en eau par habitant.

Tableau 8: Comparaison des données de référence aux sorties des quatre modèles climatiques à l'horizon 2035

Variables	Situation de référence		Horizon 2035							
	(1970-2015)	Moyenne	ECEARTH		HADGEM2		IPLS		MPIESN	
			Moyenne	Δ	Moyenne	Δ	Moyenne	Δ	Moyenne	Δ
Djougou										
P (mm)	1839,10 – 946,2	1265,28	1351,33	+86,05	1349,90	+84,62	1426,83	+161,55	1349,90	+84,62
Tmax	32,72 –	33,62	34,81	+1,19	34,80	+1,18	34,81	+1,19	34,80	+1,18
Tmoy	26,50 –	27,34	28,78	+1,44	31,62	+4,28	28,78	+1,44	31,62	+4,28
Tmin (°C)	20,30 –	21,06	22,76	+1,7	28,44	+7,38	22,76	+1,7	28,44	+7,38
Parakou										
P (mm)	641,6 –	1138,39	1240,45	+102,06	1127,15	-11,24	1240,45	+102,06	1127,15	-11,24
Tmax	31,77 -	33,03	34,92	+1,89	35,10	+2,07	34,92	+1,89	35,10	+2,07
Tmoy	25,92 –	27,24	29,20	+1,96	31,93	+4,69	29,20	+1,96	31,93	+4,69
Tmin (°C)	19,93 –	21,45	23,50	+2,05	28,76	+7,31	23,50	+2,05	28,76	+7,31
Savè										
P (mm)	640,2 –	1062,46	1149,85	+87,39	983,37	-79,09	1149,85	+87,39	983,37	-79,09
Tmax	32,51 –	33,31	34,89	+1,58	35,30	+1,99	34,89	+1,58	35,30	+1,99
Tmoy	26,87 –	27,84	29,50	+1,66	32,24	+4,4	29,50	+1,66	32,24	+4,4
Tmin (°C)	21,13 –	22,38	24,13	+1,75	29,19	+6,81	24,13	+1,75	29,19	+6,81
Bohicon										
P (mm)	551,6 –	1098,35	1457,12	+358,77	1118,70	+20,35	1381,62	+283,27	1118,70	+20,35
Tmax	32,18 –	32,83	34,01	+1,18	34,40	+1,57	34,01	+1,18	34,40	+1,57
Tmoy	26,98 –	27,87	29,34	+1,47	31,71	+3,84	29,34	+1,47	31,70	+3,84
Tmin (°C)	21,77 –	23,14	24,70	+1,56	29,03	+5,89	24,70	+1,56	29,03	+5,89

Tableau 9: Comparaison des données de référence aux sorties des quatre modèles climatiques à l'horizon 2050

Variables	Situation de référence		2050							
	(1970-2015)	Moyenne	ECEARTH		HADGEM2		IPLS		MPIESN	
			Moyenne	Δ	Moyenne	Δ	Moyenne	Δ	Moyenne	Δ
Djougou										
P (mm)	1839,10 – 946,2	1265,28	1390,10	+124,82	1257,13	-8,15	1413,10	+147,82	1257,13	-8,15
Tmax	32,72 –	33,62	35,18	+1,56	35,41	+1,79	35,18	+1,56	35,41	+1,79
Tmoy	26,50 –	27,34	29,26	+1,92	32,25	+4,91	29,26	+1,92	32,25	+4,91
Tmin (°C)	20,30 –	21,06	23,34	+2,28	29,72	+8,66	23,34	+2,28	29,72	+8,66
Parakou										
P (mm)	641,6 –	1138,39	1307,04	+168,65	1129,91	-8,48	1307,04	+168,65	1129,91	-8,48
Tmax	31,77 -	33,03	35,24	+2,21	35,61	+2,58	35,24	+2,21	35,61	+2,58
Tmoy	25,92 –	27,24	29,63	+2,39	32,50	+5,26	29,63	+2,39	32,50	+5,26
Tmin (°C)	19,93 –	21,45	24,03	+2,58	29,40	+7,95	24,03	+2,58	29,40	+7,95
Savè										
P (mm)	640,2 –	1062,46	1228,15	+165,69	967,45	-95,01	1228,15	+165,69	967,45	-95,01
Tmax	32,51 –	33,31	35,11	+1,8	35,80	+2,49	35,11	+1,8	35,80	+2,49
Tmoy	26,87 –	27,84	29,88	+2,04	32,78	+4,94	29,88	+2,04	32,78	+4,94
Tmin (°C)	21,13 –	22,38	24,65	+2,27	29,77	+7,39	24,65	+2,27	29,77	+7,39
Bohicon										
P (mm)	551,6 –	1098,35	1502,20	+403,85	1154,31	+55,96	1409,20	+310,85	1154,31	+55,96
Tmax	32,18 –	32,83	34,20	+1,37	34,85	+2,02	34,20	+1,37	34,85	+2,02
Tmoy	26,98 –	27,87	29,70	+1,83	32,26	+4,39	29,70	+1,83	32,26	+4,39
Tmin (°C)	21,77 –	23,14	25,21	+2,07	29,67	+6,53	25,21	+2,07	29,67	+6,53

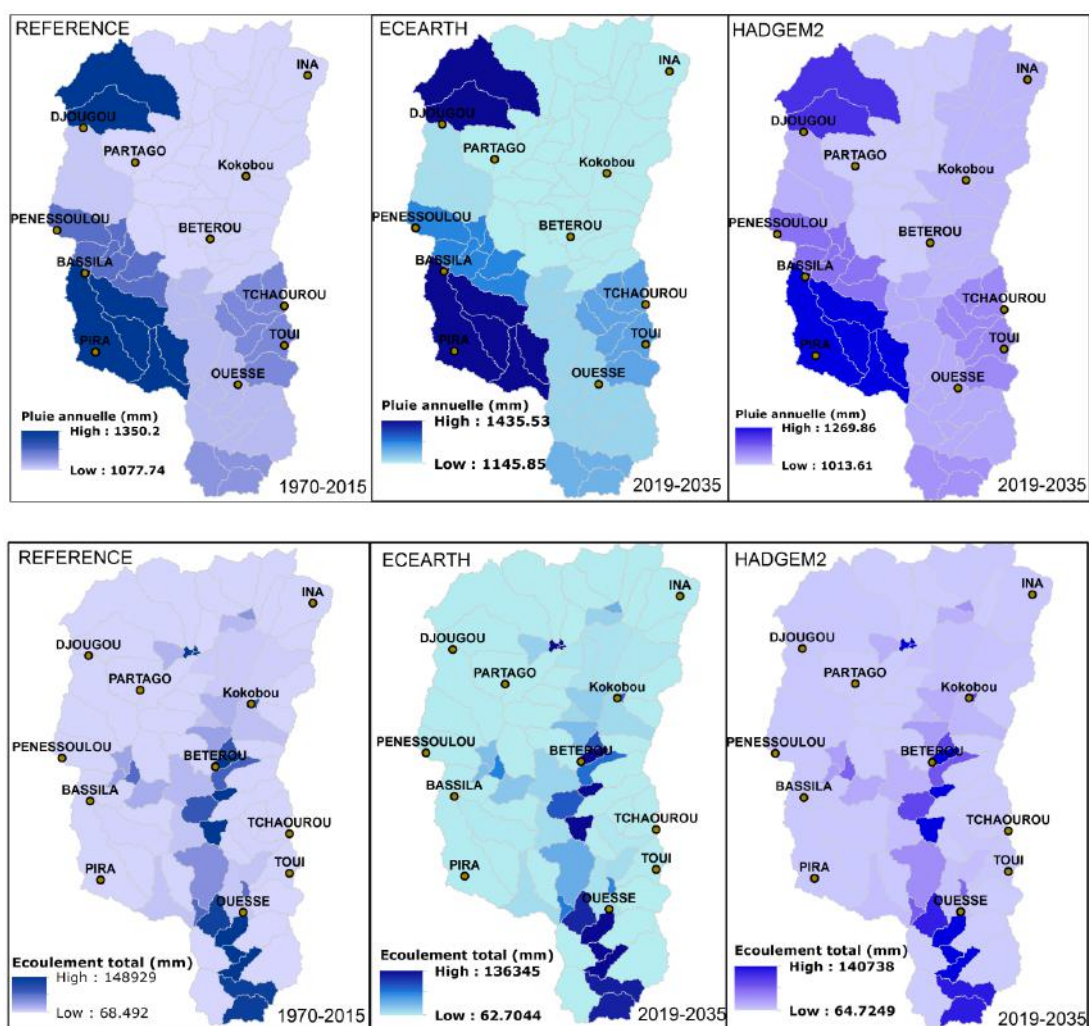


Figure 27: Impact des scénarios climatiques sur les précipitations et les écoulements à l'horizon 2035

Après analyse des données futures, il a été remarqué que les moyennes annuelles aussi bien des précipitations que des températures issues des modèles ECEARTH et IPLS sont identiques, de même que celles issues des modèles HADGEM2 et MPIESM (voir tableau 8 et 9), ce qui justifie le fait que ce sont seulement les données ECEARTH et HADGEM2 qui ont été utilisées pour l'analyse de la vulnérabilité future.

En ce qui concerne l'aléa pluies, le modèle ECEARTH prévoit une augmentation des précipitations de l'ordre de 6,3% à l'horizon 2035 par rapport à la période de référence. Cependant, le modèle HADGEM2 prévoit une baisse des précipitations d'environ 5,5% par rapport à la période de référence (1970-2015) (Figure 27). Cette situation affecterait les paramètres d'expositions que sont le ruissellement, la recharge et ETR. Les précipitations combinées à une forte augmentation des températures entraîneraient un accroissement de l'évapotranspiration réelle et une diminution du ruissellement et de la recharge (Figure 27).

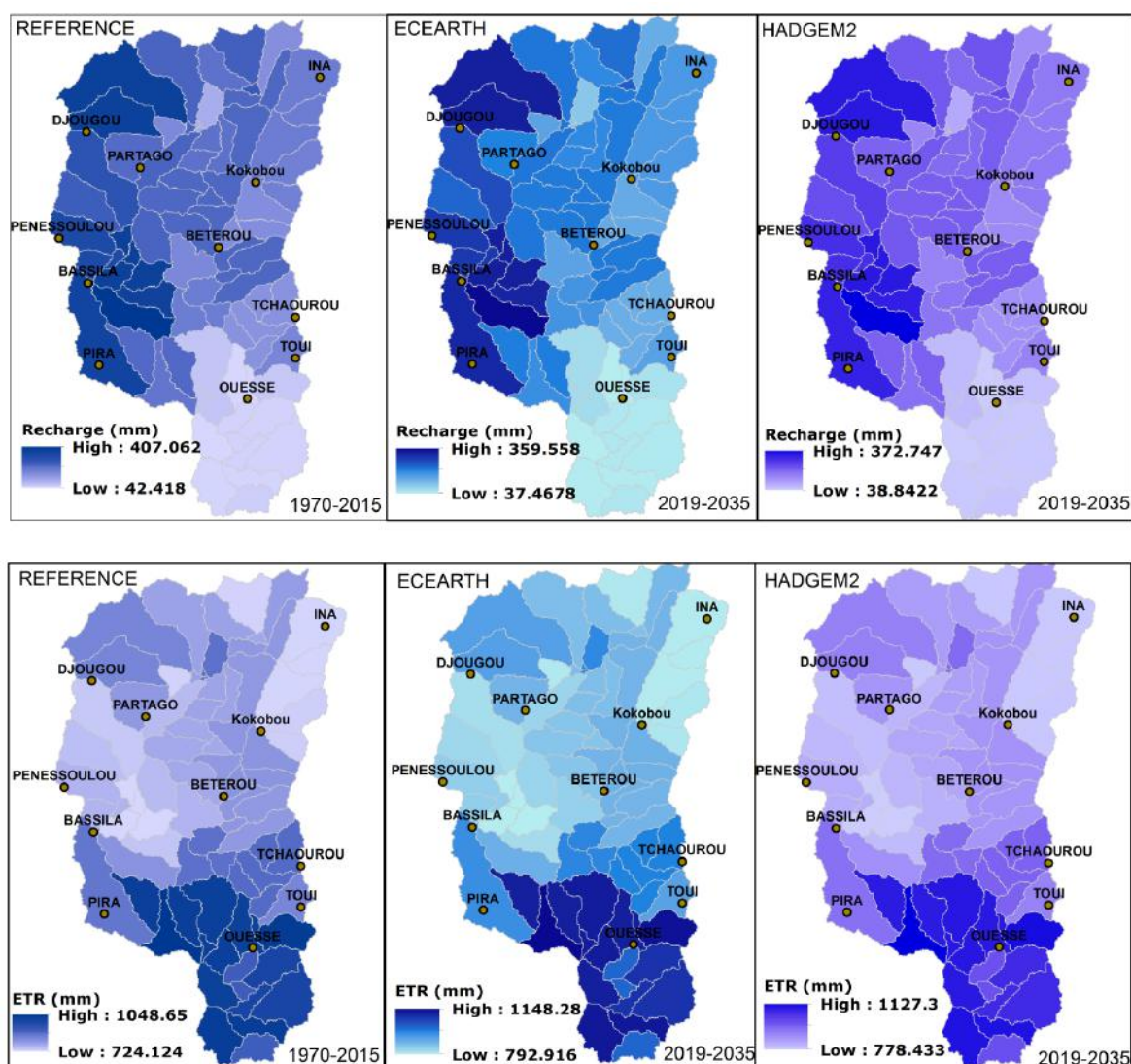


Figure 28: Impact des scénarios climatiques sur la recharge et l'ETR à l'horizon 2035

A l'horizon 2050, les mêmes tendances sont observées (Figure 29 et Figure 30). Bien que le model HADGEM2 semble se rapprocher des valeurs de la période de référence, on observe une diminution des volumes d'eau écoulés et de la recharge. Ceci s'explique par le fait que l'élévation des températures donnera d'airs chauds, qui absorberont plus d'eau sous forme de vapeur. D'où la diminution des des volumes d'eau écoulés et de la recharge.



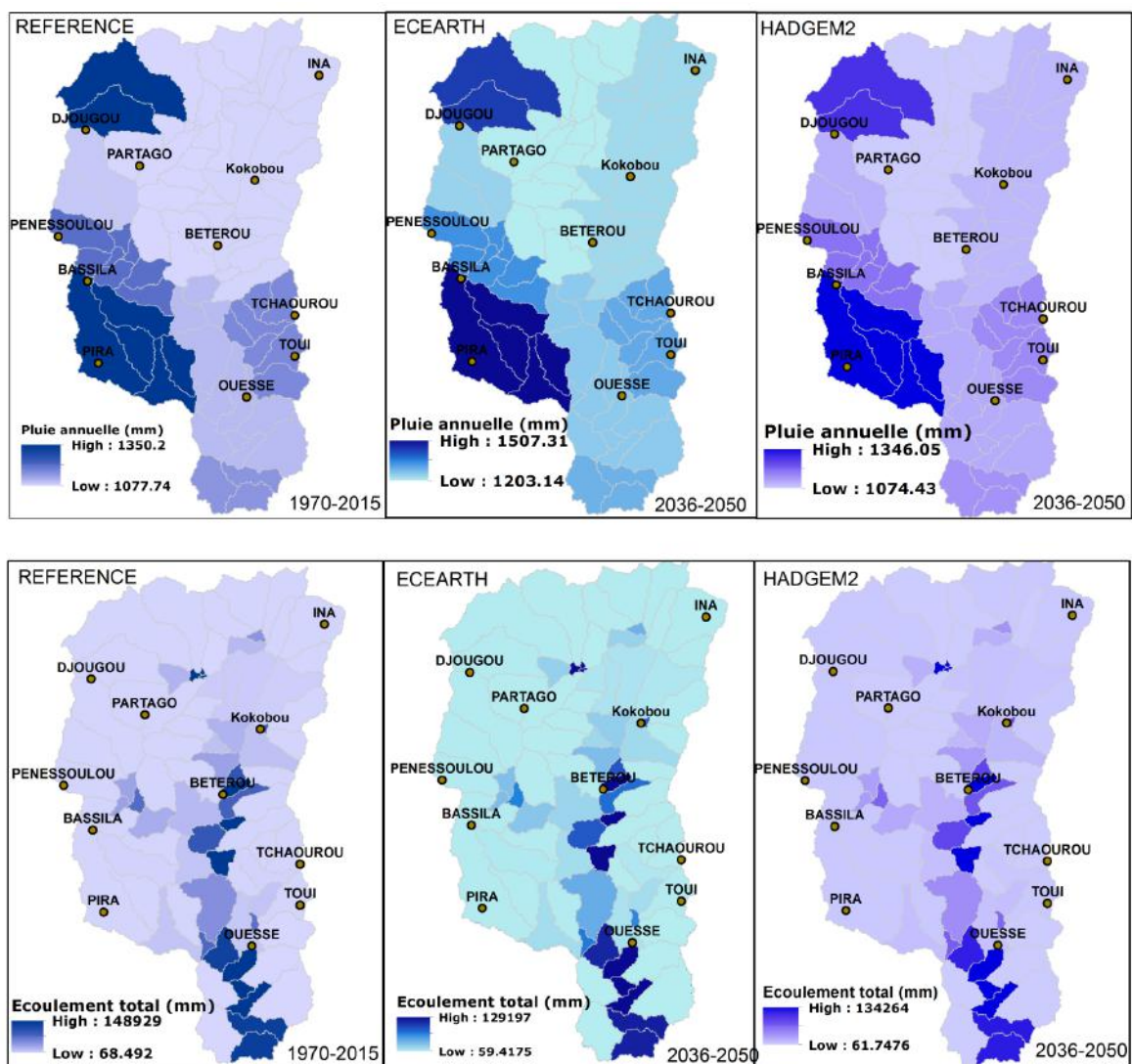


Figure 29: Impact des scénarios climatiques sur les précipitations et les écoulements à l'horizon 2050



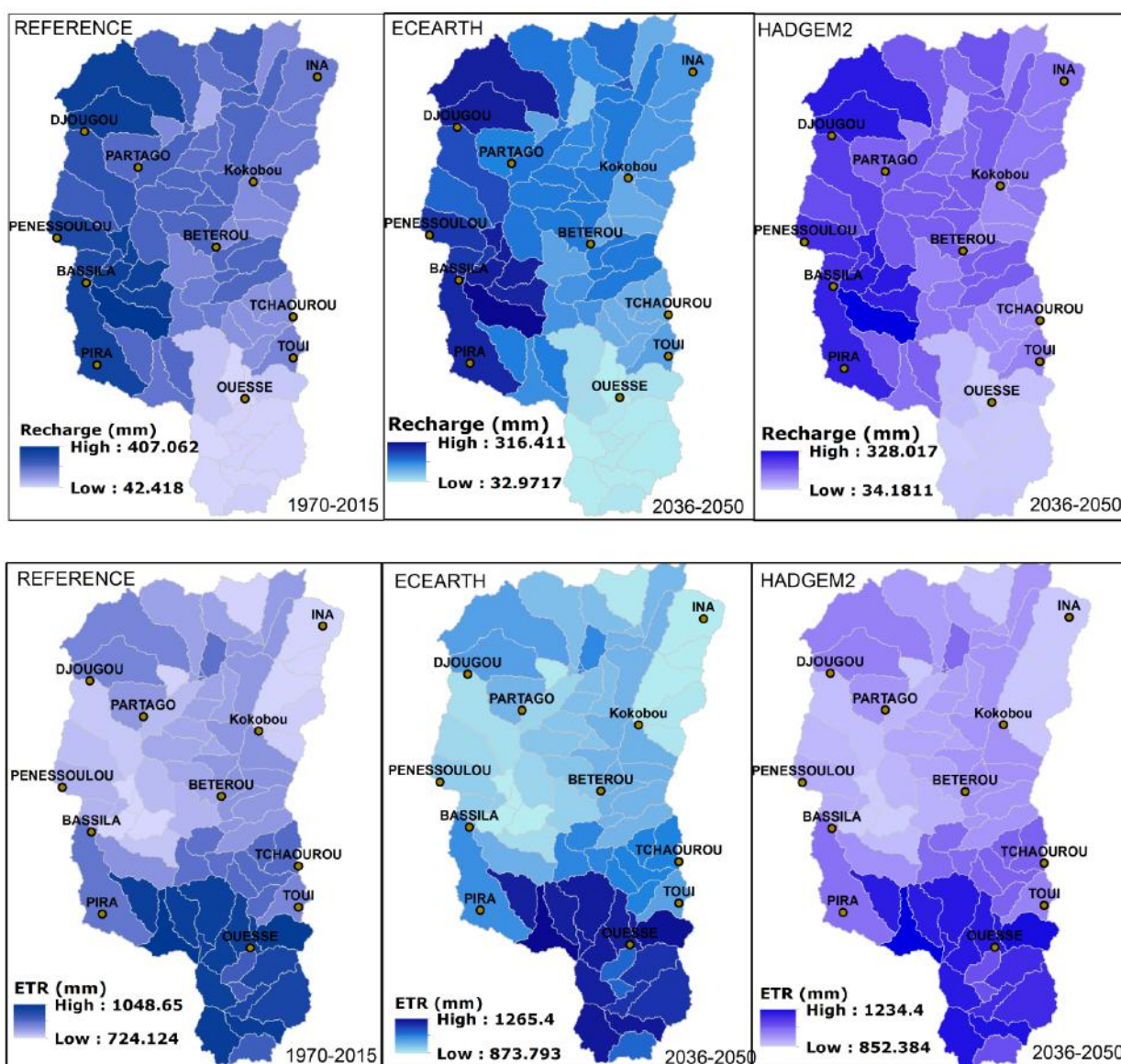


Figure 30: Impact des scénarios climatiques sur la recharge et l'ETR à l'horizon 2035

Les valeurs normalisées puis agrégées des indicateurs d'exposition sont représentées à la Figure 31 à partir des deux modèles climatiques. Dans le cas présent, plus l'indice d'exposition d'un bassin est grand, plus il est exposé. L'ouest du bassin (Djougou, Pénésoulou, Bassila, Pira) ainsi que le sud (Ouessè, Savè) apparaissent comme les parties les moins exposées contrairement à l'est du bassin (Tchaourou, Toui).

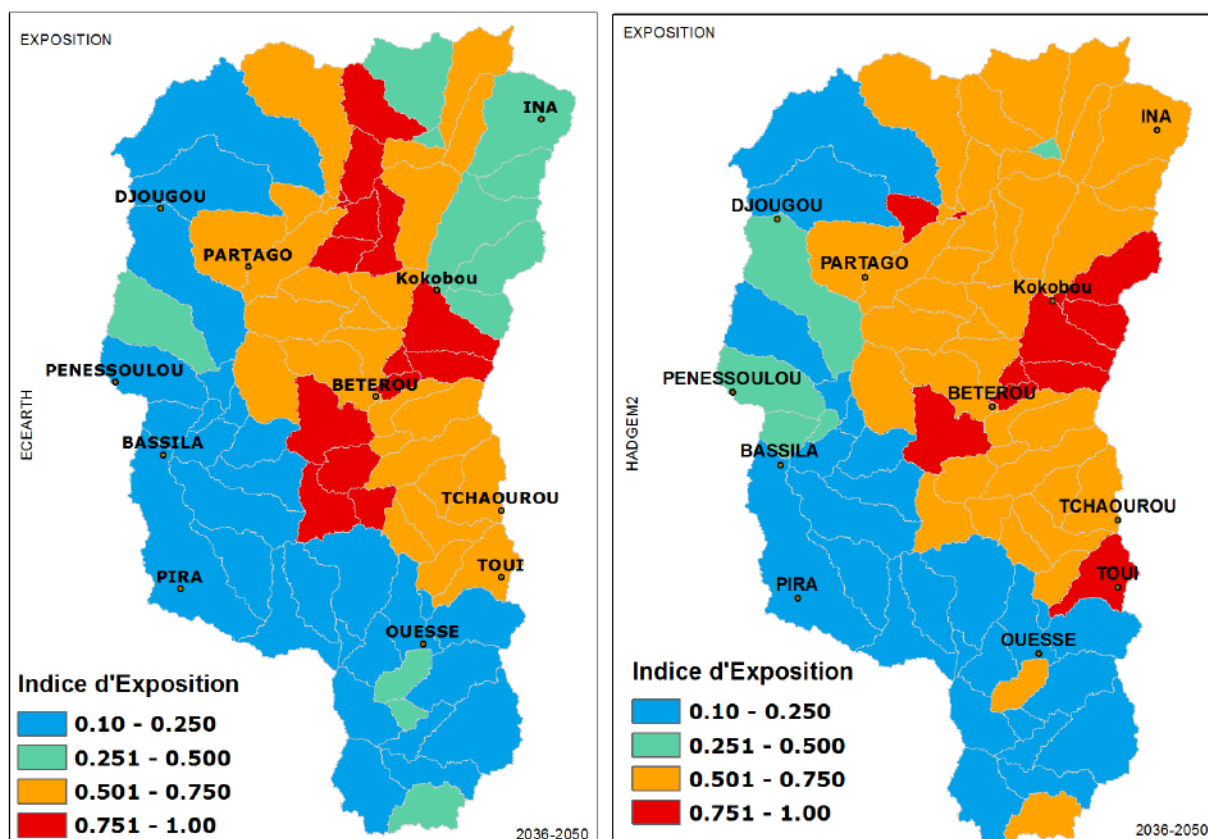


Figure 31: Valeur normalisée de la composante exposition issue des modèles climatiques ECEARTH et HADGEM2

#### ▪ *Sensibilité*

Certains indicateurs de la sensibilité tels que la densité de la population et l'occupation des terres varient dans le temps (mais aussi dans l'espace), et une nouvelle quantification de ces indicateurs pour la période 2035-2050 devrait être faite. Cependant, pour déduire exclusivement l'impact du climat futur sur le secteur considéré, les indicateurs de la sensibilité ont été considérés invariants.

#### ▪ *Impact du climat futur sur le secteur*

La Figure 32 montre le niveau d'impact potentiel futur des changements climatiques sur les ressources en eau dans les sous bassins de l'Ouémé à Savè suivant les sorties des deux modèles climatiques ECEARTH et HADGEM2. La plupart de ces indices sont supérieurs à 0.5 indiquant des impacts potentiels assez élevés sur les ressources en eau. Les plus grands impacts s'observeront à l'ouest du bassin versant.

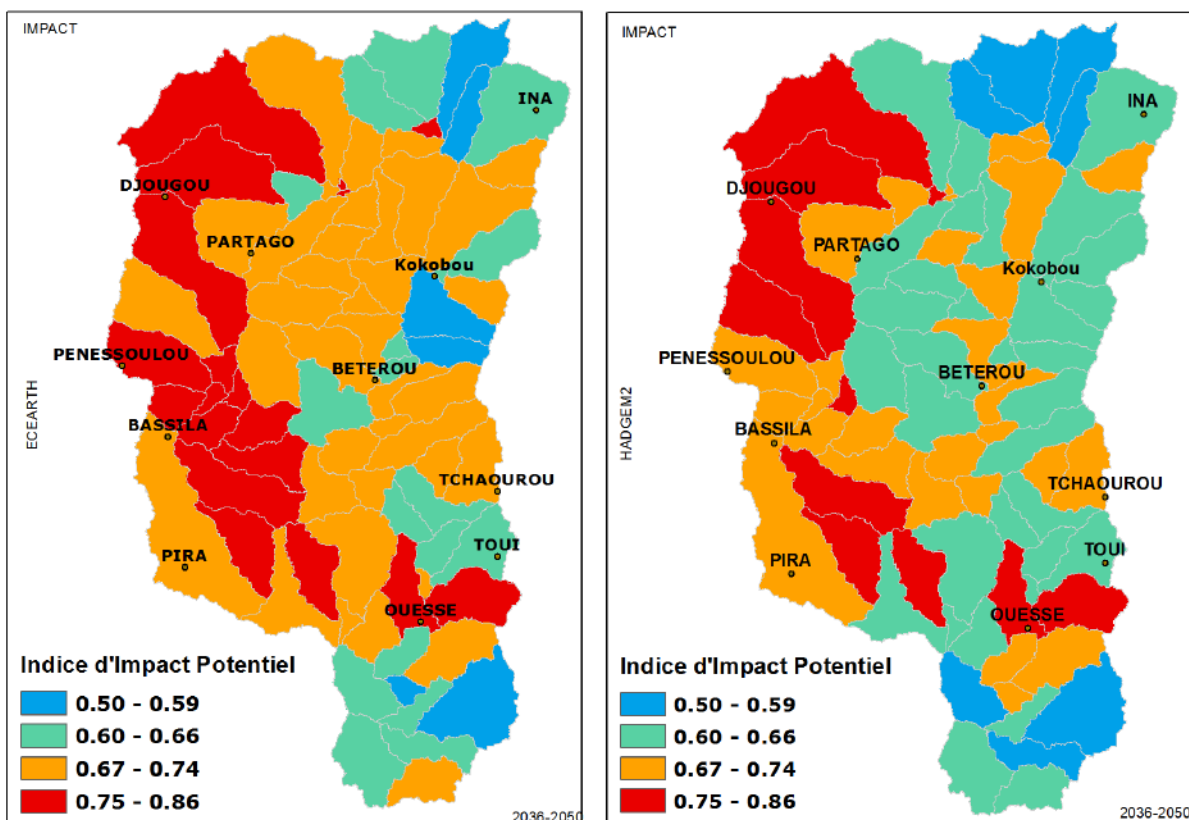


Figure 32: Niveau d'impact potentiel futur des changements climatiques sur les ressources en eau dans les sous bassins de l'Ouémé à Savè

### 3.2.2.1 *Evaluation de la vulnérabilité future*

La Figure 33 indique les indices de vulnérabilité future des sous bassins du bassin de l'Ouémé à Savè aux impacts négatifs des changements climatiques sur les ressources en eau suivant les sorties des modèles climatiques ECEARTH et HADGEM2. Tous les indices sont supérieurs à 0,5 indiquant un niveau assez élevé de vulnérabilité future calculée à partir des deux modèles climatiques. Ces grandes valeurs sont réparties sur l'ensemble du bassin. Le nord-ouest du bassin ainsi que le Sud-Est apparaissent comme les plus potentiellement vulnérables.

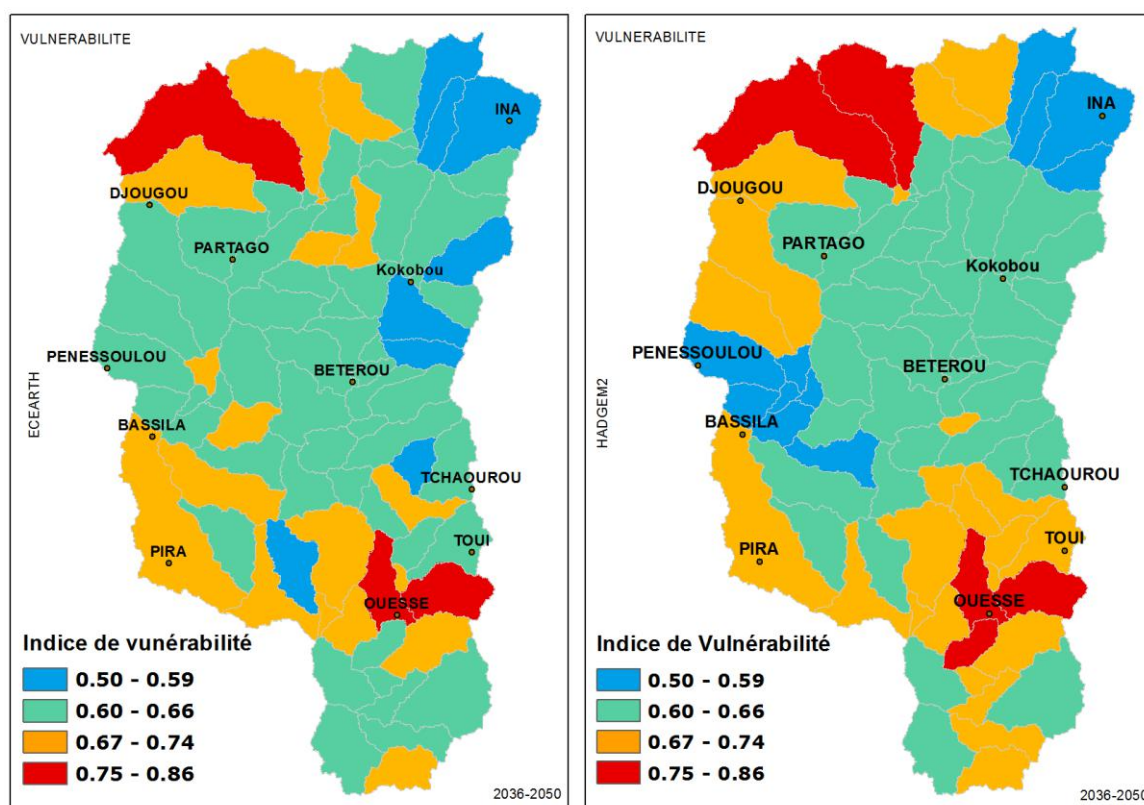


Figure 33: Indice de vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques sur le bassin de l'Ouémé à Bonou

## 4 Analyse des options d'adaptation et de la vulnérabilité actuelle et future du secteur de l'eau au Bénin

Les options visent à la fois à faire face aux inondations et à la pénurie d'eau.

### 4.1 Stratégies et mesures d'adaptation à la récurrence des inondations

En gardant les indicateurs pour la sensibilité et la capacité d'adaptation constants, la vulnérabilité future sera plus élevée. Le pourcentage de variation entre la vulnérabilité future pour la période 2035-2050 et celle de la période historique (1970-2015) est positif pour une grande partie du bassin indiquant une augmentation de la vulnérabilité (Figure 20). La plus grande augmentation de vulnérabilité s'observe au niveau des communes de N'Dali, Tchaourou, Glazoué, Dassa Zoumè et Savè entre autres. Une réduction probable de la vulnérabilité future pour les arrondissements situés à l'extrême sud et au sud-ouest du bassin ainsi que pour certains arrondissements de Bassila a été projetée.

Une analyse des indicateurs de capacité d'adaptation révèle que les options d'adaptation actuelles sont très faibles, conduisant à une vulnérabilité élevée quand bien même les impacts potentiels soient d'une moindre échelle. Ainsi donc, une amélioration du cadre d'adaptation réduirait de manière significative la vulnérabilité des populations et de biens aux inondations dans un contexte des changements climatiques.

Les mesures d'adaptation possibles à la recrudescence probable des inondations dans le futur peuvent être envisagées à plusieurs échelles. Il s'agit entre autres des options d'adaptation au niveau individuel (famille ou ménage), des infrastructures et de l'aménagement, institutionnel (Langis, 2013).

#### **Sur le plan individuel, il s'agira de la promotion des options d'adaptation telles que :**

- le choix des techniques de construction visant à réduire les dommages en installant les bâtiments sur des pilotis et assurant l'élévation des habitations qui sont particulièrement à risque d'être inondées et le déménagement des maisons, voire des agglomérations, les plus à risque d'inondations sur des terres plus élevées (avec un appui financier public éventuel);
- un choix judicieux de pratiques agricoles et d'élevage favorisant le maintien d'un couvert végétal sur les sols, intégrant des pratiques antiérosives et d'infiltration des eaux ainsi que des pratiques de conservation et de gestion économe des eaux, etc. ;
- la disponibilité de l'information climatique (prévisions météorologiques).

#### **En ce qui concerne les infrastructures, il faut :**

- améliorer le système de gestion des eaux de pluie de façon à pouvoir gérer les crues d'eau lors des inondations ;
- développer et élargir les systèmes d'évacuation des eaux de pluie et eaux usées afin d'augmenter la capacité de drainage ;



- Prioriser les zones vulnérables aux changements climatiques identifiées dans cette étude pour des actions urgentes d'adaptation ;
- évaluer la résistance des infrastructures aux phénomènes extrêmes ;
- Incorporer l'adaptation dans la planification, l'entretien et le remplacement des infrastructures nouvelles ou existantes ;
- Définir et vulgariser de nouvelles normes de dimensionnement et de construction qui intègrent les impacts des changements climatiques ;
- cartographier les zones les plus à risques en se basant sur les endroits où des inondations se sont déjà produites et déterminer les causes de ces inondations (mauvais entretien, manque de capacité de drainage...).

**Sur le plan institutionnel**, les actions suivantes contribueront au renforcement de la résilience des populations aux inondations :

- l'élaboration des plans de gestion des urgences et des politiques d'atténuation locale puis des programmes de formation sur les moyens de se préparer aux urgences ;
- le soutien financier gouvernemental pour des recherches sur le cycle de gestion des catastrophes ;
- le renforcement du système d'alerte précoce en cas d'événements extrêmes par la mise à disposition des moyens tant financiers qu'humain ;
- la révision des normes et critères de conception des ouvrages d'assainissement ;
- l'Interdiction de nouveaux travaux de construction dans les plaines inondables pour réduire les dommages dus à l'inondation ;
- l'établissement d'un comité permanent composé du conseil municipal et des représentants des Organisations de la Société Civile (OSC) citoyens pour traiter des questions d'adaptation aux changements climatiques.

#### 4.2 Stratégies et mesures d'adaptation à la pénurie probable d'eau

La gestion ou la valorisation durable des ressources en eau nécessite la mise en œuvre d'actions concrètes allant dans le sens d'élaboration des documents ou guides d'orientations stratégiques ou axes d'intervention, aussi bien que la mise en œuvre de politiques visant la sauvegarde et la protection des ressources en eau.

Pour que le secteur des ressources en eau s'adapte au mieux pour faire face aux défis des changements climatiques, il faut aider les populations vulnérables à accroître leur résilience face aux risques climatiques et les orientations sur les principaux éléments à prendre en compte pour la planification et la mise en œuvre des actions dans le secteur, figurent au rang des principales préoccupations en matière de stratégies d'adaptation. A cela s'ajoute la question relative à la valorisation de l'eau dont le rôle le plus important se trouve dans la gestion de la demande et une meilleure allocation entre les utilisations.

Il se dégage pour ce secteur trois (3) options d'adaptation :



Option 1 : Gestion et développement de l'offre et de la demande en eau

- Amélioration des systèmes d'approvisionnement en eau potable ;
- Promotion des technologies et pratiques d'économie de l'eau ;
- Accroissement de la capacité de stockage (naturelle et artificielle) des eaux de surface et des eaux souterraines ;
- Réhabilitation des barrages/retenues d'eau existante pour améliorer leur capacité de stockage et la construction de nouveaux barrages ou autre retenue d'eau de surface.

Option 2 : Protection durable des ressources en eau

- Promotion de la gestion intégrée et participative des ressources en eau ;
- Restauration et la sauvegarde des forêts galeries. En effet, la GIRE implique la mise en défense de la couverture végétale dans le bassin versant pour limiter le ruissellement et accélérer l'infiltration qui recharge les nappes souterraines.

Option 3 : Valorisation des ressources en eau :

- Installation d'infrastructures pour le stockage et traitement des eaux usées ;
- Stockage et réallocation des eaux pluviales à des fins multiples ;
- Réévaluation des ressources en eau (superficielles et souterraines) du bassin ; et
- Renforcement des capacités des structures techniques en charge de la gestion des ressources en eau comme l'ABO (Autorité du Bassin de l'Ouémé)

## 5 Conclusions et recommandations

La présente étude vise d'une part à déterminer le niveau de la vulnérabilité historique et présente et celui de la vulnérabilité future aux risques d'inondation dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou ; et d'autre part à évaluer le niveau de la vulnérabilité historique et présente et celui de la vulnérabilité future aux pénuries d'eau dans le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Savè (essentiel pour une bonne application de la GIRE) et à faire des recommandations afin de renforcer la résilience des populations.

Les résultats indiquent que le bassin de l'Ouémé est très vulnérable aux impacts néfastes des changements climatiques aussi bien par rapport à la pénurie d'eau qu'aux inondations. La partie nord du bassin (Djougou, Ndali, Pèrèrè...) est la plus vulnérable aux inondations mais aussi à la pénurie probable en ressources en eau. Cette vulnérabilité provient en particulier de la faible capacité d'adaptation des populations. N'ayant pas une grande marge de manœuvre en ce qui concerne les impacts potentiels, l'effort doit être concentré sur le renforcement des capacités d'adaptation des populations à travers des options d'adaptation réalistes qui contribueraient à renforcer leur résilience. Les mesures d'adaptation permettent soit de réduire la sensibilité soit d'augmenter la capacité adaptative du système étudié. Ainsi donc, nous suggérons d'une part de :

- développer des produits d'assurance aux risques d'inondations (exploitations agricoles, bétail, infrastructures, individuel, habitation, etc) en se basant sur la cartographie de la vulnérabilité ;
- développer des applications d'information et d'alerte pour les risques d'inondations ;
- organiser des expérimentations participatives et formations continues sur la gestion durable des terres ;
- restaurer les forêts ripicoles de la zone de l'étude.

D'autre part de :

- mobiliser les ressources pour réaliser les barrages structurants notamment ceux de Bétérou et de Vossa et les petits barrages prévus pour le bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Savè
- améliorer la capacité institutionnelle de gestion des ressources avec le Comité Interministériel de l'eau (CIE) et l'Agence du Bassin de l'Ouémé (ABO). Il faudrait notamment passer à la mise en œuvre des réglementations, le PANGIRE étant une base pour y parvenir. Cependant, il est à noter que la création de l'ANAEPMR chargé de la réhabilitation et de construction de nouvelles adductions d'eau villageoise sans l'implication de la DG-Eau (structure chargée de la GIRE) et des mairies (bénéficiaires) pourrait ne pas favoriser la bonne gestion des AEVs ;
- améliorer la capacité d'investissement des populations les plus vulnérables et leur aptitude à rebondir après une crise via des mécanismes adaptés de financement ( crédits bonifiés par exemple, des assurances « catastrophes climatiques »);
- organiser des formations sur les techniques d'irrigation efficiente en eau.

## 6 Références

- Afouda, A., Alamou, A.E., Dovonou, F., Ouikotan, B., Medenou, A., Savy, A.C., 2014. Conception de modèles simplifiés de prévision et la détermination des seuils et niveaux d'alerte relatifs aux inondations au Bénin, Rapport définitif. Cotonou, Bénin.
- Alimi, R.M., Gbedomon, R.C., Bekpa-Kinhou, A.M., Biao, C., Egboou, P.B., 2015. Gestion concertée de l'espace de production dans la basse et la moyenne vallée de l'Ouémé pour le développement de l'agropastoralisme : Etude de base pour la formulation de projet sur l'élevage transhumant dans la basse et la moyenne vallée de l'Ouémé (co).
- ANOPER, 2014. Association Nationale des Organisations Professionnelles d'Éleveurs de Ruminants du Bénin. La Situation actuelle de l'élevage et des éleveurs de ruminants au Bénin, Analyses et perspectives. Cotonou, Bénin.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34, 73–89.
- Badou, D.F., Afouda, A.A., Diekkrüger, B., Kapangaziwiri, E., 2015. Investigation on the 1970s and 1980s drought in four tributaries of the Niger River Basin (West Africa), in: E-Proceedings of the 36th IAHR World Congress 28 June – 3 July, 2015, The Hague, the Netherlands. IAHR, pp. 1–5.
- Bossa, A., Diekkrüger, B., Agbossou, E., 2014. Scenario-Based Impacts of Land Use and Climate Change on Land and Water Degradation from the Meso to Regional Scale. *Water* 6, 3152–3181. doi:10.3390/w6103152
- Chen, J., Brissette, F.P., Chaumont, D., Braun, M., 2013. Performance and uncertainty evaluation of empirical downscaling methods in quantifying the climate change impacts on hydrology over two North American river basins. *J. Hydrol.* 479, 200–214. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.11.062
- Chen, J., Brissette, F.P., Leconte, R., 2011. Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *J. Hydrol.* 401, 190–202. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.02.020
- Deng, Z., 2007. Vegetation Dynamics in Oueme Basin, Benin, West Africa. Cuvillier Verlag, 156 p, Göttingen, Germany.
- EM-DAT, 2017. The Emergency Events Database - Université catholique de Louvain (UCL) - CRED, D. Guha-Sapir, Brussels, Belgium [WWW Document]. URL [www.emdat.be](http://www.emdat.be) (accessed 10.2.17).
- Francois, B., Essou, G., 2013. Climate Change Impacts on the Ouémé River, Benin, West Africa. *J. Earth Sci. Clim. Change* 4, 2–11. doi:10.4172/2157-7617.1000161
- Gouvernement de la République du Bénin, 2011. Inondations au Bénin, Rapport d'Évaluation des Besoins Post-Catastrophe. Cotonou, Bénin.
- Houngpè, J., Diekkrüger, B., Badou, D., Afouda, A., 2015. Non-Stationary Flood Frequency Analysis in the Ouémé River Basin, Benin Republic. *Hydrology* 2, 210–229. doi:10.3390/hydrology2040210
- IGIP-AFRIQUE, 2017. Plan directeur de développement du sous-secteur de l'approvisionnement en eau potable en milieu rural du Bénin. Cotonou, Bénin.
- INSAE, 2015. Institut National de Statistiques et de l'Analyse Économique. Tendances de la pauvreté au Bénin 2007-2015. Cotonou, Bénin.
- INSAE, 2016. Cahier des villages et quartiers de ville du département du Borgou (RGPH-4, 2013) 29.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, 996 p, New York, NY, USA.
- Kerstin, F., Schneiderbauer, S., Bubeck, P., Kienberger, S., Buth, M., Zebisch, M., Kahlenborn, W., 2014.

- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. The Vulnerability Sourcebook Concept and guidelines for standardised vulnerability assessments. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, Bonn and Eschborn, Germany.
- Langis, J., 2013. Mesures d'adaptation aux inondations, aux ondes de tempête et à l'élévation du niveau de la mer.
- Le Barbé, L., Alé, G., Millet, B., Texier, H., Borel, Y., Gualde, R., 1993. Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin.
- Lebel, T., Ali, A., 2009. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime ( 1990 – 2007 ). J. Hydrol. 375, 52–64. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.11.030
- Ministère de l'Environnement, de l'Habitat et de l'Urbanisme, 2011. Deuxième Communication Nationale de la République du Bénin sur les Changements Climatiques. Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature. Cotonou, Benin.
- Nicholson, E.S., 2001. Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries. Clim. Res. 17, 123–144.
- Parry, M., 2007. Bilan 2007 des changements climatiques Conséquences , adaptation et vulnérabilité Résumé à l ' intention des décideurs Bilan 2007 des changements climatiques Conséquences , adaptation et vulnérabilité.
- SAP-BENIN, 2015. Détermination des seuils et niveaux d'alerte relatifs au risque d'inondation pluviale au benin. Rapport.
- Tossou, J., Hermans, T., Orban, P., Dovonon, L., Boukari, M., Brouyère, S., 2017. Proposition d'un support d'aide à la décision pour l'amélioration de l'accès à une eau souterraine de meilleure qualité dans un contexte de contamination géogénique au fluorure au Bénin (Afrique de l'ouest). Rev. Int. Géologie, Géographie d'Ecologies Trop.
- Yue, S., Pilon, P., Cavadias, G., 2002. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. J. Hydrol. 259, 254–271. doi:10.1016/S0022-1694(01)00594-7
- Zannou, A.B., 2013. Systèmes d'alerte aux inondations au Benin, Oral presentation, Séminaire-Atelier "Ressources en Eau et aAdaptation aux Changements Climatiques", 10-11 December 2013.

## 7 Annexes : Étude préliminaire des variables hydroclimatiques

### - Pluviométrie moyenne annuelle dans le bassin de l'Ouémé à Savè

Au Bénin en général et plus précisément dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Savè, les ressources en eau sont renouvelées chaque année par des précipitations. L'analyse des apports pluviométriques annuels dans le bassin de l'Ouémé à Savè montre que sur la période de 1970 à 2015, les valeurs moyennes annuelles varient de 1006 mm à Toui à 1324 mm à Séméré. Cependant, il n'y a pas une très grande différence entre les pluies moyennes annuelles des différentes stations à part quelques petites exceptions. Les différences de cumul moyen annuel entre stations excèdent rarement les 150 mm. La Figure 14 montre également une faible variation spatiale de la pluie dans le bassin. Cela se traduit par un faible écart entre les moyennes de pluie annuelles reçues au niveau des différentes stations pluviométriques. Quelques valeurs exceptionnelles. L'amplitude qui est la différence entre les valeurs minimales et maximales d'une série est presque similaire pour l'ensemble des stations indiquant ainsi une répartition similaire de la variabilité pluviométrique dans le bassin de l'Ouémé à Savè.

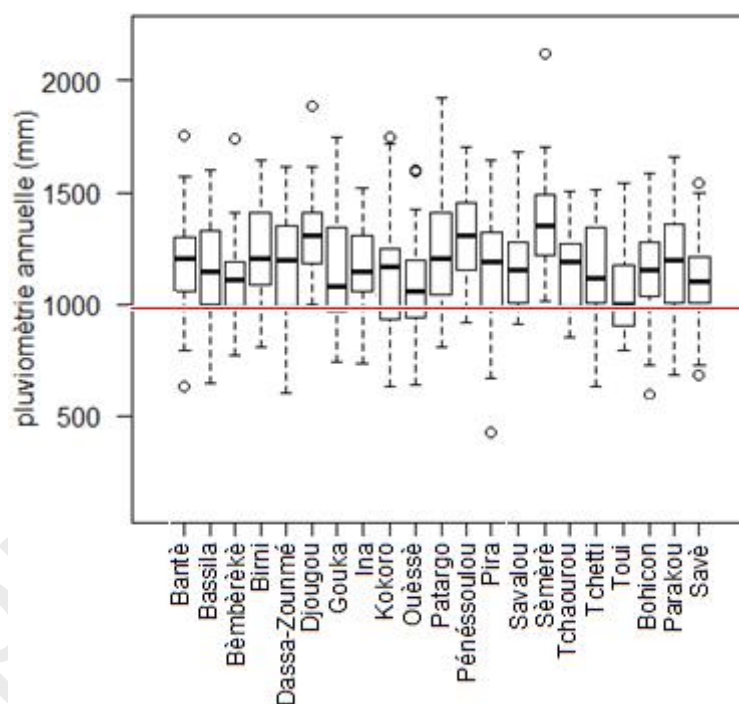


Figure 34: Variation des précipitations annuelles dans le bassin de l'Ouémé à Savè sur la période de 1970 à 2015)

### - Tendance des pluies annuelles

Le bassin de l'Ouémé à Savè connaît, comme l'ensemble du Bénin et de la sous-région ouest africaine, des variations interannuelles des précipitations. La Figure 35 présente la variabilité interannuelle des précipitations et les tendances associées pour quelques stations. Cette figure montre une tendance à l'augmentation des pluies annuelles sur la période 1970-2015 pour l'ensemble des stations considérées, mais cette augmentation n'est pas statistiquement significative au seuil de 5 %. Ce qui

veut dire que les pluies moyennes annuelles dans le bassin de l'Ouémé connaissent de légers accroissements qui ne sont pas aussi importants.

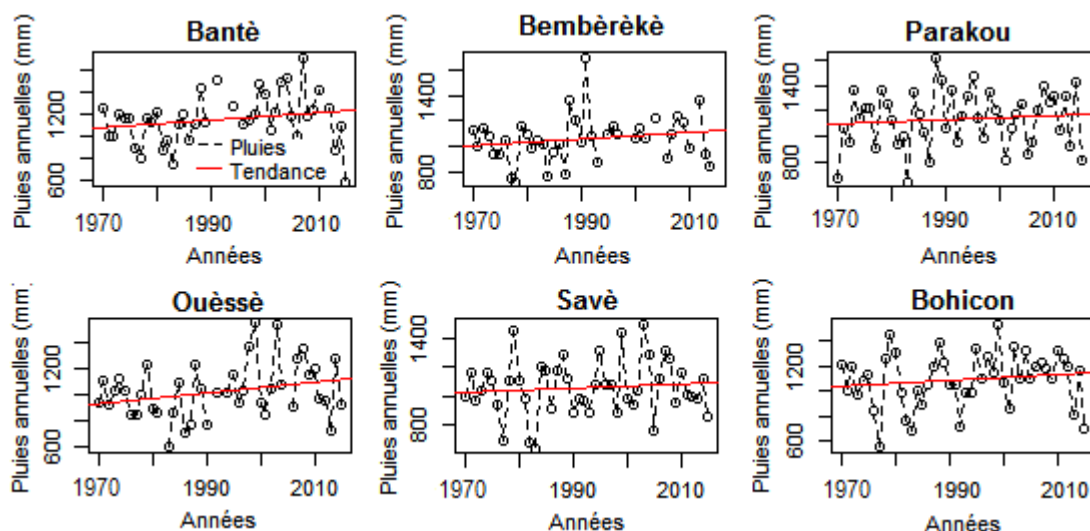


Figure 35: Tendence des pluies annuelles au niveau de quelques stations sur la période 1970-2015

#### - Les apports d'eau mensuels

L'analyse des précipitations mensuelles, pour cette version préliminaire a été faite à partir des données pluviométriques de trois stations synoptiques qui sont proches ou à l'intérieure du bassin (Bohicon, Parakou et Savé) qui présentent les séries les plus complètes de données sans lacune. La Figure 36 donne les statistiques des pluies mensuelles (maximum, minimum, quartile supérieur (75 %), inférieur (25 %) et médian (50 %)). Cette figure montre que les mois de novembre, décembre, janvier et février sont quasiment secs alors que les mois les plus pluvieux vont de juin à septembre pour l'ensemble de ces stations, avec le mois de juillet présentant en moyenne le volume d'eau précipitée le plus important, sauf pour Parakou où le pic de la pluie se situe au mois d'août. Cette analyse montre que la période la plus sensible en matière de disponibilité de la ressource en eau dans le bassin de l'Ouémé à Savé est la période de novembre à février.

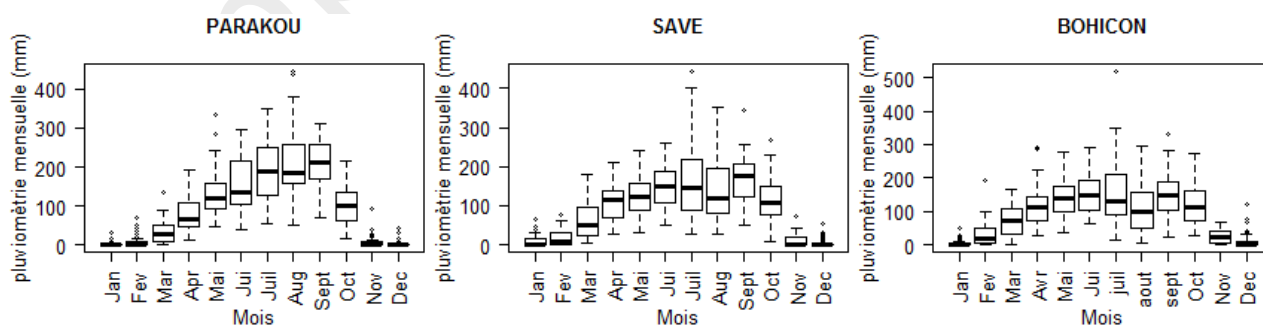


Figure 36: Variation des pluies mensuelles au niveau des stations synoptiques du bassin de l'Ouémé à Savé (Période de 1970 – 2015)



- **Températures maximales et minimales moyennes annuelles dans le bassin de l'Ouémé à Savè**

La Figure 37 présente les variations des températures maximales moyennes annuelles et température minimales moyennes annuelles sur la période de 1970 à 2015. L'analyse des graphiques indique une tendance à la hausse significative au seuil de 5 % ( $p$ -value < 0.001 pour toutes les stations en considérant le test de Mann Kendall) aussi bien des températures maximales que des températures minimales. Ce qui traduit que le bassin de l'Ouémé à Savè n'est pas épargné du réchauffement climatique. Il ressort aussi que les températures minimales augmentent beaucoup plus rapidement que les températures maximales. A partir de ces graphiques nous pouvons dire que sur la période de 1970 à 2015, les températures maximales ont connu des accroissements d'environ +1°C et les températures minimales ont augmenté d'environ +2°C.

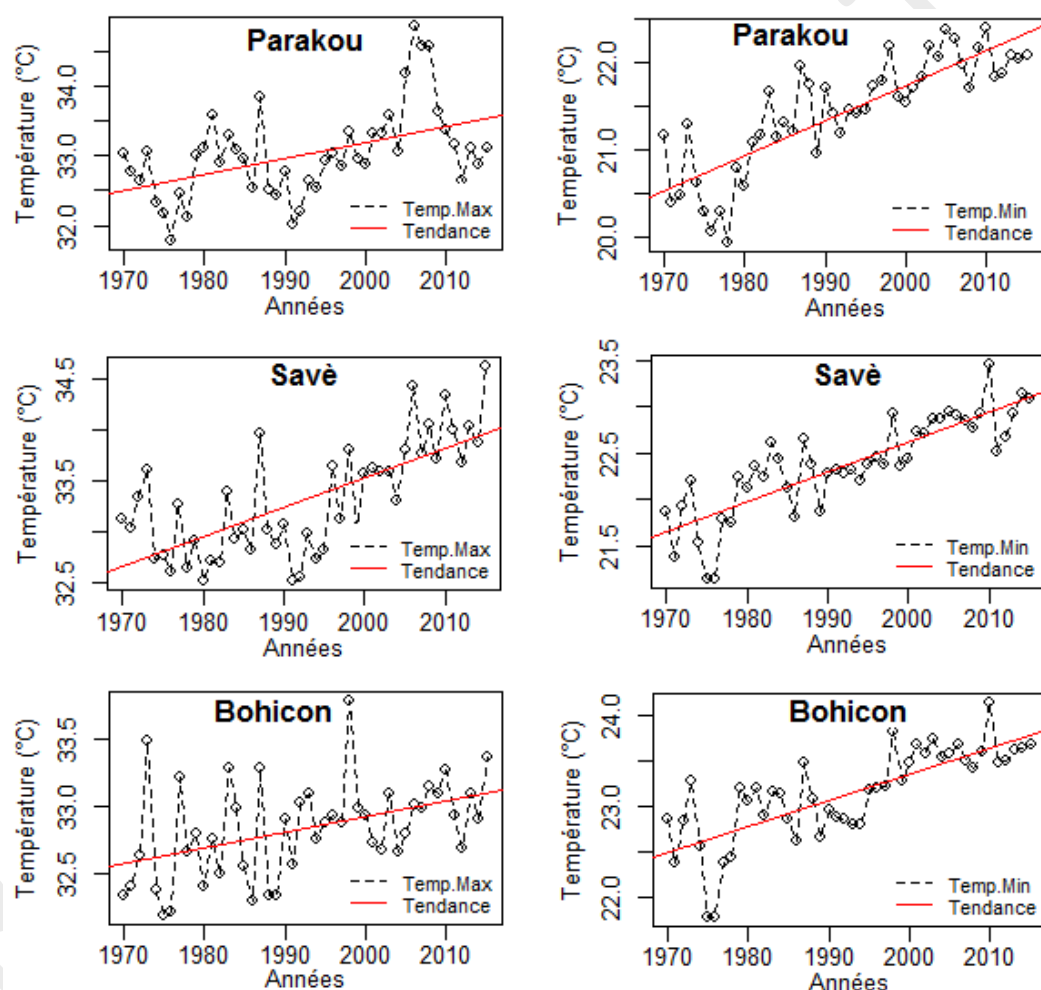


Figure 37: Variation des températures maximales et minimales moyennes annuelles au niveau des stations synoptiques du bassin de l'Ouémé à Savè (Période de 1970 – 2015)

- **Appréciation des variations des autres paramètres climatiques**

Les autres variables climatiques qui ont fait l'objet d'analyse sont l'humidité relative (maximale et minimale), la durée d'ensoleillement ou insolation et la vitesse moyenne du vent. Les analyses ont porté sur les moyennes annuelles de ces trois paramètres. Il faut signaler que ces données ne sont disponibles que sur les stations synoptiques à savoir Bohicon, Savè et Parakou.

L'analyse de tendance faite sur les moyennes annuelles de l'humidité relative (maximale et minimale) indique une tendance à la baisse significative au seuil de 5 % (Figure 38). Cependant, pour l'humidité relative minimale, elle présente une tendance à la hausse significative au seuil de 5 % pour les trois stations considérées, ce qui démontre que les augmentations des températures accentuent l'évaporation des ressources hydrique.

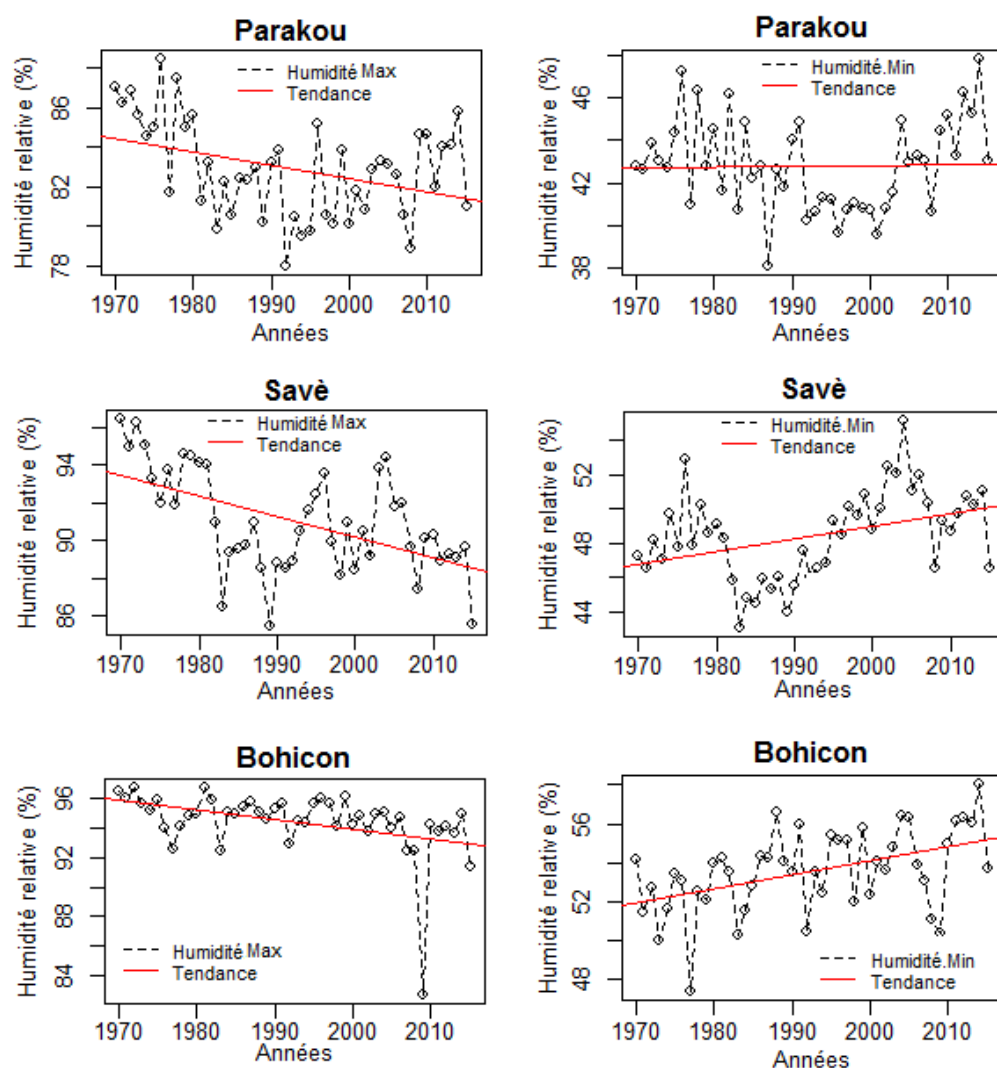


Figure 38: Variation des humidités relatives maximales et minimales moyennes annuelles au niveau des stations synoptiques du bassin de l'Ouémé à Savè (Période de 1970 – 2015)

Les durées d'insolation moyennes annuelles et les vitesses moyennes annuelles des vents ont aussi connu des variations sur la période de 1970 à 2015. L'analyse des graphiques de la Figure 38 montre que dans le bassin de l'Ouémé à Savè, les durées d'insolation et la vitesse des vents ont connu également des variations. En ce qui concerne les durées d'insolation, elles présentent une tendance à la baisse au niveau de la station de Parakou. Cependant au niveau des stations de Bohicon et de Savè, les durées d'insolation semblent avoir une tendance à la hausse mais qui n'est seulement significative qu'à la station de Savè. Quant à la vitesse du vent, elle a une tendance à la baisse sur l'ensemble des trois stations (Figure 39).

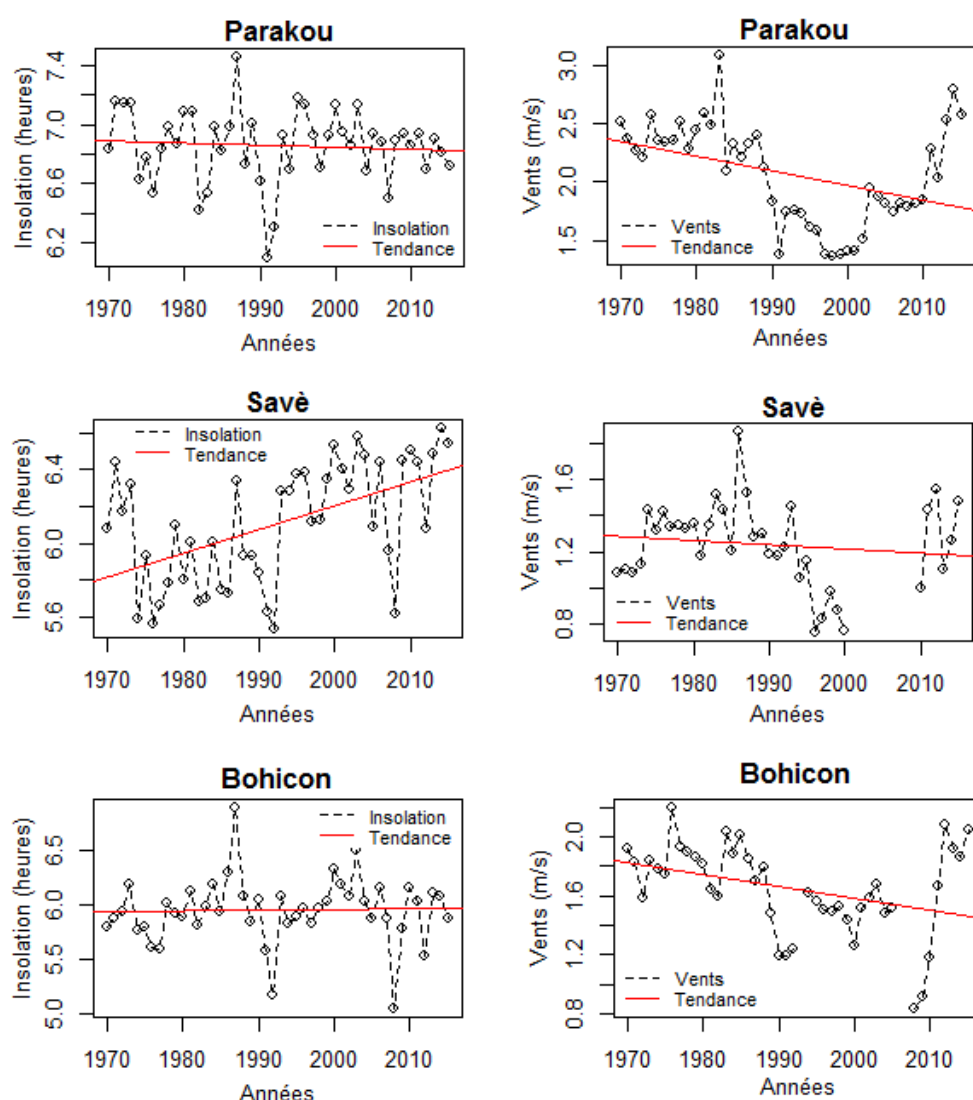


Figure 39: Variation de l'insolation et vitesse de vent moyens annuels au niveau des stations synoptiques du bassin de l'Ouémé à Savè (Période de 1970 – 2015)

En se référant à l'équation de l'ETP selon Penman ou la FAO, le pouvoir évaporant de l'air croît avec l'évolution de la température, il fait varier également le taux de saturation en eau de l'air. De ce fait, nous pouvons en conclure que, les variations à la hausse des températures, les variations de la durée d'insolation et de la vitesse du vent impactent le bilan d'eau. Une température élevée donne un air chaud, qui absorbe plus d'eau sous forme de vapeur. Ainsi, une augmentation de la température moyenne de 1°C entraîne une augmentation de l'ETP de 10%.

#### - Autres indicateurs d'exposition

Dans la présente étude, les paramètres d'exposition des ressources en eau qui ont fait l'objet d'analyse sont le ruissellement, la recharge et l'évapotranspiration réelle considérée comme la satisfaction des besoins en eau des plantes. Dans le bassin de l'Ouémé à Savè, les données historiques n'existent que sur les écoulements ou ruissellement, les deux autres paramètres sont estimés. L'analyse des débits moyens journaliers aux stations de Bétérou et d'Atchakpa (exutoire de Savè) montre que le module moyen journalier des écoulements à Savè est le double du module moyen

journalier observé à Bétérou pendant la période de hautes eaux. Il faut noter que le maximum des débits moyens journaliers est observé pratiquement à mi-septembre (Figure 40).

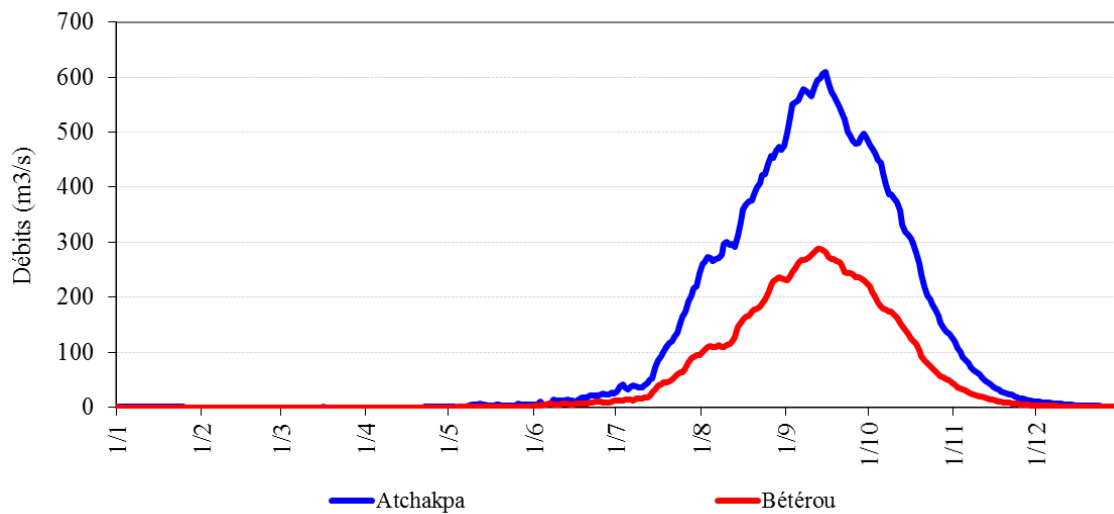


Figure 40: Débits moyens journaliers au niveau des stations de Bétérou et d'Atchakpa dans le bassin de l'Ouémé à Savè

De plus, l'analyse des Coefficients Mensuels de Débit (CMD) a permis de déterminer les périodes de hautes eaux et de basses eaux (Figure 41). Pour les deux stations hydrométriques, les hautes eaux (période où le CMD est supérieur à 1, ligne rouge sur les graphiques) durent 3 mois d'août à octobre, avec un maximum hydrologique en septembre, compte tenu du temps de transfert des sous-bassins versants. Les basses eaux s'étendent de novembre à juillet avec des débits presque nuls durant la période d'avril à mai. La période des hautes eaux correspond à la période durant laquelle le risque d'inondation devient important.

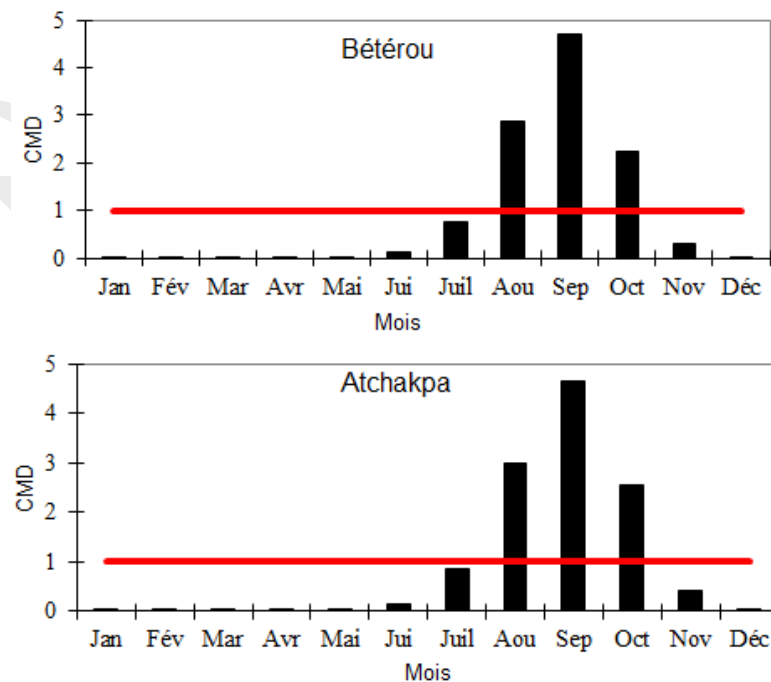


Figure 41: Coefficient Mensuel de Débit des principales stations hydrométriques du bassin de l'Ouémé à Savè

**Climate Analytics gGmbH**

Ritterstr. 3  
10969 Berlin  
Germany

T / +49 302 5922 9520  
E / [contact@climateanalytics.org](mailto:contact@climateanalytics.org)

**Climate Analytics Inc. New York**

115 E 23rd St, 3rd Floor, Office #319  
New York, NY, 10010  
USA

T / + 1 718 618 5847  
E / [info.ny@climateanalytics.org](mailto:info.ny@climateanalytics.org)

**Climate Analytics Lomé**

61, ru 195 Quartier Agbalépédogan  
s/c BP 81 555 Lomé  
Togo

T / +228 22 25 65 38 / 22 25 74 74  
E / [togooffice@climateanalytics.org](mailto:togooffice@climateanalytics.org)

Mis en oeuvre par :



Mandaté par :



de la République fédérale d'Allemagne

Sous la tutelle de :



Avec la coopération de :

