

Évaluation des Séquences des Types de Sècheresse par Indicateurs et par Echelles Spatiales et Temporelles dans le Bassin de l'Oueme à Beterou au Benin

[Evaluation of the Sequences of the Types of Drought by Indicators and by Spatial and Temporal Scales in the Basin of the Oueme at Beterou in Benin]

OGOUWALE Romaric

Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystème et Développement (LACEEDE)

Université d'Abomey-Calavi (République du Bénin)



Résumé – Le bassin versant de l'Ouémé à Bétérrou a connu une alternance de périodes humide et sèche. Et dans ce contexte climatique de plus en plus perturbé par les activités anthropiques, il est indispensable d'analyser les épisodes secs à diverses échelles temporelles, spatiales et par divers indices.

Pour atteindre cet objectif, des données climatologiques (hauteur de pluies journalières et mensuelles, températures, ETP) sur la période de 1965 à 2012 ont été collectées. Les données hydrologiques, constituées des débits journaliers du fleuve Ouémé à l'exutoire de Bétérrou, sur la période 1965-2012, sont extraites de la base de données de la DG-Eau.

Les résultats de l'analyse des indices de sécheresse indiquent que le bassin a enregistré différents degrés de sécheresse sur la période de 1965 à 2012. Le bassin a connu sur la période de 1965 à 1990 trois années très sèches (1981, 1982 et 1987) et une année proche de l'extrême sécheresse (1983). Ainsi, la période 1980 à 2000 a été la période de manifestation d'importants phénomènes de sécheresse avec l'année 1983 comme la plus sèche de toute l'histoire.

Les zones à risque de sécheresse sont réparties en trois niveaux et varient de faible au fort au niveau dans le bassin. Les secteurs à risque faible couvrent 25,55 % du territoire d'étude et correspondent aux abords immédiats des cours d'eau et aussi les localités à forte pluviométrie comme Copargo, Kouandé. Les zones à risque moyen couvrent 21,45 % du territoire et s'étendent principalement dans la partie centrale. Les milieux à fort risque occupent 53 % du territoire et concernent presque tous les secteurs du bassin.

Mots clés : Bétérrou, sécheresse, risques hydroclimatiques, indices

Abstract – The watershed from Ouémé to Bétérrou has alternated wet and dry periods. And in this climatic context increasingly disturbed by human activities, it is essential to analyze dry episodes at various time scales, spatial and by various indices.

To achieve this objective, climatological data (daily and monthly rainfall, temperature, FTE) over the period from 1965 to 2012 were collected. The hydrological data, consisting of daily flows from the Ouémé River to the outlet of Bétou, over the period 1965-2012, are extracted from the DG-Eau database.

The results of the analysis of the drought indices indicate that the basin recorded different degrees of drought over the period from 1965 to 2012. The basin experienced during the period from 1965 to 1990 three very dry years (1981, 1982 and 1987) and a year close to extreme drought (1983). Thus, the period 1980 to 2000 was the period of manifestation of important phenomena of drought with the year 1983 as the driest one in all the history.

Areas at risk of drought are divided into three levels and vary from low to high level in the basin. The low risk sectors cover 25.55% of the study area and correspond to the immediate surroundings of rivers and also high rainfall areas such as Copargo, Kouandé. Medium risk areas cover 21.45% of the territory and extend mainly in the central part. High risk environments occupy 53% of the territory and concern almost all sectors of the basin.

Keywords – Bénin, Bétérrou, drought, hydroclimatic risks, indices

I. INTRODUCTION

La variation climatique et ses conséquences sur les systèmes biologiques et les sociétés humaines posent aujourd'hui de sérieux problèmes de sécurité, particulièrement en Afrique, qui constitue le plus vulnérable des continents de la planète aux impacts des changements climatiques en raison des défis politiques, socio-économiques et démographiques auxquels elle fait face. Landsberg (1975), avait signifié que la sécheresse qui a frappé le sahel dans les années 1970 était sans précédente et déclare qu'elle doit être acceptée comme faisant partie du climat normal de l'Afrique de l'ouest. Ces périodes de sécheresses répétées sont causées par des glissements à grande échelle de la circulation atmosphérique générale (exemple d'El niño). La région ouest-africaine a connu une récession pluviométrique aux ampleurs parfois très accusées, doublée d'une augmentation significative du nombre d'années sèches. La situation est la même dans la région du Jucar où Aguilar *et al.* (1982), ont montré que le phénomène météorologique se manifeste le plus fréquemment et avec plus de violence, produisant de graves dégâts des infrastructures et des pertes en vies humaines.

La sécheresse est donc un phénomène naturel dangereux de caractère insidieux, qui résulte d'une insuffisance des précipitations par rapport aux valeurs prévues ou normales. Lorsqu'elle persiste durant une saison entière ou plus, cette insuffisance empêche de répondre comme il convient aux besoins des sociétés humaines et de l'environnement. Elle est donc une anomalie temporaire, à la différence de l'aridité, qui est une caractéristique permanente du climat (DGEau, 2015). Cependant, la sécheresse doit être considérée comme un état relatif plutôt qu'absolu, elle se produit aussi bien dans des zones à fortes précipitations que dans des zones à faibles précipitations, et sous presque tous les climats. Contrairement aux autres phénomènes naturels, la sécheresse ne constitue pas un danger instantané, c'est un phénomène à évolution lente. Un déficit de précipitation cumulé au cours du temps peut se

manifeste après quelques jours, quelques mois ou sur une longue période à savoir des années. Elle fait partie du climat, même si son étendue et son intensité varient à une échelle de temps saisonnière ou annuelle. Depuis la fin des années 1970, des perturbations climatiques sont intervenues au Bénin et se sont manifestées par une réduction d'amplitude annuelle moyenne des hauteurs totales de pluies et il a été aussi noté une intensification des sécheresses qui se sont produites pendant la même période, notamment dans les années 1970 et 1980 (Zannou, 2011). Les sécheresses peuvent être quantifiées en utilisant plusieurs indices de sécheresse hydrométéorologiques dont les plus populaires sont : l'indice Palmer (Palmer, 1965), l'indice de l'approvisionnement en eau de surface (Shafer et Edzman, 1982), l'indice standardisé de précipitation (McKee *et al.*, 1993), l'indice de sécheresse effective (Byun et Wilhite, 1999), l'indice de sécheresse des débits (Nalbantis et Tsakiris, 2009), l'indice hydrologique normalisé (Sharma et Panu, 2010). Chaque indice renferme ses propres forces et faiblesses (Mishra et Singh, 2010). Plusieurs indices ont été mis au point pour la caractérisation des sécheresses hydrologiques et exigent, en général, beaucoup de données et de calculs exigeants, contrairement aux indices de sécheresses météorologiques très simples et efficaces tels que l'indice standardisé de précipitation (Nalbantis et Tsakiris, 2009).

Dans un contexte climatique marquée par une éventuelle augmentation de l'occurrence et de l'impact des sécheresses dans les années à venir (Watson *et al.*, 1997), il est indispensable de pouvoir analyser les séquences de sécheresse en vue de proposer aux populations des mesures d'atténuation ou d'adaptation. C'est dans ce cadre que la présente étude a été initiée dans le bassin versant de l'ouémé à Bétérrou qui est sujet depuis plusieurs années à des déficits hydrométriques et pluviométriques a été initiée. Ce bassin versant de Bétérrou d'une superficie de 14 300 km² est situé au nord du Bénin et a pour coordonnées géographiques: les latitudes 9°30' et 10°00' au nord, et les longitudes 1°30' et 2°48' à l'est (Figure 1).

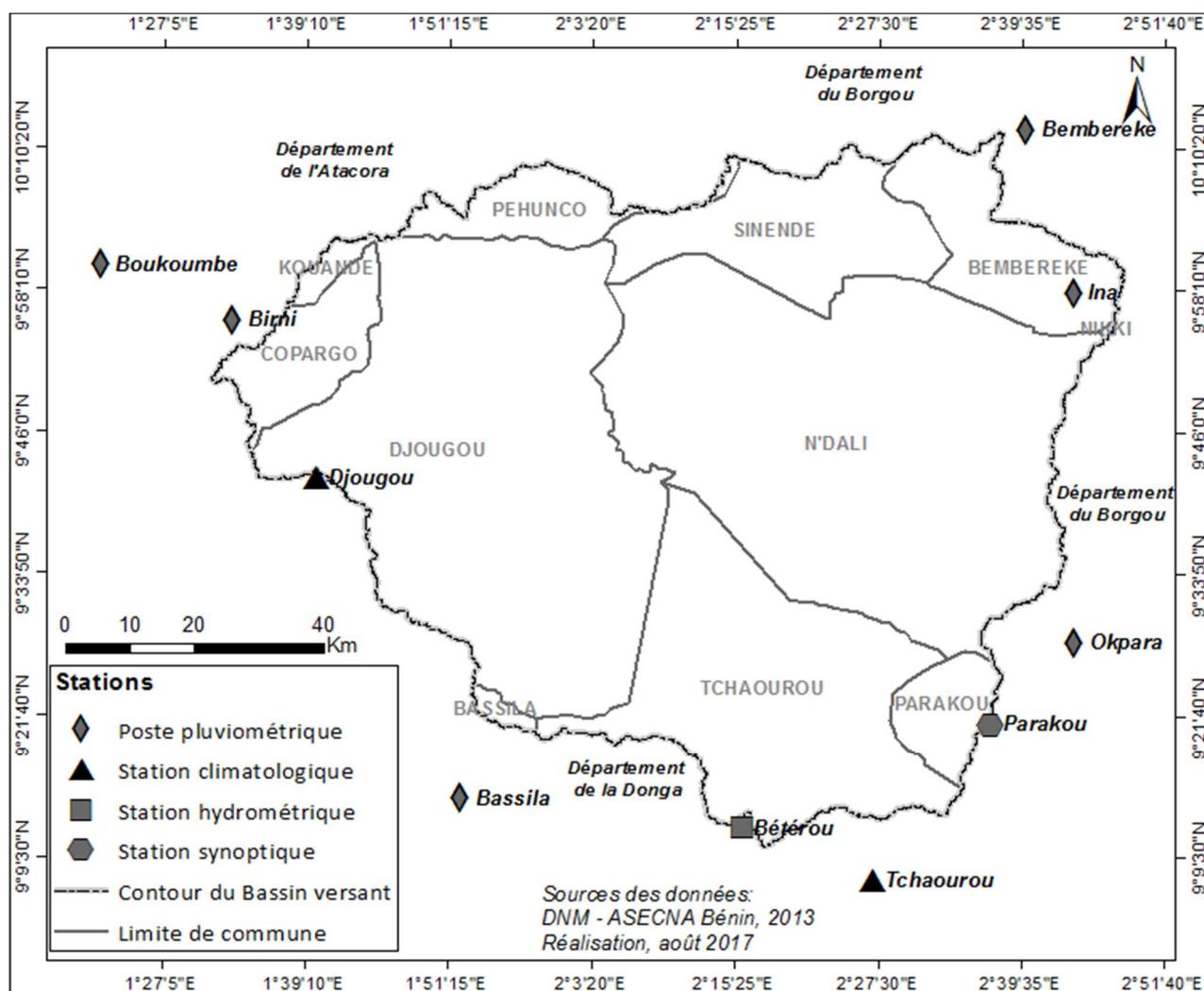


Figure 1: Situation géographique du bassin de l'Ouémé à Bétérrou

II. DONNEES ET METHODES

1.1. Données

Les données pluviométriques proviennent des stations et postes pluviométriques situées dans le bassin ou dans ses environnements très immédiats sur la période 1965-2012. Des données sur l'évapotranspiration potentielle (ETP) de la même période de même que celles des températures maximum et minimum (mensuelle), de la station synoptique de Parakou ont été recueillies à la Direction de la Météorologie Nationale (DMN). Les données hydrométriques sont des débits journaliers obtenues à la station de Bétérrou sur la période 1965-2012.

Les données vectorielles d'occupation du sol sont extraites de la base de données de l'IFN-2006 et actualisées à partir des images satellite (Images Landsat 8_OLI-TIRS,

2013 de 30 m de résolution ; Images GeoEye II, 2010-2012 de 0,5 m résolution).

Les données pédologiques, notamment la capacité de rétention en eau du sol ont été obtenues au Laboratoire des Sciences du Sol, Eau et Environnement (LSSEE). La capacité du champ dont une valeur approximative est donnée par l'humidité du sol à pF 2,8 est de 11 % en poids en surface ; elle est proche de 30 % en profondeur pour les horizons les plus argileux. Différents logiciels ou programmes ont été utilisés pour le traitement et le calcul de ces indices. Il s'agit notamment du logiciel « Drinc 1.5.73 » qui signifie Drought indices Calculator, il a permis de calculer les indices SPI (Indice de précipitation standardisé). Le programme « scPDSI (self calibrated Palmer DroughtSeverity Index) » a servi pour le calcul des indices PDSI (Indicateur de sécheresse sévère de Palmer), PHDI

(Indice de sécheresse hydrologique de Palmer) et l'indice Z de Palmer.

1.2. Méthodes

1.2.1. Méthode de caractérisation des types de sécheresse

L'analyse de la sécheresse revient en fait, à la prise en considération de sa durée ainsi que de sa sévérité, de son intensité et de son extension spatiale (Agrhab, 2004). Les indices utilisés dans cette étude sont l'Indice Standardisé de Précipitation (SPI), l'Indicateur de sécheresse sévère de Palmer (PDSI), l'indice Z de Palmer, l'indice de sécheresse hydrologique de Palmer.

1.2.1.1. Méthodes de la caractérisation de la sécheresse agricole

Les indicateurs de sécheresse agricole sont plus liés à l'humidité du sol qui est directement rattachée aux cultures.

➤ Z indice de Palmer ou Palmer Z-index

L'indice Z a été utilisé pour une analyse à grande échelle de la sécheresse par Dai *et al.*, (2004). Le tableau I présente les différentes classes de sécheresse selon l'indice Z.

Tableau I : Classification de l'indice Z

Indice Z	Classification
[0,49 ; -0,49]	Humidité presque normale
[-0,5 ; -0,99]	Début de sécheresse
[-1 ; -1,99]	Sécheresse peu prononcée
[-2 ; -2,99]	Sécheresse modérée
[-3 ; -3,99]	Sécheresse sévère
≤ -4	Sécheresse extrême

Source : (Dai *et al.*, 2004)

1.2.1.2. Indicateurs de la caractérisation de la sécheresse hydrologique

La sécheresse hydrologique se développe plus lentement, car il implique que l'eau stockée est épuisée, sans pouvoir se renouveler. L'indice de sécheresse hydrologique de Palmer (PHDI) a été utilisé.

➤ Indice de sécheresse hydrologique de Palmer (PHDI)

L'indice de sécheresse hydrologique de Palmer (PHDI) a été développé par Palmer (1965). Le PHDI est issu du calcul

du PDSI (Keyantash et Dracup, 2002; Cutore *et al.*, 2009). Le PHDI est une méthode d'identification de la sécheresse hydrologique basée sur les précipitations et l'évapotranspiration (Heim, 2002; Weber et Nkemdirim, 1998). Le tableau II présente les différentes classes de sécheresse selon l'indice PDHI.

Tableau II : Classification des valeurs du PDHI

PDHI valeurs	Classification
[0,49 ; -0,49]	Humidité presque normale
[-0,5 ; -0,99]	Début de sécheresse
[-1 ; -1,99]	Sécheresse peu prononcée
[-2 ; -2,99]	Sécheresse modérée
[-3 ; -3,99]	Sécheresse sévère
≤ -4	Sécheresse extrême

Source : (Alley, 1984)

1.2.1.3. Indicateurs de sécheresse météorologique

Les indices simplifient parfois certaines relations complexes et facilitent la communication d'informations à divers utilisateurs et parties prenantes, dont le public.

➤ Indice de sécheresse sévère de Palmer (PDSI)

L'indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI) (Palmer, 1965) est une mesure de la disponibilité de l'humidité du sol qui a été largement utilisé pour étudier les sécheresses et les sorts humides et en particulier comme principal indicateur de la gravité et l'ampleur des sécheresses récentes (Heim, 2002 ; Briffa *et al.*, 1994 ; van der Schrier *et al.*, 2006; Dai *et al.*, 2004 ; Dai, 2011). Récemment, le PDSI est devenu plus populaire en tant que mesure de la sécheresse dans les études quantifiant les tendances possibles de la disponibilité future de l'humidité du sol (Dai, 2011 ; Burke et Brown, 2006) et a été utilisé comme base pour reconstruire les variations passées de la sécheresse. L'algorithme de Palmer peut être appliqué pour n'importe quelle région du monde, dès que les données relatives aux précipitations et aux températures sont disponibles (Dai, 2011). Il est calculé à partir de la relation suivante :

$$PDSI = X(i) = 0,897 X(i-1) + Z(i) / 3$$

Où : $X(i-1)$ est le PDSI de la période précédente ; $Z(i)$ est l'indice de l'anomalie en humidité ; i semaines ou mois de l'année, $Z(i) = K(P - P_c)$

Où : K est le facteur de poids (voir Alley, 1984) ; P est la précipitation actuelle (mm) ; P_c est la précipitation CAFEC (mm).

$$P_c = \alpha_j PE + \beta_j PR + \gamma_j PRO - \delta_j PL$$

Où : CAFEC "Climatically Appropriate for Existing Conditions" ou approprié pour les conditions climatiques existantes ; α_j , β_j , γ_j , δ_j sont des coefficients climatiques hebdomadaires ou mensuels ; j est la semaine ou le mois de l'année ; PE est l'évapotranspiration potentielle (mm) ; PR la recharge potentielle (mm) ; PRO le ruissellement potentiel (mm) et PL la perte potentielle dans le sol (mm).

Le PDSI utilise, désormais des précipitations, de la température de l'air et l'humidité contenue dans le sol. Le tableau III présente les différentes classes de sécheresse selon l'indice PSDI.

Tableau III : Classification des valeurs du PSDI

PSDI valeurs	Classification
[-0,5 ; -0,99]	Début de sécheresse
[-1 ; -1,99]	Sécheresse peu prononcée
[-2 ; -2,99]	Sécheresse modérée
[-3 ; -3,99]	Sécheresse sévère
≤ -4	Sécheresse extrême

Source : (Alley, 1984)

1.2.2. Cartographie de l'aléa de sécheresse

Pour la cartographie de l'aléa, les valeurs négatives d'indices standardisés de précipitation ont été spatialisées. Cela se justifie par le fait que l'OMM a recommandé en 2009 cet indice pour le suivi des sécheresses météorologiques (Faye *et al.*, 2015). Les valeurs des SPI obtenues sont classées (Tableau IV) en vue d'élaborer les cartes des indices pluviométriques annuels durant la période étudiée.

Tableau IV : Intervalles des types de sécheresse obtenus

Indices	Classification
Inférieur à -1	extrêmement sèche
Entre -1 et -0,6	Très sèche
Entre -0,6 et -0,2	Modérément sèche

Source : Aghrab (2003)

Sur la base des cartes des indices pluviométriques des années déficitaires en pluviométrie.

La carte d'occupation du sol est aussi utilisée, car les pertes occasionnées par la sécheresse touchent aussi l'agriculture, la végétation naturelle. La figure 2 présente les étapes cartographiques de l'aléa de sécheresse.

L'aléa de sécheresse du bassin est obtenu grâce à la combinaison de ces différents facteurs. L'ensemble de ces facteurs permet donc de mettre en évidence l'aléa de sécheresse qui est ensuite combiné à la vulnérabilité pour estimer le risque

1.2.3. Approche cartographique de la vulnérabilité à la sécheresse

Il n'existe pas de façon unique d'approche pour mesurer la vulnérabilité actuelle et future du fait de son caractère multiforme. La carte de vulnérabilité à la sécheresse est obtenue par la combinaison de plusieurs facteurs que sont la capacité de rétention en eau du bassin, la nature de l'occupation du sol et aussi l'indice de végétation NDVI et la température de surface permettant la caractérisation des conditions hydrique et édaphique du milieu. La température constitue le second facteur important pour le déclenchement d'une période de sécheresse (Benslimane *et al.*, 2008). En effet les paramètres de surface et l'indice de végétation (NDVI) et issus du capteur MODIS (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) de TERRA sont utilisés dans le but de développer une méthodologie pour le suivi de la dégradation des terres (de Rosnay *et al.*, 2009) et de dresser une par la suite la carte des zones à risques de sécheresses dans le bassin. La figure 3 présente la méthode d'élaboration de la carte de vulnérabilité à la sécheresse.

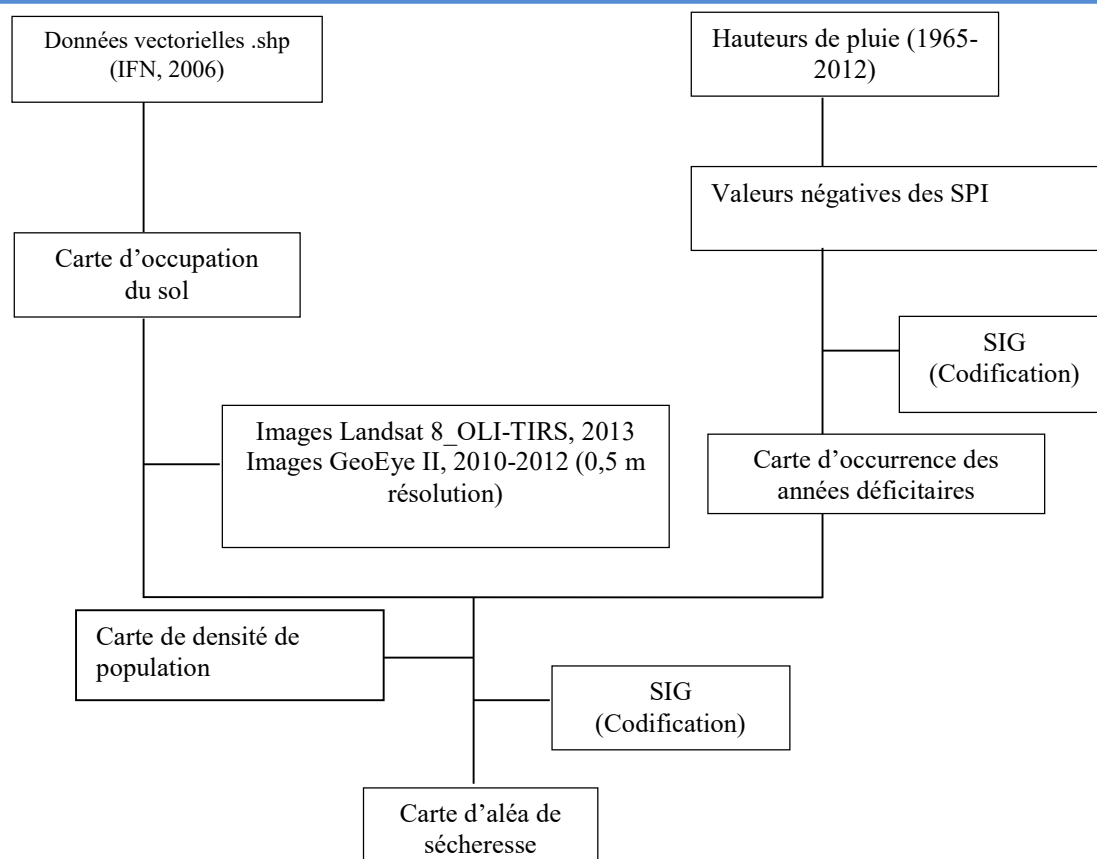


Figure 2 : Procédure de cartographie de l'aléa de sécheresse

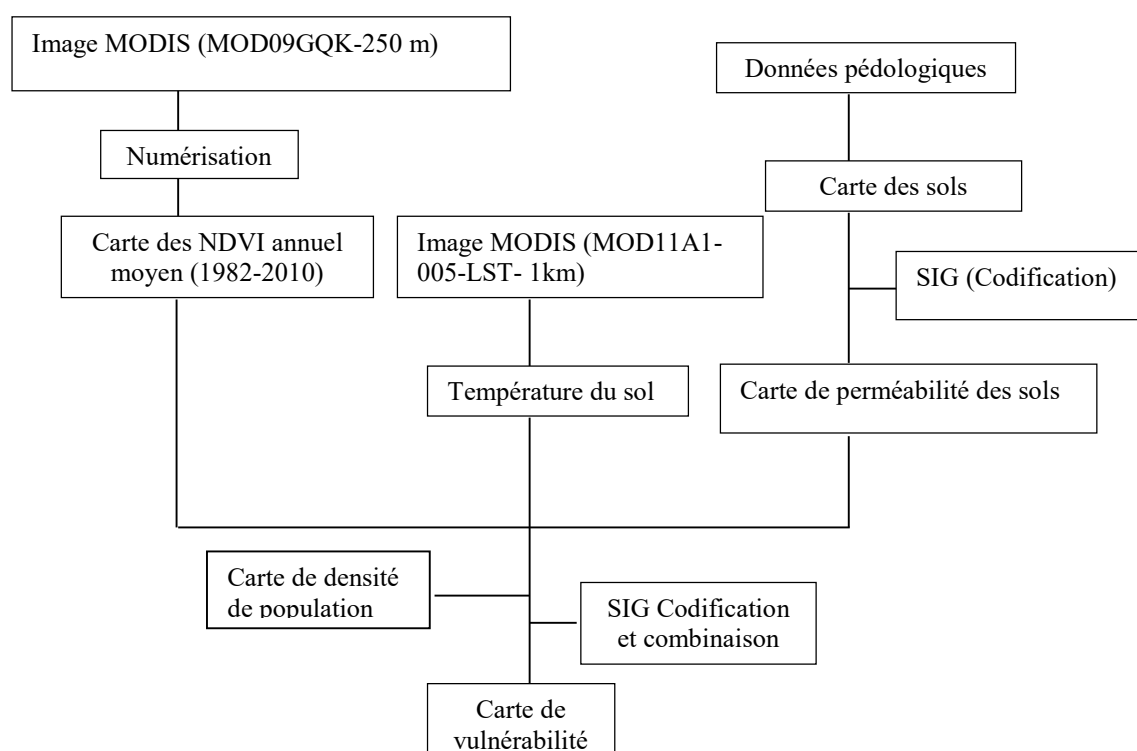


Figure 3 : Méthode d'élaboration de la carte de vulnérabilité à la sécheresse

La combinaison de ces deux facteurs (aléa et vulnérabilité) dans le SIG permet l'élaboration de la carte de risque de sécheresse.

1.2.4. Cartographie des zones à risque de sécheresse

Pour obtenir la carte du risque de sécheresse, la combinaison par codification des cartes de vulnérabilité et de l'aléa a été faite. Ces différentes cartes préalablement codées ont permis d'obtenir les différents niveaux de risques (tableau V).

Tableau V: Grille de risque de sécheresse

Niveau de risque	Critères
Élevé	Aléa élevé x Vulnérabilité moyenne, élevée Aléa moyen x Vulnérabilité élevée Aléa faible x Vulnérabilité élevée
Moyen	Aléa faible x Vulnérabilité moyenne Aléa moyen x Vulnérabilité moyenne
Faible	Aléa faible x Vulnérabilité faible Aléa moyen x Vulnérabilité faible

Source : de Henri, 2006 et adapté

L'intégration de paramètres provenant des données d'observation de la terre (température du sol, NDVI) dans

les études de la sécheresse occupe une vaste place dans de nombreuses recherches. En effet, divers paramètres biogéophysiques tels que l'humidité de surface des sols nus, leur rugosité, la nature des couverts végétaux (Jackson *et al.*, 2000 ; Neuch, 2000 ; Guyot, 2010).

III. RESULTATS

3.1. Caractérisation des types de sécheresse dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérrou

Plusieurs indicateurs permettent la caractérisation des sécheresses. Dans le cadre de cette étude, la caractérisation du risque de sécheresse s'est fondée sur la détermination de l'aléa de sécheresse et de la vulnérabilité.

3.1.1. Aléa de sécheresse

Pour déterminer l'aléa de sécheresse, les indices de sécheresse ont été utilisés..

➤ Indice Z de Palmer

L'indice Z de palmer est utilisé pour la détermination de la sécheresse par rapport à l'humidité du sol (Morid *et al.*, 2007; Patel *et al.*, 2007 ; Barua *et al.*, 2011 ; Dogan *et al.*, 2012) dans le bassin de l'Ouémé à Bétérrou. La figure 4 présente la variabilité des indices Z moyens et extrêmes annuelle dans le bassin de Bétérrou de 1965 à 2012 à l'échelle de la saison culturale (avril à octobre).

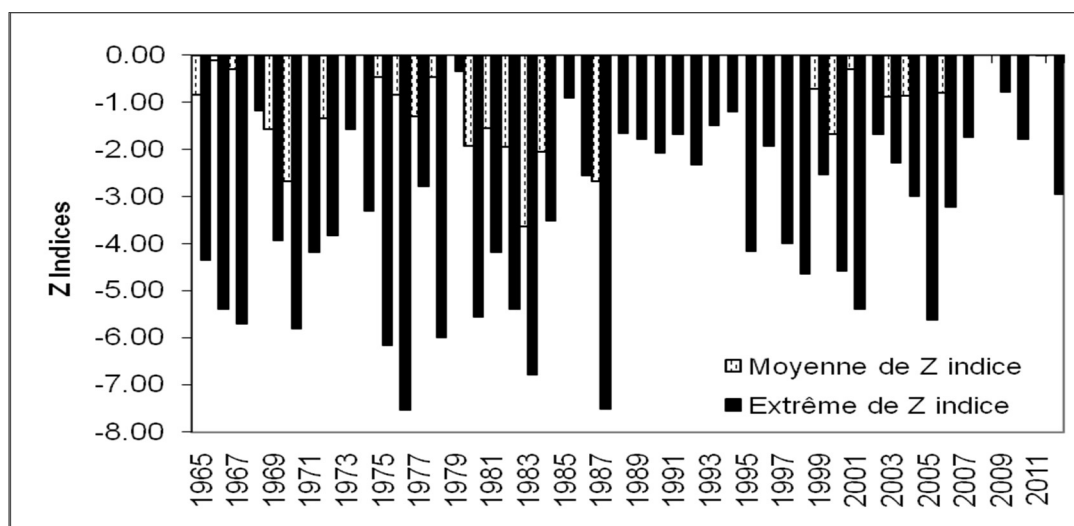


Figure 4 : Variabilité des Z indices moyens et extrêmes annuels dans le bassin de Bétérrou de 1965 à 2012

L'analyse des Z indices au pas de temps annuel en situation climatique moyenne et extrême a permis

d'identifier les années marquées par les différents niveaux de sécheresses. En condition climatique extrême, sur la

période 1965-2012, le milieu a connu plusieurs épisodes de sécheresses agricoles. Les années 1976, 1987, 1975, 1978, 1970 ont connu des sécheresses extrêmes avec des indices respectifs de -7,5 ; -7,5 ; -6,2 ; -6 ; et -5 essentiellement dans le mois d'août, celui de l'optimum pluviométrique. L'année 1983 a enregistré un indice de -6,8 (sécheresse extrême), notamment le mois pluvieux de septembre.

En condition climatique moyenne, les années 1970, 1984, 1987 ont connu des sécheresses modérées avec

respectivement les indices -2,1 ; -2,7 et -2,7. L'année 1983 a connu une sécheresse sévère (-3,6). Ces différents niveaux d'indices de sécheresse agricole enregistrée dans le bassin de l'Ouémé à Bétérrou montrent qu'en saison culturale le secteur est soumis à des aléas qui peuvent avoir des conséquences sur la croissance des cultures. L'occurrence de la sécheresse agricole dans le bassin est illustrée par la figure 5.

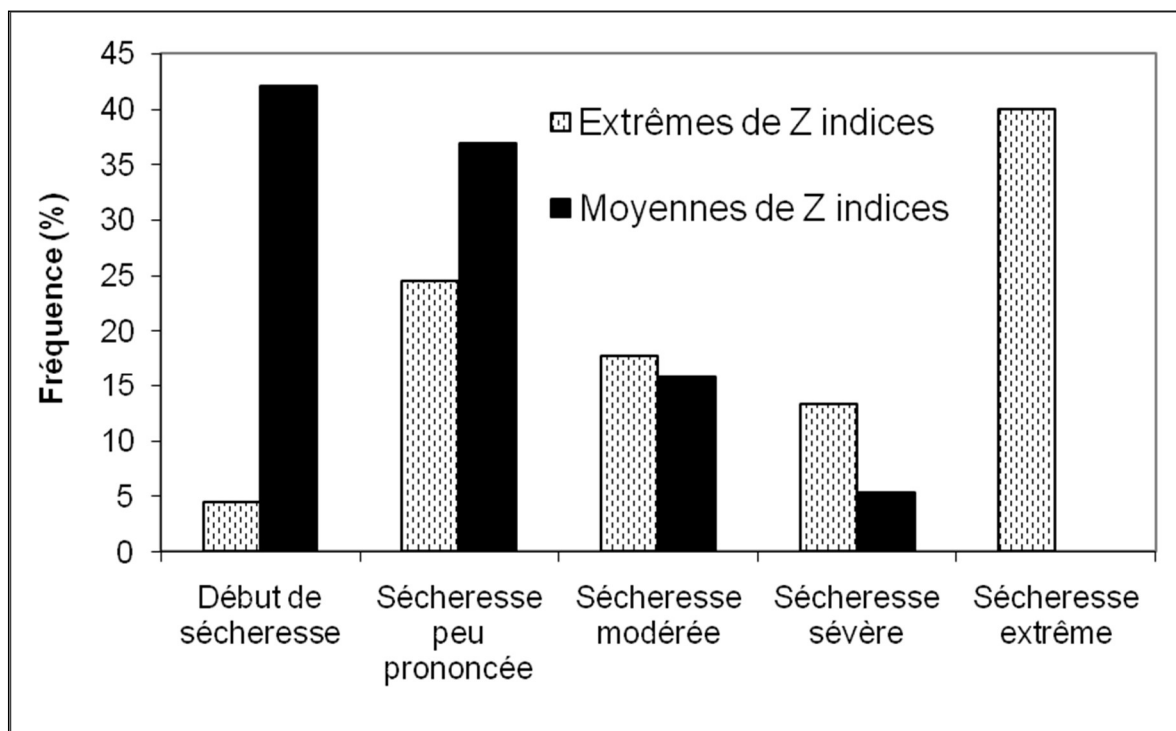


Figure 5 : Fréquence des Z indices moyens et extrêmes annuels dans le bassin de Bétérrou

En condition climatique extrême, à l'échelle mensuelle pendant la saison culturale dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérrou, la fréquence des Z indices est de 40 % pour les sécheresses extrêmes notamment dans les mois de juillet, août et septembre. Il y a aussi les sécheresses peu prononcées (24 %) au cours des mois d'avril, de mai et de juin. Ces mois de début de saison correspondent à la phase de préparation des champs, de périodes de semis, de germination et de montaison des cultures dans le bassin.

En moyenne, les fréquences qui dominent sont les débuts de sécheresse (42 %) et les sécheresses peu prononcées (37 %). Les mois d'avril et de mai qui correspondent entre autres aux périodes de germination sont concernés. Ouorou Barré (2010) a conclu que le stress hydrique pendant la germination diminue le pourcentage de fécondation et

favorise l'avortement des ovules, puis des grains. Cela met en évidence le fait que si les risques de sécheresse agricole se confirment, le stress aura des conséquences négatives sur le rendement des cultures, quelle que soit la période où ils se produisent au cours de l'année.

3.1.2. Sécheresse hydrologique

L'aléa de sécheresse hydrologique a été caractérisé par le calcul de l'indice de sécheresse hydrologique de Palmer (PHDI)

➤ Indice de sécheresse hydrologique de Palmer (PHDI)

La figure 6 montre l'analyse en composante principale du PDHI à l'échelle mensuelle et annuelle dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérrou sur la période de 1965 à 2012.

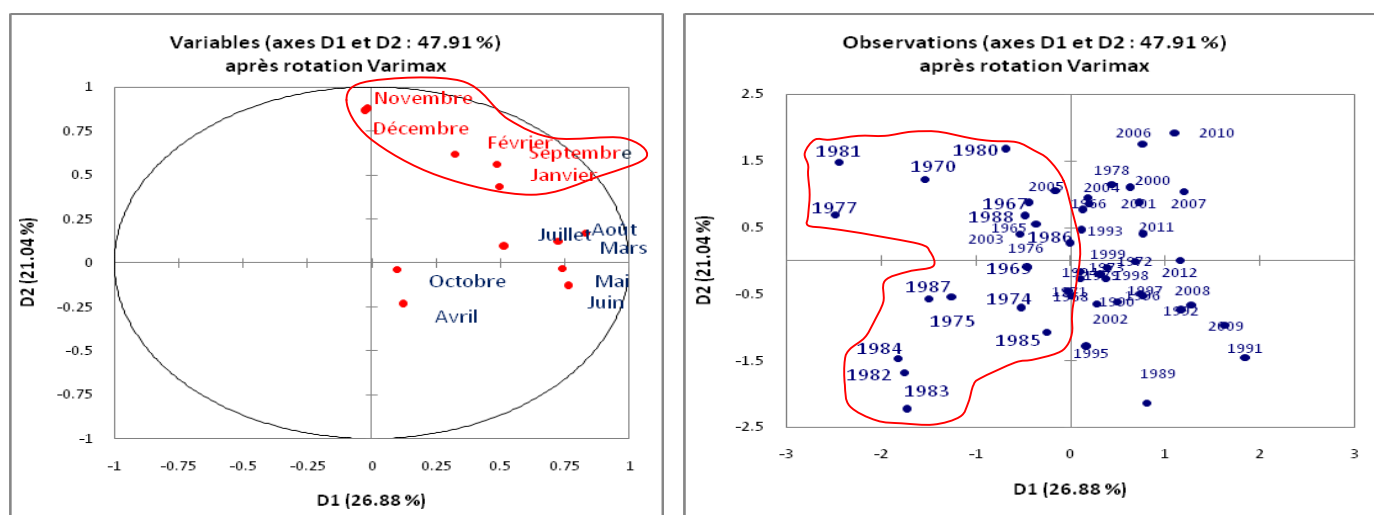


Figure 6 : Analyse en composante principale des indices PDHI à l'échelle mensuelle et annuelle

A l'échelle mensuelle, l'analyse en composante principale montre les mois qui se répartissent globalement en deux groupes. Les mois de janvier, février, novembre, décembre sont habituellement des mois secs. Ces mois sont donc dominés par différents niveaux de sécheresse hydrologique dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérrou.

En condition climatique moyenne, les années 1983, 1984, 1982, 1987 avec respectivement -3,9 ; -3,3 ; -3,1 ; -2,4 comme indices font partie des années les plus sèches dans le milieu. Les années les moins sèches sont 1990, 2002, 1994, 2003 avec respectivement - 0,47 ; -0,41 ; -0,3 ; -0,24. Une étude de Wagoussi (2010) avait identifié également ces années comme sèches dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérrou, bien qu'il ait travaillé sur la période de 1953 à 2010.

En condition climatique extrême, des années ont enregistré des niveaux élevés de sécheresse et cela a été observé sur différents mois. Les années les plus sèches sont 1970 (-6,9 ; janvier), 1977 (-6,9 ; février), 1981 (-6,5 ; avril), 1983 (-5,88 ; mai), 1984 (-4,63 ; juin). Ces différents mois de ces années ont connu donc des sécheresses extrêmes. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par la DG-Eau (2015) qui a montré que dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérrou, l'année hydrologique 1983-1984 a été la plus sèche de la période 1950-2009. Cela correspond parfaitement à l'année 1984 qui a été obtenue ici comme celle d'une sécheresse extrême en considérant les indices PDHI.

3.1.3. Sécheresse météorologique

Aux fins de cette étude, la PDSI a d'abord été calculée pour l'échelle de temps mensuelle, puis a été annuellement calculée, et les valeurs de SPI de 12 mois ont été calculées pour la période d'étude.

➤ Indicateur de sécheresse sévère de Palmer (PDSI)

Une Analyse en Composantes Principales (ACP) de l'indice PDSI calculé à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé à Bétérrou sur la période de 1965 à 2012 a été faite (figure 7).

En ce qui concerne la variation mensuelle, l'analyse en composante principale en rotation varimax présente deux groupes de mois. Il y a un regroupement distinct des mois globalement secs que sont janvier, février, mars et novembre. Ces mois ont connu sur la période d'étude de différents degrés de sécheresse. Les mois de janvier sur la période d'étude sont dominés par les sécheresses modérées, février, mars et novembre par les sécheresses extrêmes.

Les années marquées par la sécheresse météorologique dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérrou ont été aussi analysées. Ainsi, en condition climatique moyenne, les années 1983, 1982, 1988, 1981, 1986 ont été les plus sèches dans le bassin avec respectivement -3,6 ; -2,7 ; -2,2 ; -2,1 et -2 comme indices de sécheresses. Les années les moins sèches sont 1970, 1971, 2002, avec respectivement - 0,50 ; - 0,1 ; -0,3 ; -0,2.

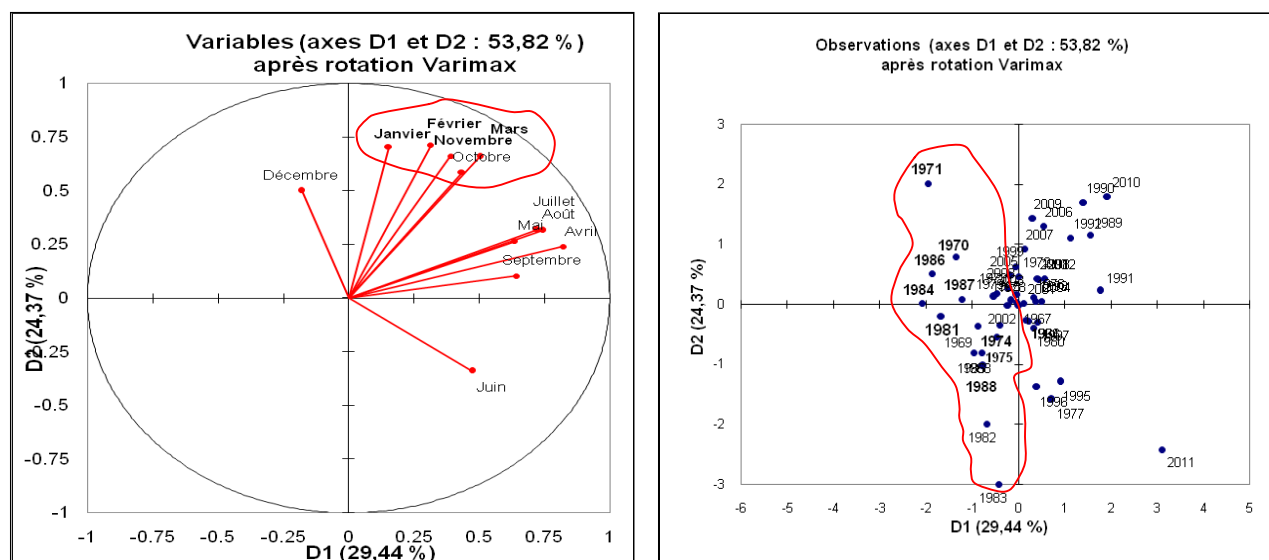


Figure 7 : Analyse en principale composante des PDSI dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérrou

Source : Traitement des données de l'ASECNA, 2015

En condition climatique extrême, plusieurs années ont connu de différents niveaux de sécheresse et cela sur de différents mois. Les années les plus sèches sont 1984 (-7,60 ; mai), 1977 (-6,98 ; novembre), 1981 (-6,99 ; octobre), 1983 (-6,66 ; novembre), 1985 (-6,50 ; mars), 1986 (-5,9 ; juin). Ces années ont connu donc des sécheresses extrêmes.

En résumé, il faut signifier que l'analyse locale des sécheresses peut ensuite être complétée de différentes façons pour caractériser des événements dans leur dimension spatio-temporelle (Vidal *et al.*, 2010). Ainsi, il a été procédé dans la suite de ce travail à la spatialisation des indices de sécheresse afin de mieux caractériser le niveau global atteint par la sécheresse à l'échelle du bassin.

3.2. Spatialisation de l'aléa de sécheresse

D'abord sur la base des indices pluviométriques, un calcul des occurrences de sécheresse a été effectué pour la réalisation de la carte des occurrences des années déficitaires en pluviométrie. Le croisement de cette carte à celle de l'occupation du sol permet d'avoir la carte de l'aléa

de sécheresse. L'occupation du sol a été regroupée en trois classes (figure 8a). Cette même procédure a été utilisée par (ILWAC, 2013). La figure 8 présente les cartes utilisées pour ressortir les zones d'aléa de sécheresse dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérrou.

Spatialisation des valeurs moyennes de l'indice standardisé de précipitation fait ressortir les zones présentant une relative sécheresse. Les secteurs de Djougou, Copargo sont dans des zones faiblement déficitaires. La cartographie des valeurs moyennes de l'indice met donc en évidence l'opposition entre les zones déficitaires et les zones faiblement déficitaires. Seuls les indices négatifs ont été utilisés pour la cartographie. La combinaison de ces deux cartes thématiques a permis d'obtenir la carte de l'aléa de sécheresse (figure 9).

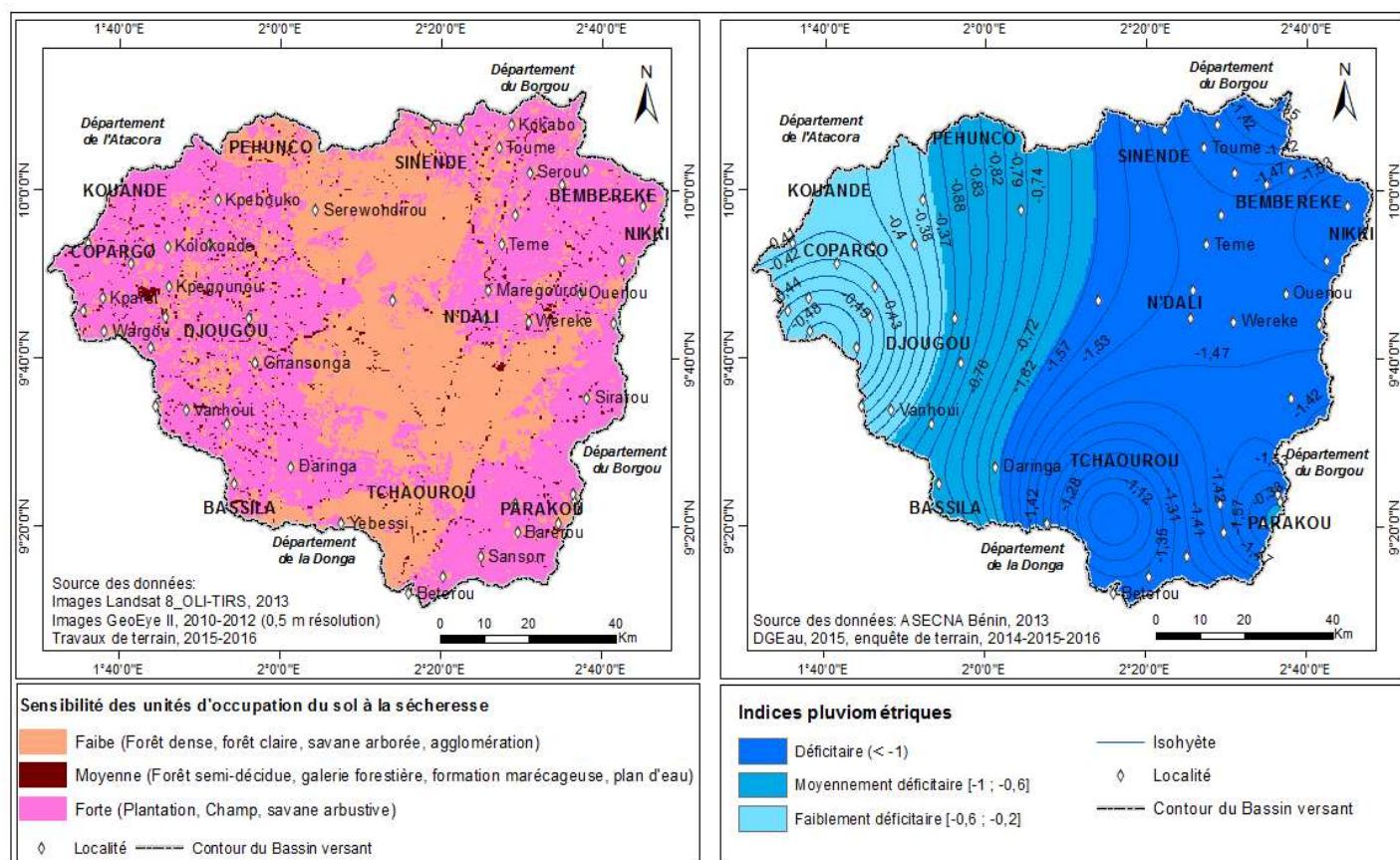


Figure 8 : a) Couverture du sol, b) Répartition spatiale des valeurs moyennes de l'Indice standardisé de précipitation

Les zones à aléa de sécheresse dans le bassin versant sont classées en trois niveaux ; c'est dire du faible au fort en passant par le moyen. Il ressort que la zone à faible aléa occupe 5,58 % de la superficie du bassin versant et se situe principalement dans le secteur de Bembèrèkè, Parakou, Bassila. Les zones à aléa moyen occupent une grande partie d'un bassin versant. Elles représentent 66,71 % de la superficie du bassin versant et correspondent aux secteurs à couverture végétale moyennement dense (savane). Il y a des localités comme N'Dali, Sinendé, Djougou, Daringa, Sanson qui se retrouvent dans ce secteur. L'aléa fort occupe le reste du bassin versant, soit 27,71 % de la superficie du bassin versant et correspond aux zones dominées par les champs, plantations et étant déficitaire. Il y a des localités comme Copargo, Tchaourou, Pehunco qui se retrouvent dans ces secteurs. Dans une étude similaire, Amoukou *et al.* (2007) ont aussi mise en évidence le rôle des aléas hydroclimatiques, en particulier l'occurrence des sécheresses intra saisonnières sur le milieu physique et humain en indiquant les zones à aléa fort, moyen et faible. Les zones vulnérables à la sécheresse dans le bassin ont été spatialisées.

3.3. Cartographie de la vulnérabilité à la sécheresse

La carte de vulnérabilité à la sécheresse est obtenue par la combinaison de plusieurs facteurs que sont la capacité de rétention en eau du bassin, la température de surface, le réseau hydrographique et le NDVI. La figure 10 montre les différentes cartes qui ont permis de déterminer les zones vulnérables à la sécheresse dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérrou.

La température de surface constitue un facteur important pour le déclenchement d'une période de sécheresse. La hausse des températures qui accompagne une baisse des taux de précipitations favorise le processus d'évapotranspiration ainsi que le dessèchement des sols (Bernier *et al.*, 1994; Amoukou, 2009 ; Issa et Yamba, 2009).

Un autre facteur important qui se distingue, c'est celui de la capacité de rétention en eau du sol. En effet, un sol qui fait l'objet d'une exploitation agricole nécessite plus d'intérêt qu'un autre qui n'a pas cette vocation. Le réseau hydrographique est aussi pris en compte dans l'analyse de la vulnérabilité à la sécheresse. Nicholson *et al.*, (1990) ont

prouvé que la capacité photosynthétique atteint son maximum même si la croissance de la végétation continue. Ces résultats sont aussi semblables à ceux de Tucker et Sellers (1986) qui ont démontré qu'au-delà du seuil maximum de NDVI, la pluie n'est pas le facteur limitant de la croissance de la végétation et que le NDVI mesure l'activité photosynthétique et non la végétation totale.

L'indice de végétation (NDVI) se révèle être un outil bien adapté pour différencier et hiérarchiser la densité des couverts végétaux (NDVI de 0,3 à 0,8). Il est aussi un bon indicateur pour le suivi régional de la végétation (Haddouche *et al.*, 2011). Le NDVI présente la particularité d'augmenter en présence de végétation dense. La carte

d'indice de végétation NDVI ainsi obtenue sur le milieu d'étude montre que les fortes valeurs du NDVI, au dessus de 0,65 sont attribuées à la végétation dense. Les sols nus ont les faibles valeurs, en dessous de 0,2. Les groupements végétaux de la zone d'étude en trois classes ont été faits en se basant sur la classification de Roose (1977). Ainsi, et en se basant sur ces considérations et sur la disponibilité de l'information requise, ces différents facteurs ont été retenus pour la spatialisation des zones vulnérables à la sécheresse (figure 11).

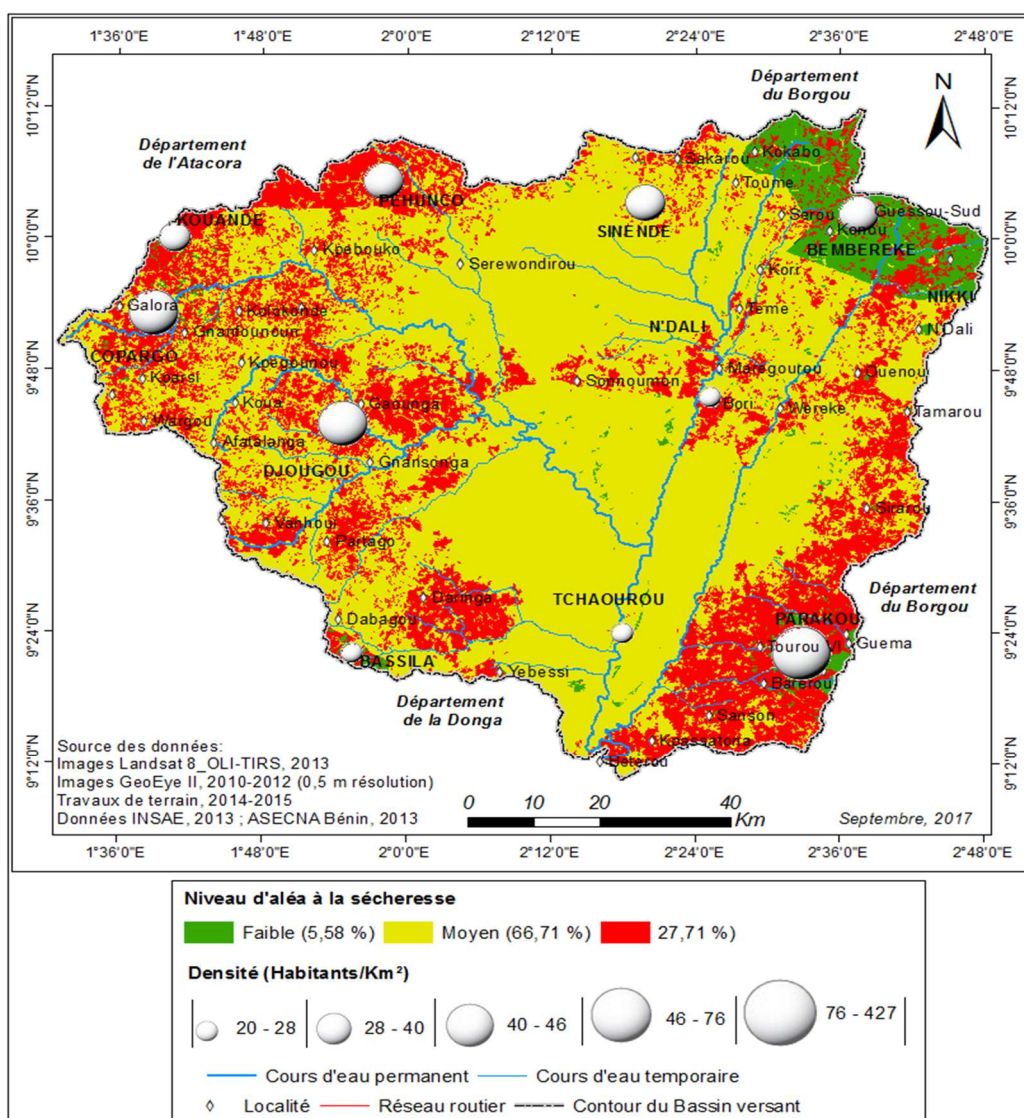
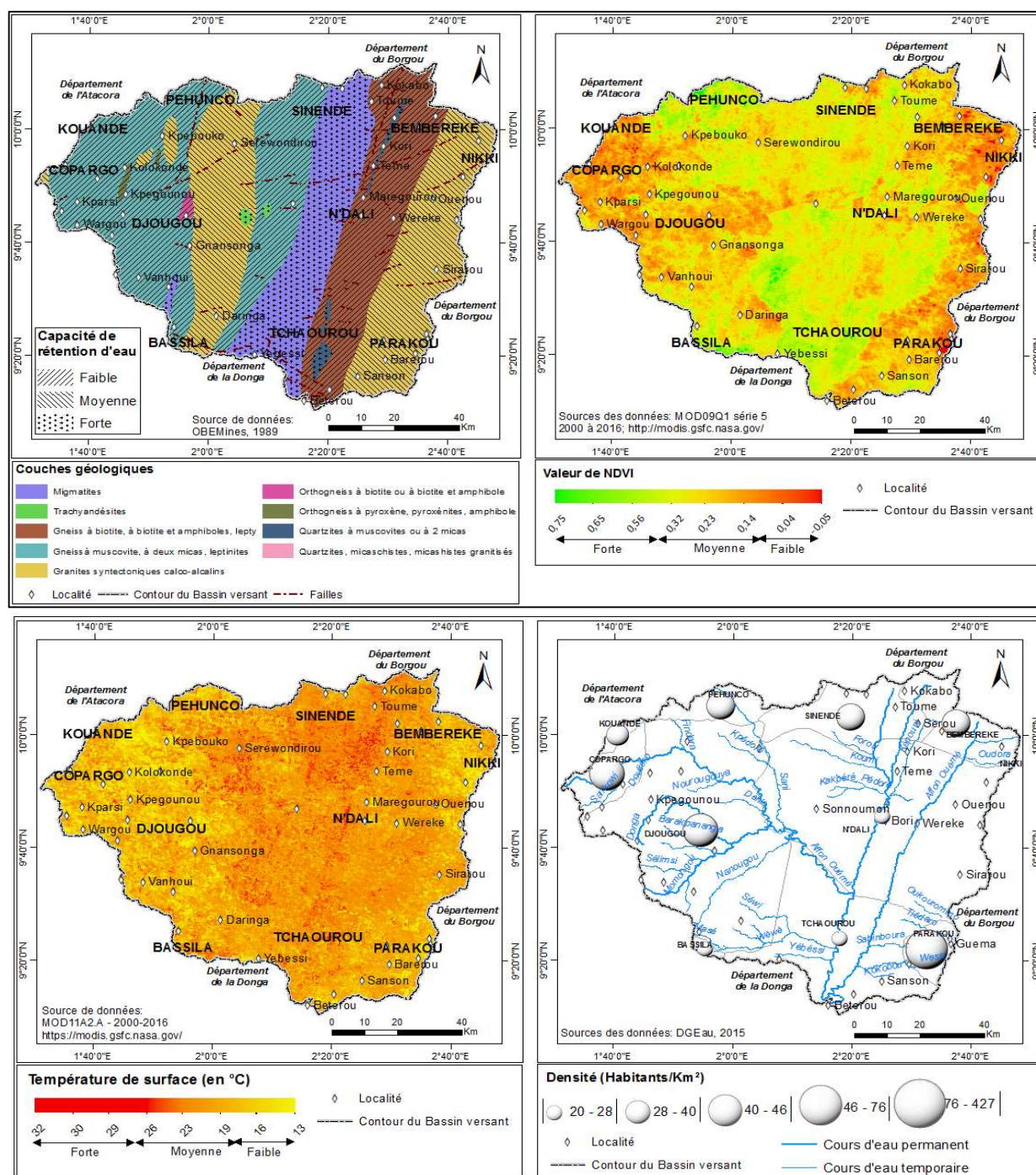


Figure 9 : Aléa de sécheresse dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérôu



De l'analyse de la figure 11, il faut retenir que 11,73 % de la superficie du bassin sont faiblement vulnérables à la sécheresse et concernent les abords des cours d'eaux. 54,60 % de la superficie du bassin sont moyennement vulnérables à la sécheresse. Les zones à forte vulnérabilité occupent 33,77 % de la superficie du bassin. Il faut aussi souligner que les populations agricoles sont les plus pauvres du bassin, donc très vulnérables aux extrêmes

hydroclimatiques, en l'occurrence les sécheresses créant de profonds déficits en eau pour les cultures. Bana (1997) a ressorti le rôle de la sécheresse dans la vulnérabilité des populations à travers une baisse des productions en limitant la saison végétative des plantes cultivées à seulement 50 jours. Quant à Seyni (2000), il a montré le rôle du climat dans la vulnérabilité des populations. Il note que la dégradation des conditions climatiques a occasionné une

baisse de production de près de 30 %. La détermination de l'aléa de sécheresse et les zones vulnérables a permis de

spatialiser les zones potentielles à risque de sécheresse dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérrou.

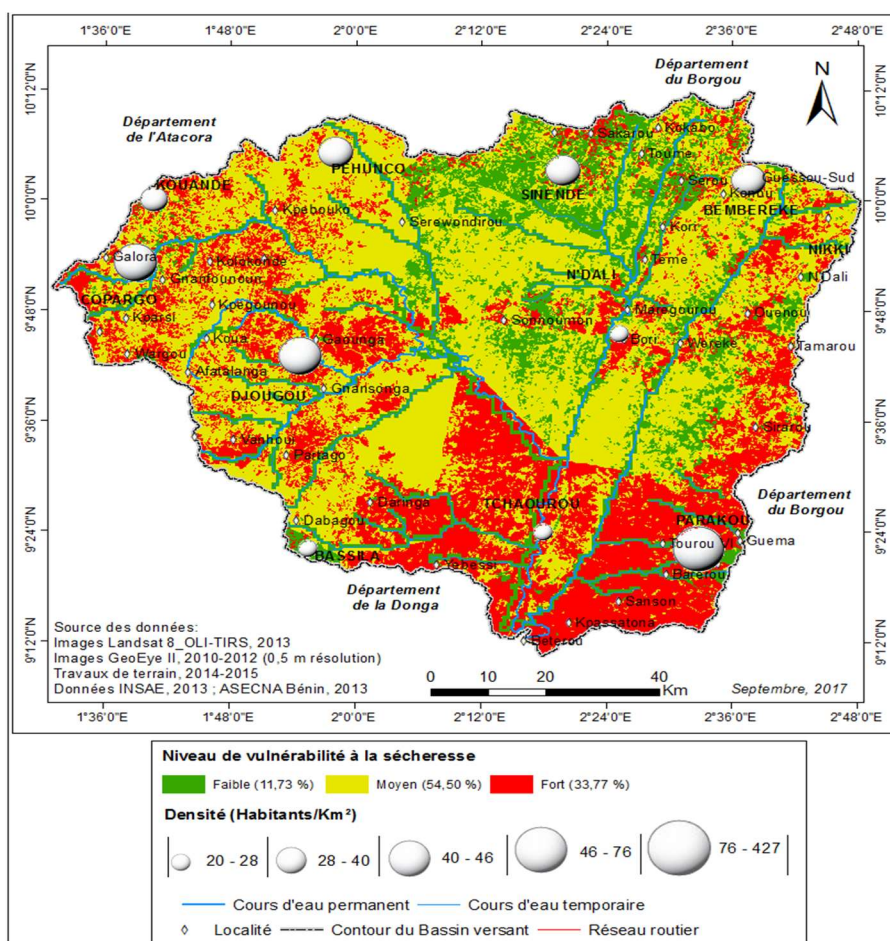


Figure 11 : Carte de vulnérabilité à la sécheresse à l'échelle du bassin versant de l'Ouémé à Bétérrou

3.4. Cartographie du risque de sécheresse dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérrou

Les risques liés à la sécheresse sont abordés, car il n'y a que peu de pays qui rapportent systématiquement les pertes et effets dus à la sécheresse ; pourtant ses impacts sur la

production agricole, les moyens de subsistance ruraux et les secteurs urbains et économiques sont manifestes et considérables (GAR, 2011). La carte des zones à risque de sécheresse n'est que le croisement de celle de l'aléa et de la vulnérabilité (figure 12).

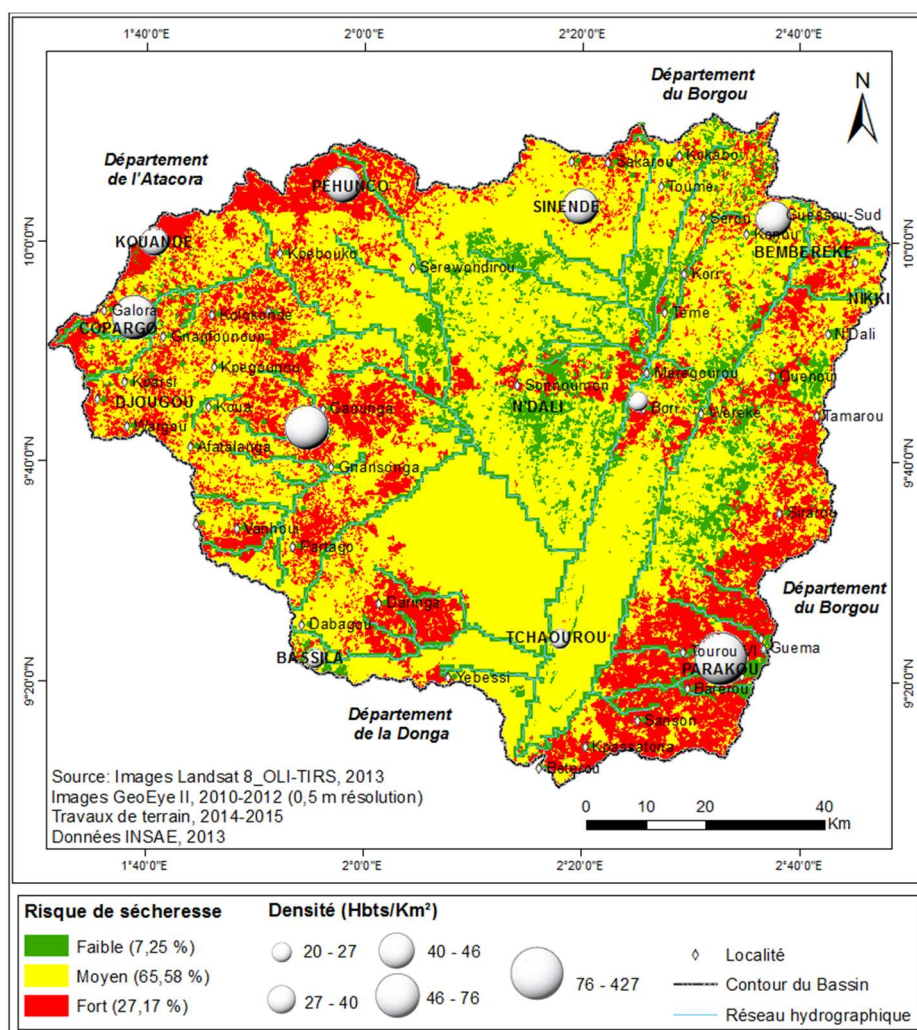


Figure 12 : Carte du risque de sécheresse dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérrou

La carte présente trois zones à risque dont le niveau varie de faible au fort. Les secteurs à risque faible couvrent 7,25 % du territoire d'étude et correspondent aux abords immédiats des cours d'eau et aussi les localités comme N'dali, Bassila. Les zones à risque moyen couvrent 65,58 % du territoire et s'étendent principalement dans la partie centrale. Les milieux à fort risque occupent 27,17 % du territoire et concernent presque tous les secteurs du bassin.

En somme dans un contexte local et régional où la maîtrise du déficit pluviométrique demeure un enjeu majeur, l'estimation et la gestion à long terme des ressources en eau dans un bassin sont indispensables, tant pour améliorer son environnement que pour assurer le bon fonctionnement des activités liées à l'eau. Les enjeux liés à la persistance ou non de la sécheresse sont par conséquent de première importance pour les pays traversés par les fleuves et pour les habitants qui y vivent (Faye, 2015). Le bassin de l'Ouémé à Bétérrou

connait des risques hydroclimatiques que sont les sécheresses et les inondations à des degrés divers. Ce même constat a été fait par Dipama (2016), qui a estimé qu'à l'échelle du Burkina Faso, les phénomènes climatiques extrêmes couramment évoqués par les populations rurales sont respectivement les inondations, les sécheresses et dans une moindre mesure, les vents violents.

IV. CONCLUSION

La présente étude a permis de mettre en évidence la caractérisation des séquences sèches par les indices et cela montre donc que les déficits pluviométriques sont très accentués. L'analyse des résultats des différents indices de sécheresse montre, qu'en plus de leurs facilités d'utilisation, les indices donnent une caractérisation de la sécheresse plus précise par rapport aux autres indices aux calculs exigeants.

Pour mieux anticiper et suivre la sécheresse, le calcul d'indicateurs donnant des informations sur la sévérité d'une sécheresse a été donc mise en évidence. Ces indicateurs permettent de déterminer d'une façon scientifique le seuil indiquant la sécheresse à différentes échelles de temps et de définir des classes d'appartenance à cet événement en fonction de sa sévérité et de sa position. Ces indices constituent également un excellent moyen de communication avec le public et un outil de décision.

REFERENCES

- [1] Aghrab A., 2004. Étude de la sécheresse au Maroc. Editions le Manuscrit .119 p.
- [2] Alley W.M., 1984. L'indice de gravité de la sécheresse de Palmer: Limitations et hypothèses. *Journal du climat et de la météorologie appliquée*, 23, 1100-1109.
- [3] Amoukou A. I., Marichatou H., Yamba B. et Yaye A., 2007. Vulnérabilité et innovations paysannes. L'expérience d'Agué au Niger, Presses universitaires de Louvain, 114 p.
- [4] Bana Z., 1997. Impact de la variabilité pluviométrique sur le développement agricole en milieu sahélien. Cas des arrondissements de Kollo et Filingué au Niger. Actes du colloque SPP/E tenu à Niamey (Niger) du 10 au 11 décembre 1997 sur le thème « Méthodes pour comprendre et mesurer les pratiques agraires en milieu tropical et leurs transformations. Travaux et recherches de l'IGUL n°16, Pp 55-71.
- [5] Barua S. et Perera B.J.C., 2011. Évaluation comparative des indices de sécheresse : étude de cas sur le bassin versant de la rivière Jarar en Australie. *Water Ressource. Planning. Management*. N°37, pp. 215–226.
- [6] Benslimane M., Hamimed A., El Zerey W., Khaldi A. et Mederbal K., 2008. Analyse et suivi du phénomène de la désertification en Algérie du nord, *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 8 Numéro 3 |, consulté le 28 août 2016. URL : <http://vertigo.revues.org/6782> ; DOI : 10.4000/vertigo.6782
- [7] Bernier X., Faret L., et Morel A., 1994. Les régions de limite des cultures pluviales du Niger : un espace en crise. In, *Revue de géographie alpine*, n° hors-série, vol 2. pp 149-158.
- [8] Briffa, K. R., Jones P. D. et Hulme M., 1994. Variabilité de l'humidité d'été en Europe, 1892-1991 : une analyse basée sur l'Indice de gravité de la sécheresse Palmer, *International Journal of Climatology*, 14, pp. 475 - 506.
- [9] Burke E.J., Brown S. J., et Christidis N., 2009. Modélisation de l'évolution récente de la sécheresse et des projections mondiales pour le XXIème siècle avec le modèle climatique du Centre Hadley. In *Journal of Hydrometeorology*, 7, pp. 1113-1125.
- [10] Byun H. R., Wilhite D.A., 1999. Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, 12, 2747-2756.
- [11] Cutore P., Di Mauro G., et Cancelliere A. 2009. Prévion de l'indice de Palmer à l'aide de réseaux de neurones et d'indices climatiques. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14p
- [12] Dai A., 2011. La sécheresse sous le réchauffement climatique : une revue, Wiley Avis interdisciplinaires : *Climate Change*, 2, pp 45 - 65
- [13] Dai A., Trenberth K. E., and Qian T. 2004. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *Journal of Hydrometeorology*, 5, pp. 1117 – 1130.
- [14] DG-Eau, 2015. Détermination des indices et seuils d'alerte relatifs au risque de sécheresse au Bénin, rapport d'étude, 128 p.
- [15] Dipama J. M., 2016. Changement climatique et agriculture durable au Burkina Faso : Stratégies de résilience basées sur les savoirs locaux, rapport d'étude, 36 p
- [16] Dogan S., Berkay A., Singh V. P., 2012. Comparaison des indices de sévérité de la sécheresse basés sur la pluviométrie sur plusieurs mois, avec application au bassin fermé semi-aride de Konya, Turkey. *Journal Hydrology*. 470–471, pp. 255–268.
- [17] Faye C., Abdoul Sow A., et Ndong J. B., 2015. Étude des sècheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sècheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal, *Physio-Géo*. DOI : 10.4000/physio-geo.4388
- [18] GAR, 2011. Réduction des risques de catastrophe : Révéler le risque, redéfinir le développement Bilan mondial 2011
- [19] Guyot A., 2010. Estimation de l'évapotranspiration sur un couvert complexe par utilisation de la

- scintillométrie infrarouge. Application à un bassin versant de zone soudano-sahélienne (Bénin). Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, 243 p.
- [20] Haddouche I., Benhanifia K. et Gacemi M., 2011. Analyse spatiale de la régénération forestière post-incendie de la forêt de Fergoug à Mascara, Algérie. *Bois et forêts des tropiques*, 307 : pp. 23-31.
- [21] Heim R. R., 2002. Une revue des indices de sécheresse du XXe siècle utilisés aux États-Unis. *Bulletin de l'American Meteorological Society*, 83, 1149 – 1165.
- [22] Henry J. B., 2006. Systèmes d'information spatiaux pour la gestion du risque d'inondation de plaine, Thèse de Doctorat d'Université, Université de Strasbourg I, France, 271 p.
- [23] ILWAC, 2013. Gestion intégrée de la terre et de l'eau pour l'adaptation à la variabilité et au changement climatique au Mali. Guide Méthodologique Cartographie de la vulnérabilité face aux risques climatiques, rapport d'étude, 39 p
- [24] Issa B., et Yamba B., 2009. Changements climatiques et dynamique foncière dans le système de cuvettes oasiennes du sud-est nigérien. *Revue de sciences environnementales*. Université de Lomé (Togo), n°005, pp : 51-62.
- [25] Jackson T. J., Moran M. S., et O'Neill P. E., 2008. Introduction aux expériences d'humidité du sol 2004 (SMEX04) Special Issue. *Remote Sensing of Environment*, 112, pp. 301-303
- [26] Keyantash J., et Dracup J. A., 2002. Quantification de la sécheresse : Evaluation des indices de sécheresse. *Bulletin de l'American Meteorological Society*, 83, 1167 – 1180.
- [27] Landsberg H. E., 1970. Man-Made Climatic Changes Man's activities have altered the climate of urbanized areas and may affect global climate in the future. *Science*, pp 65-74.
- [28] McKee T.B., Doesken N.J. et Kleist J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scale. *Actes de la 8th Conference on Applied Climatology* (Anaheim, Californie), 179-184.
- [29] Mishra A.K., Singh V.P., 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391, 202-216.
- [30] Morid S., Smakhtin V., Bagherzadeh K., 2007. Prévision de la sécheresse à l'aide de réseaux neuronaux artificiels et séries chronologiques d'indices de sécheresse. *International Journal of Climatology* 27, pp. 2103–2111.
- [31] Nalbantis I., Tsakiris G., 2009. Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*, 23, 881-897.
- [32] Neusch T., 2000. Données radar à ouverture synthétique multifréquences et multipolarisation pour Modélisation des paramètres hydrologiques, Aachen : Shaker (Geod'asie ; Bd. 5), Zugl. : Karlsruhe, University, 26 p.
- [33] Ouorou Barré F. I., 2010. Variabilité climatique et production agricole dans les Communes de Tanguiéta et Matéri, mémoire de Diplôme D'Etudes Approfondies, Ecole Doctorale Pluridisciplinaire, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 109 p.
- [34] Palmer W., 1965. Meteorological Drought. Research Paper NO. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, 58 p.
- [35] Patel N. R., Chopra P., Dadhwal V. K., 2007. Analyser les tendances spatiales de la sécheresse météorologique en utilisant l'indice de précipitation standardisé. *Meteorological Applications*, 14, pp. 329–336
- [36] Roose E., 1977. Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest : vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. Travaux et Documents, éditions ORSTOM, n° 78 : 230 p.
- [37] Seyni H., 2000. Politiques nationales et investissement dans les petites exploitations agricoles à Maradi, *Drylands Research*, 39 p.
- [38] Shafer B.A., Edezman L.E., 1982. Development of a surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. In: *Proceedings of the Western Snow Conference*. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 164-175.
- [39] Sharma T.C., Panu U.S., 2010. Analytical procedures for weekly hydrological droughts: a case of Canadian rivers. *Hydrological Sciences Journal*, 55 (1), 79-92.
- [40] Van der Schrier G., Briffa K. R., Osborn T. J. et Cook E. R., 2006. variabilité de l'humidité d'été en Amérique du Nord, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 111, D11102, doi : 10.1029 / 2005JD006745
- [41] Vidal J.-P., Martin E., Franchistéguy L., Habets F., Soubeyroux J.-M., Blanchard M. et Baillon M., 2010. Réanalyse de la sécheresse à plusieurs niveaux et à plusieurs niveaux sur la France avec la suite

hydrométéorologique Safran Isba-Modcou. *Hydrologie et sciences du système terrestre*, 14(3), 459-478. DOI : 10.5194/hess-14-459

- [42] Wagoussi O. T., 2010. Contribution à l'étude de l'influence des crues de l'Ouémé sur les inondations à Cotonou, Mémoire de Master Professionnelle en Hydrologie, Faculté des Sciences et Techniques, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 121 p.
- [43] Watson, E., Forster, P., Richards, M., and Bandelt, H. J., 1997. Mitochondrial footprints of human expansions in Africa. *Am J Hum Genet.*, 61(3), 691–704.
- [44] Weber L., et Nkemdirim L., 1998. Palmer's drought indices revisited. *Geografiska Annaler*, 80A, 153 –172.
- [45] Zannou B. Y., 2011. Analyse et Modélisation du Cycle Hydrologique Continental pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau au Bénin Cas du Bassin de l'Ouémé à Bétérou. Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin, 356 p