

PRÉDÉTERMINATION DES SÉQUENCES SÈCHES ET INTÉRÊT DE L'INFORMATION CLIMATIQUE SUR LA PRODUCTION CÉRÉALIÈRE EN ZONE SAHÉLIENNE

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGÉNIERIE
OPTION : EAU AGRICOLE

Présenté et soutenu publiquement le 25-JUIN-2013 par

Pingdwendé Lionel Arnaud OUEDRAOGO

Travaux dirigés par:

Dr Malicki ZOROM

Enseignant Chercheur au Centre de Recherche Eau et Climat
Laboratoire Ressources en Eau et Hydrologie

Dr Dial NIANG

Enseignant Chercheur au Centre de Recherche Eau et Climat
Laboratoire Ressources en Eau et Hydrologie

M. Sévère FOSSI

Ingénieur de Recherche au Centre de Recherche Eau et Climat
Laboratoire Ressources en Eau et Hydrologie

Jury d'évaluation du stage :

Président : Pr Hamma YACOUBA

Membres et correcteurs : Dr Harouna KARAMBIRI
Dr Emmanuel PATUREL
M Sévère FOSSI

Promotion [2012/2013]

*L'éducation est le logiciel de l'ordinateur central qui
programme l'avenir des sociétés.*

[Joseph ki Zerbo]

DÉDICACES

*Je dédie ce travail
principalement à mes chers
parents, mon père Innocent
OUEDRAOGO et à ma mère
Pauline KABORE, eux qui
contribuent inlassablement pour
ma réussite et mon
épanouissement*

REMERCIEMENTS

L'écriture de cette page est importante et difficile car le mot juste (désiré) et le juste mot (approprié) sont souvent deux facettes de l'épreuve pour réussir à vous exprimer ma gratitude simplement et efficacement. De nombreuses personnes ont contribué à la réussite de ce mémoire.

En premier je tiens à adresser mes sincères remerciements au Pr. Hamma YACOUBA, Directeur du LEAH d'avoir accepté ma personne pour y effectuer ce stage au sein du 2iE.

Toute ma gratitude va naturellement à l'égard de Dr Malicki ZOROM, Dr Dial NIANG, Monsieur Sévère FOSSI, Dr. Harouna KARAMBIRI, pour leur immense patience, leur persévérance, leur disponibilité et l'enthousiasme qu'ils ont pu me communiquer. Vous avez été à chaque étape de votre encadrement, un merveilleux guide pour l'avancée de mes travaux pour l'aboutissement à ce document.

Je pense aussi au Dr Bruno Barbier, Dr Corentin SOME, Hassane Djibo GADO, pour la pertinence de leurs précieux conseils.

Avec la contribution et la collaboration du personnel du Laboratoire Ressources en Eau et Hydrologie, le cadre fut convivial, accompagné d'une ambiance favorable à l'avancement des travaux. Je vous suis reconnaissant à cet effet.

Je n'oublie pas Monsieur Ernest OUEDRAOGO, Directeur de la climatologie et du réseau météorologique du Burkina qui a permis l'acquisition des données pluviométriques.

Aussi une pensée à mes très chers frères étudiants de fin de cycle du 2iE que je ne pourrai tous nommés, je souhaite qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance.

Enfin tous mes respects et ma reconnaissance vont à l'égard de ma famille, source de ma motivation et de mes espoirs.

À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, qui m'ont montré leur intérêt et qui ont contribué à la réalisation de ce présent mémoire.

RÉSUMÉ

Dans un contexte de variabilité climatique, cette étude a été menée afin de proposer des stratégies d'adaptation pour faire face aux les séquences sèches, et réduire la vulnérabilité des producteurs sahéliens. Les localités d'étude sont le Yatenga et le Bam, deux provinces situées dans la partie sahélienne du Burkina Faso. Les séquences sèches météorologiques ont été identifiées à partir d'un seuil à 1 mm. Nous avons utilisé pour cette étude des périodes d'observation sur les hauteurs pluviométriques de 1961 à 2012 (Ouahigouya) et de 1960 à 2008 (Kongoussi). Les probabilités d'occurrences de ces poches de sécheresse ont été calculées à partir des chaînes de Markov et les résultats obtenus ont permis de ressortir un ensemble de séquences sèches et leurs prévisions interannuelles. Les séquences sèches de courte durée (<2 voir jusqu'à 5 jours) sont récurrentes mais n'ont pas trop d'incidence notable sur les cultures. En effet, avec la bonne répartition des pluies surtout au mois d'août, le stock d'eau disponible est assez important pour permettre aux cultures de se développer normalement. Mais une fois que la période d'espacement des pluies est supérieure ou égale à 7 jours (seuil retenu pour parler de sécheresse), les cultures commencent à rencontrer d'énormes difficultés dans leur développement. Ces poches de sécheresse se rencontrent le plus fréquemment au mois de juin lors des années humides mais peuvent faire leur apparition pendant les mois les plus pluvieux comme juillet lorsque l'année est déficitaire en cumul pluviométrique. L'apparition de ces séquences sèches de longue durée au mois d'août est un des facteurs expliquant les baisses de rendement car le mois d'août correspond à la phase d'épiaison où la plante a besoin d'assez d'eau pour se développer. En utilisant le critère de Sivakumar, nous avons pu établir un calendrier des dates de début et de fin de saison. C'est ce que nous pouvons retenir est que dans la zone sahélienne, la date de début de la saison pluvieuse se situe généralement dans la 3^{ème} décade de juin alors que celle de fin de saison est localisée dans la période du 5 et le 30 octobre.

Mots clés :

1. Séquences sèches
2. Prévisions saisonnières
3. Paramètres agro-climatiques
4. Zone sahélienne
5. Variabilité Climatique

ABSTRACT

In a context of climatic variability, this study was conducted to propose some adaptation strategies in order to face the dry spell, and reduce the vulnerability of Sahelian producers. The localities that were studied are the Yatenga and the Bam, two provinces located in the Sahelian part of Burkina Faso. The meteorological dry spells were identified from a threshold at 1 mm. For this study, observation periods from 1961 to 2012 (Ouahigouya) and from 1960 to 2008 (Kougoussi) on pluviometric heights were used. The occurrence probabilities of these dry spells were computed from Markov chains and the results obtained allowed figuring out a set of dry sequences and their inter-annual previsions. Dry spells of short period (< 2 or even until 5 days) are recurrent but do not have significant impact on the cultivations. Indeed, with the good rains distribution, especially in the month of August, the available water stock is important enough to allow normal development of cultivations. But once the spacing between rains is larger than or equal to 7 days (dryness threshold retained), the cultivations begin to encounter enormous difficulties in their development. These dry spells are most frequently observed in June during wet years but can also appear within the rainiest months such as July when the year is loss-making in pluviometric cumulus. The appearance of these dry spells of long duration in August corresponds to the heading phase in which the plant needs enough water to develop. Using Sivakumar criteria, a calendar of the beginning and ending dates of the season has been established. It can be concluded that in the Sahelian zone, the beginning date of the rainy season is generally situated in the 3rd decade of June whereas the ending date of the season is positioned within the period between the 5th and the 30th of October.

Key Word:

1. Dry Spell
2. Seasonal forecast
3. Agro-climatic parameters
4. Sahelian area
5. Climate variability

LISTE DES ABRÉVIATIONS

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

AZND : Association Zood-Nooma pour le développement

BCER : Bassin de Collecte des eaux de ruissellement

CCREC : Centre Commun de Recherche Eau et Climat

CRDI : Centre de Recherche pour le Développement International

DGMN : Direction Générale de la Météorologie Nationale

ETP : Évapotranspiration Potentiel

ETR : Évapotranspiration Réel

IGB : Institut Géographique du Burkina

LEAH : Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau

OSS : Observatoire du Sahara et du Sahel

PICIC : Projet Irrigation de Complément et Information Climatique

RCM : Modèle Climatique Régional

RFU : Réserve Facilement Utilisable

RU : Réserve Utile

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Valeurs moyennes de réserve utiles selon Withers et Vipond (1974)	16
Tableau 2: Coefficient culturaux du maïs, mil et sorgho selon le cycle végétatif	17
Tableau 3: Valeurs de facteurs de tarissement de quelques cultures	18
Tableau 4: Calcul du nombre de jours secs significatifs pour le maïs	19
Tableau 5: Probabilités d'apparition des séquences sèches: Prévision 2013 Ouahigouya	30
Tableau 6: Fréquence des séquences sèches selon les distributions mensuelles: Ouahigouya.....	30
Tableau 7: Fréquence des séquences sèches selon les distributions mensuelles : Kongoussi	31
Tableau 8: Nombre de séquences sèches par mois selon les longueurs obtenus par RACMO (Prévision 2013 et 2014 de Kongoussi)	33
Tableau 9: Nombre de séquences sèches par mois selon les longueurs obtenus par RACMO (Prévision 2013 et 2014 de Ouahigouya).....	33

LISTES DES FIGURES

Figure 1: Carte de la province du BAM.....	10
Figure 2: Carte de la Province du Yatenga	11
Figure 3: Carte des précipitations du Burkina Faso.....	12
Figure 4: Répartition annuelles des pluies de la station de Ouahigouya, 1961-2012	14
Figure 5: Répartition annuelles des pluies de la station de Kongoussi : 1960-2008	15
Figure 6: Dates de début et de fin de saison à Ouahigouya pour la période de 1961 à 2012	23
Figure 7: Dates de début et de fin de saison à Kongoussi pour la période de 1960 à 2008.....	23
Figure 8: Distributions des probabilités empiriques et par les ajustements de Markov selon les différentes longueurs : Ouahigouya	24
Figure 9: Distributions des probabilités empiriques et par les ajustements de Markov selon les différentes longueurs : Kongoussi.....	25
Figure 10: Comparaison des probabilités d'avènements des séquences sèches entre Ouahigouya et Kongoussi.....	26
Figure 11: Comparaison des distributions des séquences sèches entre (1961-1971) et (1972-1982) : Ouahigouya	26
Figure 12: Comparaison des distributions des séquences sèches entre (1961-1971) et (1983-1993) : Ouahigouya	27
Figure 13: Comparaison des distributions des séquences sèches entre (1961-1971) et (1994-2004) : Ouahigouya	27
Figure 14: Comparaison des distributions des séquences sèches entre (1961-1971) et (1972-1982) : Kongoussi.....	28
Figure 15: Comparaison des distributions des séquences sèches entre (1961-1971) et (1983-1993) : Kongoussi.....	28
Figure 16: Comparaison des distributions des séquences sèches entre (1961-1971) et (1994-2004): Kongoussi.....	29
Figure 17: Relation entre le début de saison et la longueur de la saison : Ouahigouya.....	31
Figure 18: Relation entre le début de saison et la longueur de saison: Kongoussi.....	32

SOMMAIRE

DÉDICACES	II
REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ	IV
ABSTRACT	V
LISTE DES ABRÉVIATIONS	VI
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTES DES FIGURES	VIII
INTRODUCTION	1
I. PROBLÉMATIQUE	3
II. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	3
III. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	4
1. INTRODUCTION	4
2. INFORMATION CLIMATIQUE	4
3. MÉTHODES DE DÉTERMINATION DES DATES DE DÉBUT ET DE FIN DE SAISON	5
IV. MATÉRIELS ET MÉTHODES	9
1. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE	9
<i>Le Centre-Nord</i> :	9
<i>Le Nord</i> :	10
2. DONNEES.....	11
3. METHODES	13
3.1. <i>Dates de début et de fin de saison</i>	13
3.2. <i>Définitions des différents critères de détermination des débuts et fin de saison</i>	13
3.3. <i>Séquences sèches</i>	13
3.4. <i>Présentation de la méthodologie de détermination des séquences sèches par les chaînes de Markov</i>	19
V. RESULTATS	23
1. DATES DE DÉBUT ET DE FIN DE SAISON OBSERVÉES SELON LES CRITÈRES DE SIVAKUMAR DE LA STATION DE OUAHIGOUYA (1961-2012).....	23
2. DATE DE DÉBUT ET DE FIN DE SAISON OBSERVÉES SELON LES CRITÈRES DE SIVAKUMAR DE LA STATION DE KONGOUSSI (1960-2008) ...	23
3. PROBABILITÉS D'OCCURRENCES EMPIRIQUES ET CELLES DONNÉES PAR LE MODÈLE DE MARKOV POUR LE SEUIL DE 1MM: STATION DE OUAHIGOUYA :	24
4. DISTRIBUTION DES PROBABILITÉS D'OCCURRENCES EMPIRIQUES ET CELLES DONNÉES PAR LE MODÈLE DE MARKOV POUR LE SEUIL DE 1MM: STATION DE KONGOUSSI	25
5. COMPARAISON DES DISTRIBUTIONS DES PROBABILITÉS DES DIFFÉRENTES LONGUEURS DE SÉQUENCES ENTRE LA STATION DE OUAHIGOUYA ET DE KONGOUSSI	26
6. MISE EN ÉVIDENCE DES DE LA VARIATION DU CLIMAT : ÉVOLUTION DES SÉQUENCES SÈCHES SUR LES PÉRIODES OBSERVÉES.....	26
6.1 <i>Station de Ouahigouya</i>	26
6.2 <i>Station de Kongoussi</i>	28
7. PRÉVISION INTERANNUELLE DES SÉQUENCES SÈCHES SELON LEURS DIFFÉRENTES LONGUEURS	29
8. PRÉVISION DES SÉQUENCES SÈCHES POUR LA SAISON DE 2013 DE OUAHIGOUYA.....	30
8. FRÉQUENCE D'AVÈNEMENTS DES SÉQUENCES SÈCHES EN FONCTION DES MOIS : STATION DE OUAHIGOUYA (1961-2012).....	30
9. FRÉQUENCE D'AVÈNEMENT DES SÉQUENCES SÈCHES EN FONCTION DES MOIS : STATION DE KONGOUSSI (1960-2010)	31
10. RÉGRESSION LINÉAIRE ENTRE DÉBUT DE SAISON ET LA LONGUEUR DE LA SAISON	31
11. PRÉVISION DES PARAMÈTRES CLIMATIQUES DE OUAHIGOUYA ET KONGOUSSI À L'AIDE DU MODÈLE CLIMATIQUE RÉGIONAL RACMO.	32
VI. DISCUSSIONS ET ANALYSES	35

1. PARAMÈTRES DE LA SAISON AGRICOLE	35
2. SÉQUENCES SÈCHES	36
2.1. Distributions des probabilités d'occurrences des séquences sèches pour le seuil de 1mm	37
2.2 Variations des distributions de probabilités des séquences sèches.....	37
2.3 Incidence des séquences sèches sur les cultures céréalières (maïs, mil, sorgho)	38
CONCLUSION	39
VII. RECOMMANDATIONS-PERSPECTIVES	40
VIII. BIBLIOGRAPHIE	41
IX. ANNEXES	43

•

INTRODUCTION

Le Burkina Faso pays sahélien situé en Afrique de l'Ouest possède un climat de type tropical divisé en trois zones climatiques différentes : la zone soudanienne au Sud du pays, la zone soudano sahélienne au niveau du plateau central et la zone sahélienne au Nord. Le Produit Intérieur Brut repose essentiellement sur l'agriculture où 80 % de la population reste dépendante de ce secteur. Mais, depuis quelques décennies, avec l'apparition de plusieurs cycles de sécheresse (Sircoulon, 1976), cette agriculture est confrontée à d'énormes difficultés. Ces manifestations climatiques de grande ampleur ont conduit la communauté mondiale à effectuer des études sur la variabilité climatique et les changements climatiques (Soro et al., 2011).

Le phénomène de dérèglements climatiques auquel est confronté le Burkina Faso se manifeste sous diverses manières se traduisant soit par des inondations de très grande ampleur soit par des séries de sécheresses plombant les cultures pluviales. De plus l'apparition de plus en plus de sécheresses combinées aux actions anthropiques a entraîné la dégradation des ressources naturelles particulièrement les sols. (Ndong, 2003)

Outre les problèmes de famine et les impératifs de productivité et de compétitivité que peuvent engendrer les sécheresses fréquentes, la saison pluvieuse se traduit généralement par une succession de périodes humides et sèches de durée variable, Cette mauvaise répartition spatio-temporelle des précipitations se traduit par l'apparition de poches de sécheresse comme l'espacement entre deux jours de pluie supérieur au minimum à 7 jours. Ces poches de sécheresse entraînent de façon drastique la diminution des rendements sinon provoquer le non bouclage du cycle cultural.

Pour corriger ce déséquilibre pluviométrique, plusieurs techniques culturales ont été testées au Sahel. Il s'agit principalement des techniques de zaï, de demi-lune pour collecter les eaux de ruissellement, d'irrigation d'appoint en utilisant des bassins de rétention. Toutes ces techniques utilisées pour s'adapter aux phénomènes de changement climatique entrent en droite ligne avec l'utilisation des modèles climatiques régionaux.

Pour mieux comprendre l'impact de ces changements climatiques sur l'économie des pays sahéliens, plusieurs études ont été orientées sur la fréquence des événements climatiques extrêmes plus particulièrement les épisodes de sécheresse vu leur apparition et leur importance durant les saisons hivernales au Sahel. Certaines études comme celle de Karambiri, et al.,(2011) ont montré la

forte corrélation qui existe entre l'apparition de plus en plus fréquente de ces poches de sécheresse et les incertitudes sur les dates de début et de fin de la saison des pluies.

Cette étude dont le thème est «Prédétermination des séquences sèches et intérêt de l'information climatique sur la production céréalière en zone sahélienne» s'inscrit en droite ligne avec les différents travaux préalablement effectués dans le domaine notamment ceux d'*Epicum et al 1988*, *Sivakumar et al, 1988* qui ont travaillé sur plusieurs pays sahéliens afin de déterminer les dates de début et de fin de saison agricole.

Vu l'ampleur des changements climatiques au sahel burkinabè, le 2iE en collaboration avec plusieurs groupements villageois et partenaires public-privé a mis en place le projet « Irrigation de complément et information climatique (PICIC)» financé par le CRDI. Il vise principalement à réduire la vulnérabilité des paysans dans la zone sahélienne du Burkina Faso et d'améliorer la sécurité alimentaire dans un contexte de variabilité et de changements climatiques.

Outre la sécurité alimentaire et les impératifs de productivité et de compétitivité, l'une des préoccupations majeures de ce projet est d'assurer le développement d'une agriculture durable, qui produit plus en quantité et en qualité, mais aussi qui sauvegarde les ressources naturelles et protège l'environnement. Il s'agit en effet de l'un des buts essentiels recherchés à travers la nouvelle stratégie du développement de l'irrigation d'appoint, notamment l'économie et la valorisation de l'eau en irrigation, qui permettra de mieux rationaliser l'utilisation des ressources en eau.

I. PROBLÉMATIQUE

L'économie burkinabé est à dominance agricole. En effet, le secteur agricole représente en environ 40% du PIB (25% agriculture, 12% élevage, 3%, foresterie et pêche) et procure des emplois et revenus à l'immense majorité (86%) de la population. Il assure plus de 80% des recettes d'exportation et ses effets d'entraînement soutiennent les secteurs secondaire et tertiaire, renforçant ainsi la dynamique globale de l'économie nationale. Il s'agit d'une agriculture essentiellement extensive, largement dominée par les cultures pluviales. Malheureusement, c'est une agriculture qui est soumise à de nombreuses contraintes parmi lesquelles on peut citer :

- les aléas climatiques : tendance à l'aridification du climat au Nord, diminution de la période de croissance végétale de 20 à 30 jours et le déplacement des isohyètes (annexe n°13 et n°14 et n°15) de 100 mm vers le Sud par rapport aux années 60, pluviométrie caractérisée par de fortes irrégularités interannuelles et spatio-temporelles ;
- les sols qui sont en général peu profonds, avec des encroûtements superficiels favorisant le ruissellement, une faible capacité de rétention en eau et une faible teneur en matière organique. Ils sont soumis à une forte érosion hydrique et éolienne dans la zone sahélienne et montrent des signes d'épuisement.

II. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Cette étude a pour objectif de base la contribution à l'élaboration de stratégies d'adaptation aux effets des changements climatiques en vue de la sécurisation alimentaire. Plus spécifiquement il s'agira de :

- Identifier les différentes séquences sèches selon les critères définis pour une séquence sèche et éventuellement déterminer les longueurs potentielles des séquences sèches et leur probabilité d'occurrence de façon prospective par la méthode empirique et par l'ajustement des chaînes de Markov d'ordre 2 et 3.
- Analyser les séquences sèches en déterminant leur fréquence, leur influence sur les cultures selon les différentes phases de leur cycle végétatif.
- Procéder à une modélisation pour prédire l'évolution des séquences sèches.
- Recadrer les paramètres agro-climatiques et en élaborer une information climatique robuste sur les dates de début et de fin de saisons, aux paysans et aux acteurs du projet pour la planification de la campagne agricole.

III. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Introduction

Au Sahel, les dates de début et de fin de la saison de pluie varient d'une saison à une autre. Généralement le début de la saison pluvieuse est précédé d'une succession d'averses isolées avec une intermittence marquée par des séquences de jours secs d'une certaine durée (Seyni., et al., 2012) rendant difficile le début des semis. Quant à la date de fin, elle est conditionnée par l'importance de la saison. En effet, en année déficitaire les pluies s'arrêtent brusquement au mois de septembre alors qu'en année moyenne et humide, on peut avoir de la pluie jusqu'à la dernière décennie d'octobre. Pour s'adapter à de pareilles situations, les paysans sahéliens doivent disposer d'informations viables sur l'évolution du climat en vue d'utiliser les techniques culturales adéquates.

2. Information climatique

Une information climatique est une donnée observée ou calculée d'une variable climatique telle que la précipitation, la température de l'air ou de la mer, l'humidité relative de l'aire, l'insolation journalière, la vitesse du vent et l'évapotranspiration (Aquastat, 2012). Ce sont des paramètres climatiques qui peuvent être exploités dans plusieurs domaines notamment en médecine dans la conception des appareils de mesure et aussi évidemment dans le domaine agricole.

Les travaux de (Franquin, 1973) ont révélé l'importance d'élaboration d'une information climatique dans le sens où ; ce chercheur est arrivé à montrer que c'est une application à l'agriculture en temps différé ou réel de l'information de nature climatologique, météorologique ou statistique qui s'accumule avec le temps et que cette information renseigne notamment sur le risque climatique et s'adresse surtout à la planification de toutes les activités de caractère agricole à tous les niveaux à savoir l'échelle nationale, l'échelle d'exploitation, les services spécialisés de recherches.

Les différentes variables de l'information climatique, sont des éléments qui permettront le suivi agro-météorologique ou l'analyse des conditions climatiques et leur influence sur l'évolution des cultures et des pâturages. Ainsi une meilleure connaissance par exemple des paramètres de la saison agricole pourrait contribuer à l'amélioration des rendements agricoles. Quels sont les paramètres de la saison agricole qui sont pris en compte pour les différentes prévisions ?

En effet, la plupart des résultats obtenus à travers la documentation montraient que les auteurs se sont concentrés sur les dates de début et de fin de saison et aussi les fréquences d'apparition des séquences sèches au cours des saisons. Plusieurs méthodes ont été développées pour la détermination de ces paramètres.

Des modèles climatiques régionaux ont été mis en place à ce effet et d'autres auteurs comme Sivakumar, Erpicum, L. Ilunga & A. Mugiraneza ont élaboré des méthodes pour la détermination de ces mêmes paramètres.

3. Méthodes de détermination des dates de début et de fin de saison

Quelques chercheurs ont pu compiler les travaux de recherches et arriver à des méthodes de détermination des paramètres agro-climatiques de la saison agricole.

Sivakumar qui a élaboré sa méthode en 1987, considère comme début de saison la date à partir du 1^{er} Mai où l'on enregistre un cumul pluviométrique de 20 mm en trois jours consécutifs non suivis d'une séquence sèche de 7 jours durant les 30 jours qui suivent.

Pour la fin de saison c'est la date à partir du 1^{er} Septembre où l'on n'enregistre pas de pluie pendant deux décades.

Erpicum a élaboré une méthode statistique qui se base également sur des critères climatiques. Pour cet auteur la saison des pluies commence au moment où la probabilité d'avoir un jour de pluie au cours d'une «pentade» (période de cinq jours) déterminée est supérieure à celle d'avoir un jour sec appartenant à un épisode de sept jours.

Quant à la fin de saison de pluies, elle est fixée au jour où la probabilité d'avoir un jour sec appartenant à un épisode de sept jours est supérieure à celle d'avoir un jour de pluie au cours d'une «pentade».

Il existe quelques autres critères de détermination des dates de début et fin de saison comme le critère AP3A qui retient le critère suivant :

- Pour le début :

Date de contrôle de début de saison : 1 mai

Total pluie pour le démarrage : 20 mm,

Nombre de jour pour le recueillir : 3 jours

Nombre de jours secs significatifs : $n = P/1.8 + 1$ ($P > 36$ mm ; $n = 20$)

Seuil de pluie significatif : 0.1 mm

Durée de contrôle de sécheresse : 20 jours

- Pour la fin de saison :

Date de contrôle de la fin de saison : 1er septembre

Seuil de référence de pluie : 1,9 mm

Nombre de jours de pluie < 1,9 mm : 20 jours

Il y a aussi le critère DHC4 qui se présente comme suit :

Pour la date de semis, le démarrage des calculs a lieu systématiquement 30 jours avant la date de début de simulation, permettant de prendre en compte des pluies antérieures pour le calcul du stock d'eau dans le sol, celui-ci étant estimé initialement à 0 mm. Le stock en eau, disponible dans les 15 premiers cm de sol au moment du semis est alors calculé en tenant compte de l'évaporation du sol nu pendant la période située entre la date du début des calculs (pendant le début simulation) et la date de semis.

À partir de la date de début de simulation, on recherche la première date de semis possible c'est-à-dire quand le stock hydrique du sol est supérieur à 10 mm dans les 15 premiers cm de sol.

Le modèle teste alors la réussite du semis pendant les 20 premiers jours, en prenant comme critère de satisfaction des besoins en eau de la culture (ETR/ETM) supérieure à 0,5 pendant cette période. Si cette condition n'est pas remplie, le modèle recherche une autre date de semis possible pour laquelle le stock hydrique du sol est supérieur à 10 mm et le test de réussite du semis est répété.

La date de semis ainsi déterminée est celle du semis réussi en humide qui peut alors être identique à la première date de semis possible. Le semis a donc réussi dès les premières pluies, ceci correspond dans certains terroirs à la réussite des semis pratiqués en sec. Si les deux dates diffèrent, on peut penser que les semis, s'ils ont effectivement eu lieu ont probablement échoué, et que les paysans ont dû les refaire.

Une autre méthode qui permet de statuer à peu près la période propice des semis et aussi les périodes potentiellement sèches a été mise en œuvre par (Franquin, 1973). En effet le principe consiste à ne considérer dans le bilan hydrique du sol que quelques événements remarquables indépendants des conditions de sol et de végétation pour éviter toute ambiguïté (Franquin, 1973). Les périodes délimitées par ces événements sont à prendre en compte.

Il s'agit de construire sur une même figure des courbes de pluviométrie P et d'évapotranspiration potentielle afin de déterminer les positions de deux événements de nature purement climatiques. Pour la courbe des évapotranspirations il s'agit de deux courbes, une courbe qui représente les ETP et une autre qui représente les ETP/2. On note B1 et B2 les projections sur l'axe des temps des points d'intersection entre la courbe d'ETP et celle de la pluviosité et l'intervalle B1B2 délimitera la période humide caractérisée par la condition où la Pluviométrie P est globalement supérieure à l'évapotranspiration qui correspond en principe à l'évapotranspiration maximale de la culture. Cette période dite humide représente juste une portion de la saison humide définie, elle est distincte de la saison pluvieuse, car la période pendant laquelle le stock d'eau disponible dans une certaine profondeur de sol n'est pas nul. C'est donc une période caractérisée par la permanence d'eau disponible dans le sol, ainsi la saison humide proprement dite débutera donc au moment où le

déficit maximal du sol supposé nu commence à décroître sous l'effet des pluies. Il est noté A2. Cette période s'achève au moment noté C2 où ce déficit maximal se reproduira à nouveau, au moment où les cultures vont épuiser ces réserves utilisables. Les points A1 et C1 situent approximativement et respectivement la 1ère et la dernière pluie. C1 est l'intersection entre la courbe des temps et celle de la pluviométrie. Les événements remarquables sont donc les points A2, B1, B2, C2 qui découpent la saison humide en trois périodes. De plus on observe :

- A2B1 correspond à la période pré-humide pendant laquelle P est globalement inférieure à ETP (supérieure à ETP/2) : C'est la période propice pour les semis sans risque car en principe c'est le moment où le sol reconstitue son stock d'eau après une pluie efficace.
- A1A2 qui est la période antérieure est la période du semis dit « sec », qui se caractérise par des faux départs de la saison humide. C'est la période de la préparation des sols.
- B1B2 correspond à la période humide durant laquelle la pluviométrie P est globalement supérieure à ETP, ce qui conduit à une égalité entre ETR et ETM : Elle correspond à la période où les besoins en eau des cultures peuvent être satisfaits ou globalement car les effets du ruissellement ne permettent pas la recharge entière des sols. Mais il pourrait arriver que les déficits soient comblés par le drainage et aussi dans la zone exploitée par les racines.
- B2C2 est la période post-humide durant laquelle P redevient globalement inférieure à ETP, ETR et généralement à ETM au détriment des réserves accumulées dans le sol entre B1 et B2 : C'est la période durant laquelle se développe la fructification-maturation, durant cette période les sols auraient déjà été plus profondément humectés par l'excès d'eau de la période B1B2. Aussi en considérant la projection du point d'intersection entre la courbe de la pluviométrie et celle de ETP/2 noté D, sur l'axe des temps, on peut admettre que tant que les pluies après B2 ne sont pas inférieures à ETP/2, l'addition de la lame de ces pluies à celle puisée dans le sol par la culture permet à celle-ci de satisfaire son évapotranspiration maximale. La fin de la période de végétation active sera dans ce cas marquée par le point D.
- Par ailleurs le point B2 détermine la fraction utile de la floraison des plantes à type de floraison axillaire comme l'arachide, et pour des variétés comme le mil ou le sorgho, c'est au moment du point B2 qu'elles épient, cet événement représente donc pour la plupart des cas la fin de la période végétative active. Les phénomènes de fructification-maturation se déroulent après B2. Les méthodes ci-dessus citées permettront de déterminer les différentes dates probables de semis qui seront comparées avec celles observées au cours des années.

Toutes ces différentes méthodes et moyens permettent une prévision saisonnière en terme de calendrier agricole. Cette approche n'est pas suffisante car les poches de sécheresse doivent être

prises en compte pour permettre aux producteurs de prendre les dispositions nécessaires pour la sécurisation de leur production.

(Djoufack, 2011) À l'issue de ses travaux précise que les séquences sèches dans toutes ses composantes à savoir leur nombre, leur longueur, leurs périodes d'occurrence et les variations des dates de début et de saison des périodes végétatives modulent la variabilité annuelle.

IV. MATÉRIELS ET MÉTHODES

1. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le projet Irrigation de complément et information climatique piloté par 2iE sur financement du CRDI, a été lancé dans deux régions voisines situées au Burkina Faso, à savoir la région du Centre-Nord particulièrement dans la province du Bam, et celle du Nord notamment dans le Yatenga.

La province du Bam dont le chef-lieu est Kongoussi est accessible à partir de la route nationale n° 22 (RN22) à 110 km de la capitale Ouagadougou. Ouahigouya, capitale du Yatenga est relié à Ouagadougou par 180 km de bitume sur la route nationale n° 2.

Toute la zone d'étude est caractérisée par une forte dégradation des ressources naturelles due aux actions anthropiques et climatiques. L'agriculture y est de type extensif avec de faibles rendements (Barbier, et al., 2009).

Le Centre-Nord :

- Relief : Le relief de la région est constitué d'une vaste pénéplaine peu accidentée caractérisée par des formations de collines d'altitude moyenne comprise en 350 et 400 m.
- Les sols : Les sols dominants sont de types ferrugineux tropicaux composés de deux variantes à savoir des sols ferrugineux tropicaux peu profonds et lessivés sur les glacis et les plateaux et des sols ferrugineux tropicaux profonds au niveau des bas-fonds.
- Le climat : Le Centre-Nord est caractérisé par deux nuances climatiques répartie comme suit : Une zone climatique sahélo soudanienne et une sahélienne. Les précipitations varient entre 600 et 750 mm. La saison des pluies ne dure généralement pas plus de 4 mois dans la localité et les écarts de température y sont très remarquables avec des fortes amplitudes entre le jour et la nuit ((Bado & Zongo., 2009)).
- La végétation : Le climat conditionne la végétation mise en place dans une localité donnée. La végétation du Centre Nord est essentiellement constituée de savane arborée et de savanes aux hautes herbes qui ont tendance à remplacer les steppes d'épineux. Les espèces végétales généralement rencontrées dans la région sont entre autres le Karité, le Kapokier, le Baobab, le Tamarinier, la gomme arabique etc.

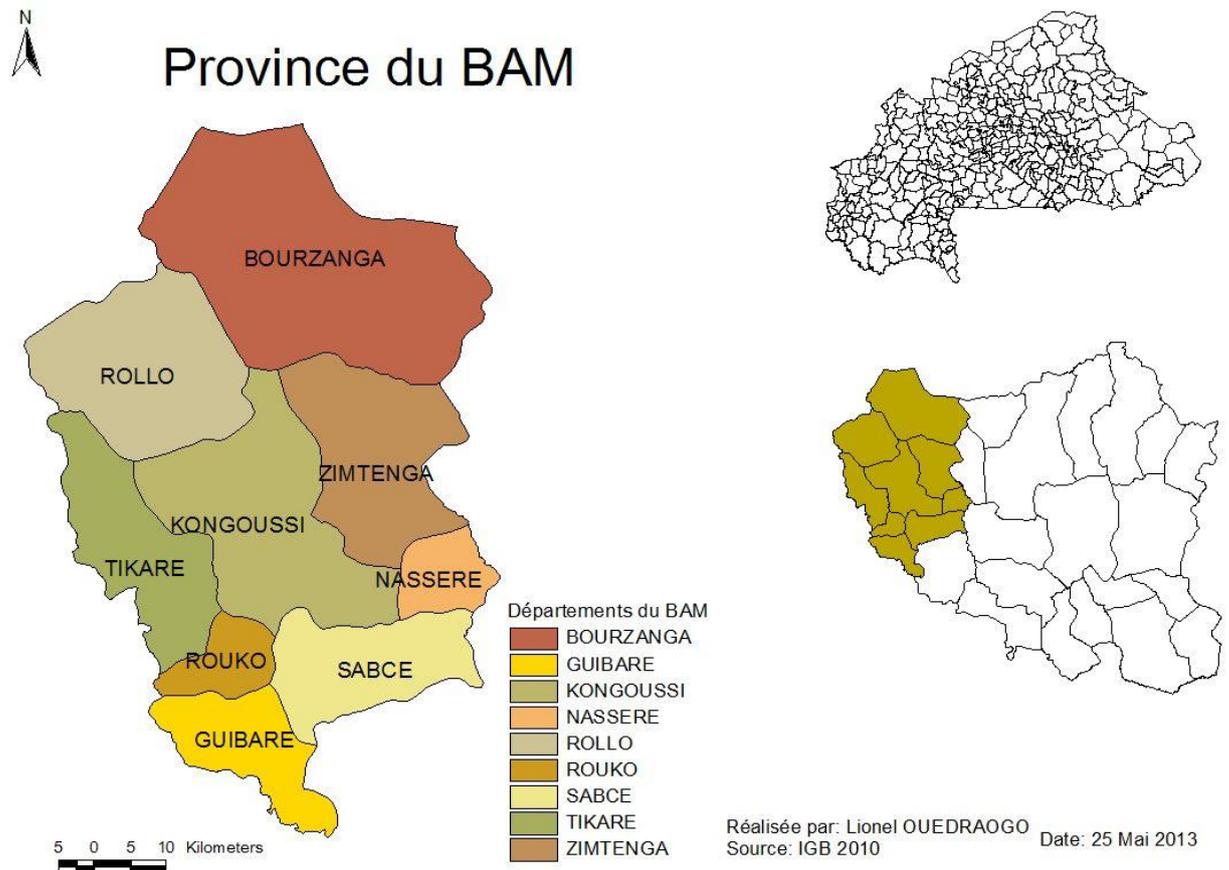


Figure 1: Carte de la province du BAM

Le Nord :

- Le Relief : Il est caractérisé par la prédominance des élévations variant de 200 à 400 mètres et aussi par la présence régulière de plaines et de plateaux.
- Les Sols : Il existe une diversité de sols dans la région du Centre Nord, mais les plus importants sont les lithosols sur cuirasse qui sont des sols superficiels, très peu épais, les sols ferrugineux appauvris qui sont assez profonds et présentent une texture sableuse, c'est le plus dominant dans la région. On y rencontre aussi des sols peu évolués qui ont une texture graveleuse à sableuse, qui ont une faible capacité de rétention en eau.
- Le Climat : Le climat correspondant à la région du Nord est le climat soudano-Sahélien qui caractérisé par une faible pluviosité et une alternance de deux saisons à savoir une longue saison sèche et une courte saison pluvieuse. Les précipitations y sont insuffisantes et irrégulières avec une pluviométrie annuelle allant de l'ordre de 600 à 700 mm.
- La Végétation : La végétation rencontrée au niveau de la région est constituée de quatre types de formations végétales notamment une formation de steppe, une brousse tigrée, une

savane arbustive et une savane arborée. On note la disparition de certaines espèces végétales ligneuse à cause des effets de la dégradation de l'environnement et du milieu physique.

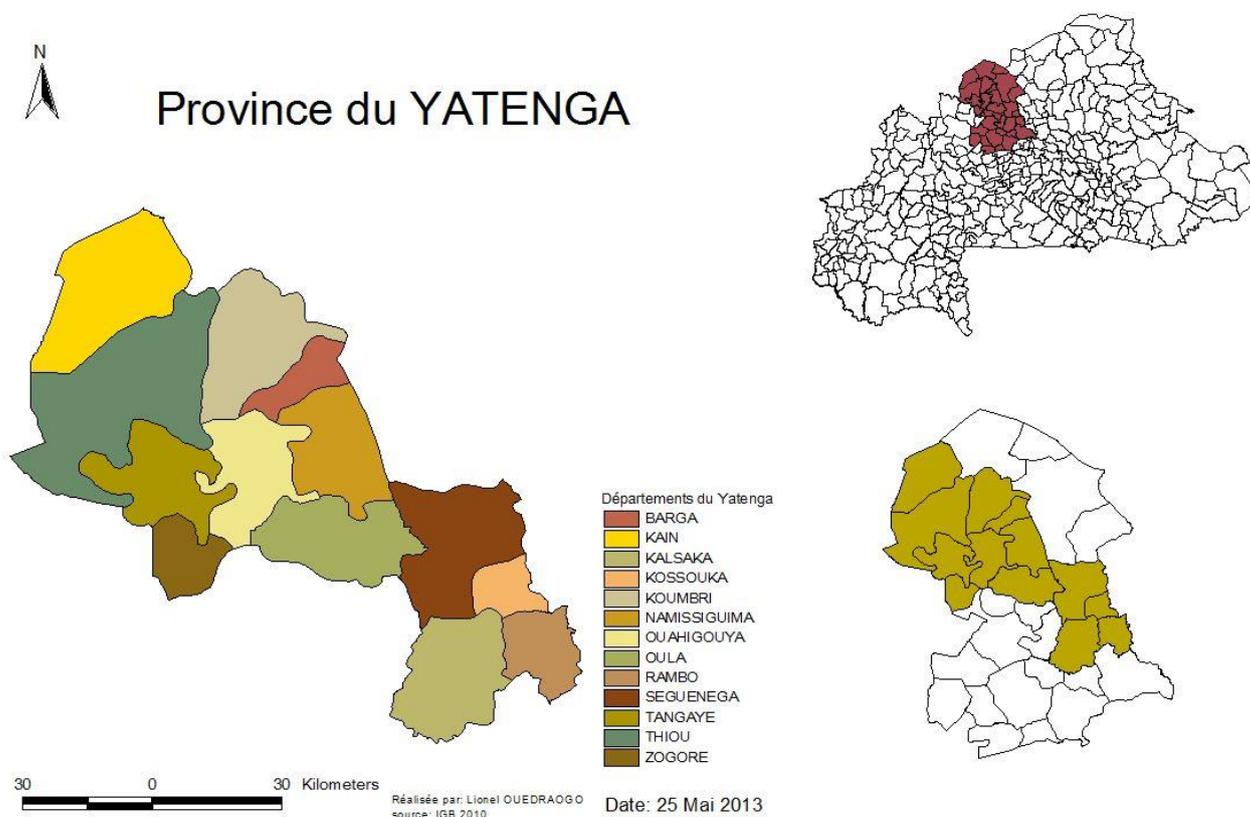


Figure 2: Carte de la Province du Yatenga

2. DONNEES

En effet dans le cadre de ce travail, il a été nécessaire de réunir des données de multiples sources afin de mener à bien la recherche. Il s'agit essentiellement des données météorologiques notamment les pluies journalières, les températures moyennes mensuelles, les humidités maximales et minimales, les évapotranspirations obtenues par la formule de PENMANN, toutes provenant de la station synoptique de Ouahigouya. Il y a aussi les pluies journalières du BAM, qui proviennent de la station agro-météorologique de Kongoussi. Les données de Ouahigouya s'étendent sur une série de 51 ans à savoir de 1961 à 2012 et celle de Kongoussi vont de 1960 à 2008. Ces différentes banques de données sont gérées par la Direction Générale de la Météorologie Nationale du Burkina Faso.

Carte des Précipitations du Burkina Faso

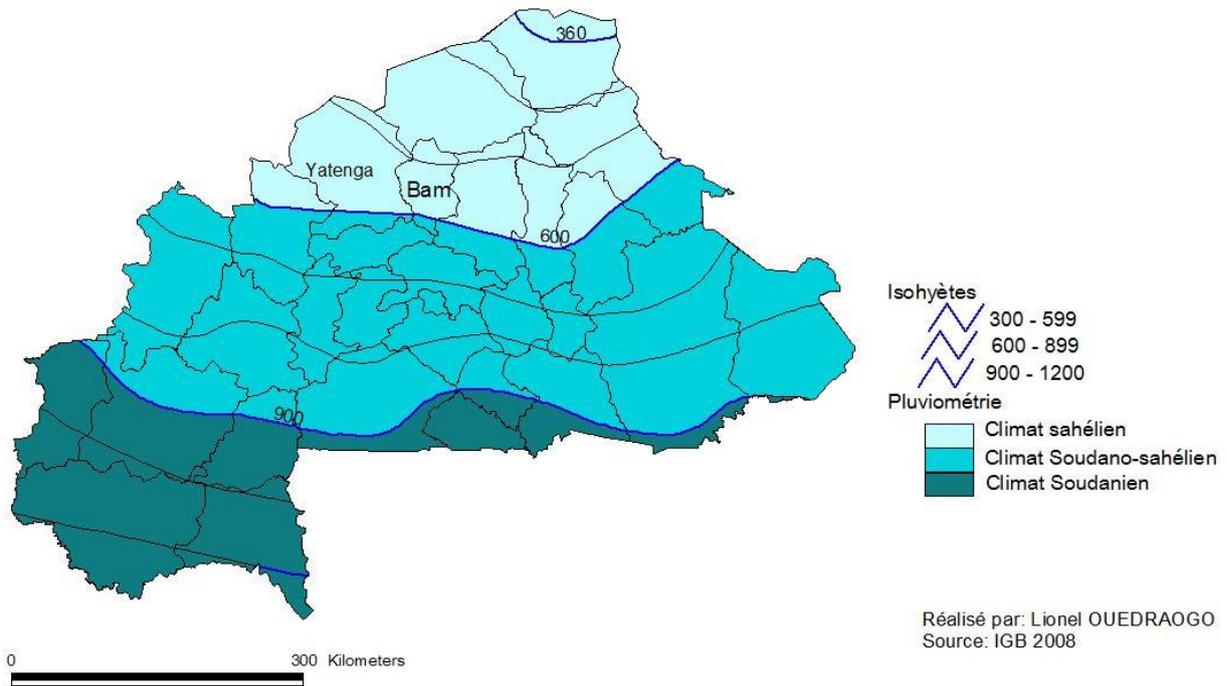


Figure 3: Carte des précipitations du Burkina Faso

3. METHODES

3.1. Dates de début et de fin de saison

Ce sont des éléments très importants dans la production agricole dans le sens où cela pourrait contribuer à minimiser l'impact des variations climatiques sur la production agricole. L'utilisation de la prévision saisonnière peut constituer une action d'adaptation aux changements climatiques et éventuellement conduire à une bonne marche vers la sécurité alimentaire. Les paramètres agro-climatiques sont le début, la longueur de la saison et éventuellement la fin de saison. Il existe une multitude de moyens ou de critères y compris les différents modèles climatiques régionaux, qui permettent de déterminer la date de début de saison en zone sahélienne surtout. Le critère retenu pour la détermination de ces paramètres est celui de Sivakumar de par sa simplicité de mise en œuvre, aussi par le fait qu'il est le plus utilisé en zone sahélienne et aussi parce qu'elle est une méthode agronomique.

3.2. Définitions des différents critères de détermination des débuts et fin de saison

Le début de saison selon Sivakumar correspond à la date X à laquelle une quantité de 20mm de pluies aura été recueillies en 3 jours consécutifs après le 1^{er} Mai sans période sèche supérieure à 7 jours dans les 30 jours qui suivent.

La fin de saison Y est le jour où, après le 1^{er} septembre, il n'y a plus de pluies pendant deux décades. La Longueur de la saison est obtenue tout simplement en effectuant la différence entre Y et X (Y-X)

3.3. Séquences sèches

Dans la conduite des travaux de cette étude, une démarche a été suivie afin de parvenir à des résultats utilisables.

Il s'agit surtout de calculer les probabilités d'occurrences des séquences sèches, parvenir à trouver leur fréquence d'avènement au cours de la saison agricole afin d'en déduire leur impact sur la production céréalière dans la zone étudiée et éventuellement trouver des moyens d'atténuation.

En premier, il est nécessaire de se baser sur une définition de ce que l'on considèrera comme poche de sécheresse avant d'élaborer un mode de calcul à adopter. Il faut donc situer le contexte dans lequel l'étude se trouve car en effet il existe bien des divergences entre la sécheresse et les poches de sécheresse.

Notion de sécheresse : La sécheresse se définit comme un déficit des disponibilités en eau par rapport à une situation considérée comme normale pour une période donnée et une région

déterminée (Benzarti & Habaieb, 2013). Il existe trois types de sécheresses selon des domaines d'applications. Il s'agit de la :

Sécheresse météorologique: Réduction, mauvaise répartition, ou encore absence de pluies dans une région donnée sur une période donnée. (Sokona, et al., 2009)

Sécheresse agronomique: Situation où l'humidité du sol et les réserves en eau deviennent insuffisantes pour satisfaire les besoins des cultures dans une région donnée. (Sokona, et al., 2009)

Sécheresse hydrologique: Écart d'approvisionnement en eau de surface et en eau souterraine par rapport à une normale sur une période donnée. (Sokona, et al., 2009)

Selon le contexte du présent travail, la sécheresse météorologique convient mieux à l'étude. En effet, la réduction des précipitations se ressent au niveau du milieu naturel. Étant donné que la sécheresse est une décroissance des disponibilités en eau pour une époque particulière et sur une région particulière, la notion de sécheresse est relative (Benzarti & Habaieb, 2013). C'est sur la base de cette assertion que notre étude a été axée sur la persistance de la sécheresse à l'échelle annuelle. Compte tenu du fait que l'on ne dispose pas d'indicateur officiel de sécheresse, nous avons effectué une représentation des pluies annuelles des différentes stations, simultanément avec un graphe qui représentera la moyenne annuelle pluviométrique de toute la série et de chaque site. Ce qui a permis d'illustrer les années sèches qui sont les années dont la valeur de la somme des pluies de toute l'année se trouve en dessous de la courbe de la moyenne, et logiquement les années humides celles qui seront en dessus.

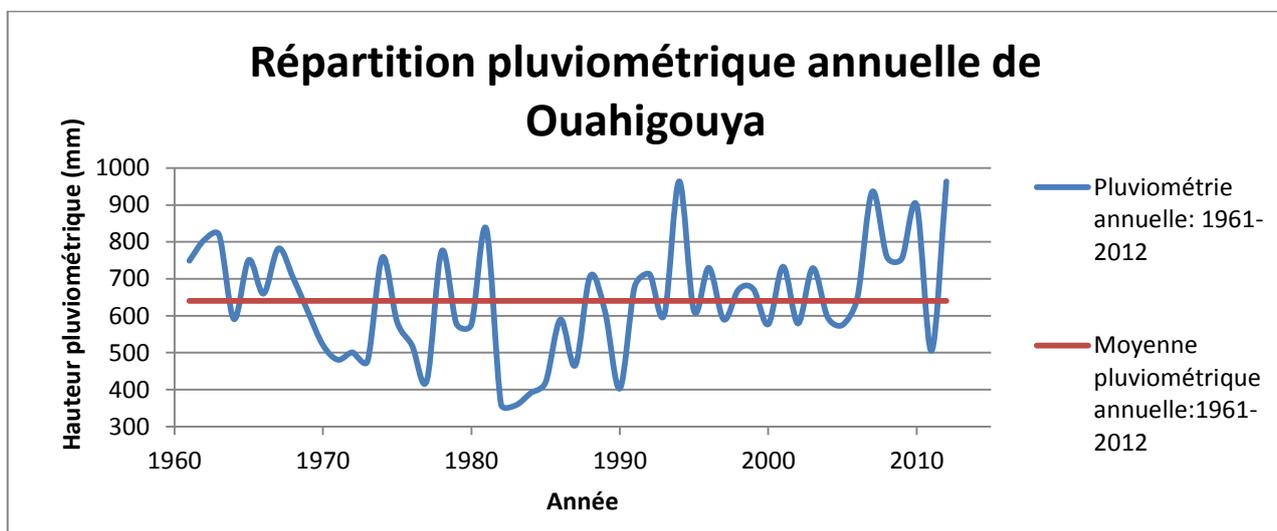


Figure 4: Répartition annuelles des pluies de la station de Ouahigouya, 1961-2012

La figure 4 montre que la pluviométrie au niveau de Ouahigouya. La moyenne annuelle est d'environ 630 mm et on observe dès 1970, une baisse de la pluviométrie qui va jusqu'en 1990, qui

est la période de manifestation des différentes variabilités climatiques sur la surface du globe et traduites en zone sahéliennes par des sécheresses récurrentes.

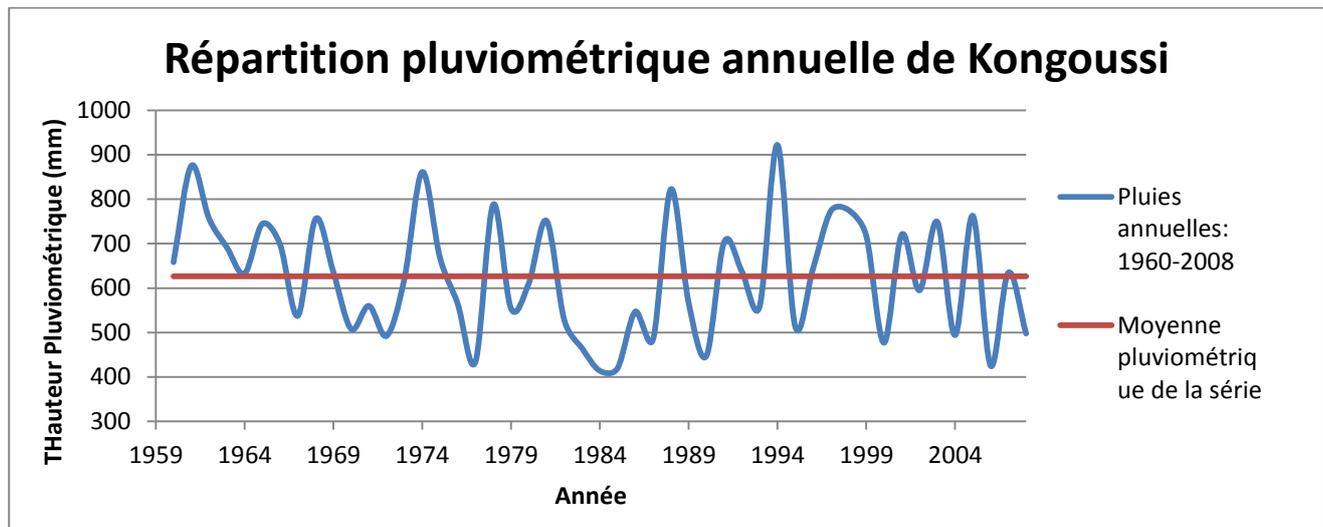


Figure 5: Répartition annuelles des pluies de la station de Kongoussi : 1960-2008

La figure 5 représente la pluviométrie de Kongoussi sur une période d'observation d'une durée de 48 ans (1960-2008). On remarque une très forte variabilité de la répartition pluviométrique dans le temps. Vers la fin des années 1960, il y a une baisse de la pluviométrie. La pluviométrie moyenne est de 626 mm, ce qui justifie sa situation dans la zone sahélienne du Burkina Faso, caractérisée par des sécheresses.

Quant à la séquence sèche, encore appelée poche de sécheresse ou pause pluviométrique, elle n'a pas une définition universelle, car varie selon le domaine auquel elle est appliquée ou encore le paramètre auquel elle est affecté. Dans le cadre de cette étude, est considéré comme séquence sèche, un épisode de manque d'eau plus ou moins long séparé par deux pluies pouvant affectée la flore et les sols.

Ainsi, pour attribuer une définition à une poche de sécheresse on a tenu compte de plusieurs paramètres, notamment la région climatique dans laquelle on se trouve pour éventuellement fixer le seuil de pluie à partir duquel on pourrait parler de pluie significative. Aussi, la pédologie de la localité rentre en jeu, du moment qu'une même quantité de pluie tombée dans les même conditions peut ne pas avoir le même impact sur deux localités ayant de sols différents. Les spéculations à mettre en terre interviennent aussi dans cette démarche pour l'aboutissement à la définition de la séquence sèche dans cette étude.

Région climatique : La zone climatique est à considérer, puisque les précipitations ne sont pas les mêmes dans toutes les régions. Ouahigouya et Kongoussi se trouvent dans la zone sahélienne qui est caractérisé par une faible pluviométrie (moyenne annuelle inférieure à 650 mm). Une pluie inférieure ou égale à 1mm est considérée comme une pluie non significative, c'est-à-dire une pluie dont l'effet sur les sols ou l'état des cultures est négligeable. L'évapotranspiration est aussi considérée selon la zone climatique, car elle représente la partie des eaux de pluie qui s'évapore soit directement sous l'effet des variations de température et de l'ensoleillement, soit indirectement sous l'action des plantes (transpiration propre et photosynthèse) (Réseau eau france, 2012). L'évapotranspiration recouvre les notions d'ETP (potentielle) et d'ETR qui est la quantité d'eau réellement évaporée tenant compte des déficits ponctuels des sols en eau)

Pédologie : Les types de sols rencontrés dans la localité n'influent pas directement sur la quantité de pluies à considérer, mais au niveau des cultures, car selon que le sol soit argileux ou sableux, la capacité de rétention d'eau est différente, de même que l'infiltration ou encore le coefficient de ruissellement. La texture et la réserve utile (RU) Sont les propriétés du sol qui ont été pris en compte dans cette étude. La réserve utile d'un sol est la quantité d'eau que peut absorber un sol et qui peut être restituée ensuite à la plante. La RU est composée de la Réserve Facilement Utilisable (RFU) et de la réserve de survie. En effet, les plantes puisent généralement en 1^{er} lieu la RFU et par la suite la réserve de survie en diminuant leur activité d'évapotranspiration, afin de survivre. La zone d'étude est majoritairement constituée de sols sableux et argilo-sableux, la réserve utile de ses types de sols est consignée dans le tableau 1:

Tableau 1: Valeurs moyennes de réserve utiles selon Withers et Vipond (1974)

	Types de sols	valeurs
RU (mm/m)	Sableux	55
	Sable fin	80
	Sablo-limoneux	120
	Argilo-limoneux	150
	Argileux	235

Les spéculations: Les cultures considérées sont le maïs, le mil et le sorgho, car elles sont les céréales les plus cultivées dans la zone. En effet, ces céréales sont dans les habitudes alimentaires de la localité et sont mieux adaptées aux sols peu fertiles des zones semi-arides. Les spéculations interviennent à ce niveau dans le sens où il faut trouver la durée de la séquence sèche pour laquelle

à la plante pourrait atteindre le point de flétrissement. Les plantes a ses résistent différemment aux différents aléas climatiques auxquels elles sont exposées. Aussi, une simulation a été faite pour parvenir à trouver pour chaque culture, la durée maximale de jours sans pluie pour laquelle il n'y a pas de risque de stress hydrique.

Procédure:

- **Données utilisées:** Il s'agit des pluies et des ETP décadaires de 1961 à 2010 de la station de Ouahigouya. En effet, Kongoussi ne dispose pas d'une station synoptique donc l'obtention des données ETP n'est si aisée, ainsi pour la simulation nous considérons juste les données de Ouahigouya pour les deux localités. Les mois de Mai jusqu'en Septembre ont été considérés. La moyenne des différentes décades de chaque mois a été faite sur toute la série, de même que pour les ETP.
- **Coefficient cultural:** À chaque culture est associé un coefficient cultural selon la phase de du cycle de celle-ci. Le tableau 2 illustre les différents coefficients culturaux du maïs, du mil et du sorgho selon les phases du cycle végétatif.

Tableau 2: Coefficient culturaux du maïs, mil et sorgho selon le cycle végétatif

Spécificité culturale	Durée du cycle	Coefficient cultural Kc en fonction du stade végétatif			
		Initial	croissance	mi saison	récolte
Maïs (grain)	140 (25/40/45/30)	0,40	0,75	1,15	0,70
Mil	105 (15/25/40/25)	0,35	0,70	1,10	0,65
Sorgho	120 (20/30/40/30)	0,35	0,75	1,10	0,65

Source : (Phocaidès, 2008)

On constate que le maïs le mil et le Sorgho ont des coefficients culturaux assez semblables. Nous avons considéré une valeur de $Kc=1.15$ pour les trois cultures.

- **Profondeur d'enracinement (Zr):** La valeur de la profondeur d'enracinement du maïs, mil et sorgho sont respectivement 1.1 ; 1.3 et 1.7. et la valeur retenue pour la suite du cheminement est **1.2m**
- **Facteur de tarissement(p):** Il est obtenu en croisant les valeurs de l'évapotranspiration de la journée avec le groupe de culture dont il s'agit selon le tableau 3.

Tableau 3: Valeurs de facteurs de tarissement de quelques cultures

Groupe	Valeurs d'Etm (mm/jr)								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.500	0.425	0.350	0.300	0.250	0.225	0.200	0.200	0.175
2	0.675	0.575	0.475	0.400	0.350	0.325	0.275	0.250	0.225
3	0.800	0.700	0.600	0.500	0.450	0.425	0.375	0.350	0.300
4	0.875	0.800	0.700	0.600	0.550	0.500	0.450	0.425	0.400
Groupe	Spécifications								
1	Oignon, poivre, pomme de terre								
2	Banane, chou, vigne, pois, tomate								
3	Luzerne, haricot, citron, arachide, pomme, tournesol, pastèque, blé								
4	Coton, maïs, olive, carthame, sorgho, soja, betterave sucrière, canne à sucre, tabac								

Source: (Keita, 2010)

Les facteurs de tarissement obtenus varient de 0.4 à 0.6 selon l'Etm du jour.

Calculs : Les calculs suivants ont été appliqués et les résultats sont au niveau du Tableau N°4

$$ETm(mm/jr) = Kc \times ETP$$

$$RFU(mm) = p \times RU(mm) = p \times Zr(m) \times RU(mm/m)$$

L'*ETm* correspond aux besoins en eau brutes du fait que l'on considère qu'il n'y a pas d'apport d'eau, l'eau disponible sera juste la RFU du sol. Disposant que des besoins en eau journaliers et de la réserve en eau disponible, on calcule le temps pendant lequel la plante pourra bénéficier de l'eau en effectuant le rapport entre la RFU et l'*ETm* journalier :

$$T(jours) = \frac{RFU(mm)}{ETm(mm/jr)}$$

Tableau 4: Calcul du nombre de jours secs significatifs pour le maïs

Décade	Mai			Juin			Juillet			Août			Septembre		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Moyenne ETP décadaires (1961-2010)	62. 5	66. 9	71. 9	57. 7	58. 8	54. 4	48. 6	48. 9	50. 1	41. 4	44. 4	49. 9	42. 8	49. 3	53. 8
Coefficient cultural K_c	1.1 5	1.1 5	1.1 5												
Profondeur d'enracinement $Z_r(m)$	1.1 5	1.1 5	1.1 5												
ETM (mm)	72	77	82. 8	66. 4	67. 7	62. 6	55. 9	56. 3	57. 7	47. 6	51. 1	57. 4	49. 3	56. 7	61. 9
RU (mm/m)	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
RU (mm)	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66
p (facteur de tarissement)	0.5	0.4 5	0.4 5	0.5	0.5	0.5 5	0.5 5	0.5 5	0.5 5	0.6	0.6	0.5 5	0.6	0.5 5	0.5 5
RFU (mm)	33	29. 7	29. 7	33	33	36. 3	36. 3	36. 3	36. 3	39. 6	39. 6	36. 3	39. 6	36. 3	36. 3
ETM (mm/jr)	7.2	7.7	8.2 8	6.6 4	6.7 7	6.2 6	5.5 9	5.6 3	5.7 7	4.7 6	5.1 1	5.7 4	4.9 3	5.6 7	6.1 9
Temps avant rupture de stock de la RFU (jours)	5	4	4	5	5	6	6	6	6	8	8	6	8	6	6

Le tableau 4 indique que sur les sols sableux, la durée de stock d'eau est faible et qu'au bout de 4 jours la RFU est totalement épuisée. Selon ce même tableau, nous pouvons conclure qu'une séquence sèche supérieure à 4 jours constitue un risque de baisse des rendements du maïs surtout pendant la phase d'épiaison où il pourrait atteindre le point de flétrissement. Quant aux autres céréales comme le sorgho et le mil, elles résistent mieux à ces pauses pluviométriques.

3.4. Présentation de la méthodologie de détermination des séquences sèches par les chaînes de Markov

La méthode par les chaînes de Markov a été appliquée pour déterminer la persistance de la sécheresse à l'échelle journalière. En effet étant donnée une journée quelconque donnée sèche ou non et précédée par une journée sèche ou pas, on peut se demander quelle est la probabilité d'avoir une journée sèche la journée suivante ou encore une journée humide.

Le processus exprime des probabilités conditionnelles de passage de l'état de la veille à l'état de la journée en cours. Ainsi l'état de la journée t ne dépend que de l'état $t-1$ pour le processus de

Markov d'ordre 1. Éventuellement, il dépendra des états t-1 et t-2 pour le processus de Markov d'ordre 2 et la même logique est suivie pour les ordres supérieurs.

La justification de l'utilisation de la chaîne de Markov dans ce cas s'explique par le fait que les rétroactions du système terre-atmosphère permettent d'admettre que chaque nouvelle réalisation d'un évènement au temps t dépend des réalisations antérieures (Afouda., et al., 1997). C'est donc un outil statistique parmi tant d'autres qui permet de calculer la probabilité d'occurrence d'un évènement à un instant donné, sachant qu'il s'est produit l'instant avant. La détermination des probabilités d'avènement amène à considérer les précipitations comme des processus stochastiques survenant de manière aléatoire (Fodé., et al., 1993).

L'établissement d'un modèle statistique est nécessaire pour l'application des chaînes de Markov: Il se définit selon les relations suivantes:

- Considérons une séquence de n jours consécutifs : Soit x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) une série n variables aléatoires prenant les valeurs $x_i = d$ (dry = sec) et $x_i = w$ (wet = humide). Ainsi par exemple $x_2 = d$ signifie que le second jour de la séquence est sec et $x_5 = w$ signifie que le 5^e jour est humide.
- Soit $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ la probabilité que la séquence (x_1, x_2, \dots, x_n) se réalise c'est-à-dire que $P(x_1)$ est la probabilité que l'évènement du jour n-1 de la séquence se produise et ainsi de suite jusqu'à l'ordre n.

L'application de la propriété de Markov à l'ordre 2 conduit à l'écriture suivante :

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = P(x_1) \times P(x_2/x_1) \times P(x_3/x_2, x_1) \times \dots \times P(x_n/x_{n-2}, x_{n-1})$$

Cette équation permet de calculer les différentes probabilités de combinaisons contenues dans la séquence. Ainsi pour déterminer l'état (pluvieux ou sec) d'un jour donné l'on se réfèrera sur l'état des deux jours précédents. À l'ordre 3, logiquement l'état des trois jours précédents permettront de prévoir l'état du jour dont il s'agit.

La chaîne de Markov du 2nd ordre nécessitera la détermination du nombre de séquences sèches de longueur supérieure ou égale à deux jours. Comme annoncé plus haut une séquence sèche est d'office un temps sans précipitation ou encore avec précipitation n'atteignant pas le seuil fixé pour l'étude. La notation sera adoptée dans le reste du raisonnement de l'étude :

- (wd) définie un jour sec précédé d'un jour pluvieux et sa probabilité sera noté P_{wd}

Ainsi l'expression qui permettra d'avoir la probabilité d'avoir deux jours secs encadrés de pluies est la suivante:

$$P_{wddw} = P(d/dw) \times P(w/dd)$$

Avec $P(d/dw)$ = la probabilité d'avoir un jour sec sachant que la veille c'était sec et l'avant-veille humide ; $P(w/dd)$ = La probabilité d'avoir un jour pluvieux sachant que les deux jours d'avant étaient secs. $P_{wddw} = P_{wdd} \times P_{ddw}$, elle sera noté q_2 .

Les probabilités d'avoir 3 jours et 4 jours secs encadrés de pluies sont respectivement q_3 et q_4 et sont données par les expressions suivantes :

$$q_3 = P_{wddd} = P(d/dw) \times P(d/dd) \times P(w/dd) = P_{wdd} \times P_{ddd} \times P_{ddw}$$

$$q_4 = P_{wdddd} = P(d/dw) \times P(d/dd) \times P(d/dd) \times P(w/dd) = P_{wdd} \times P_{ddd}^2 \times P_{ddw}$$

Lorsqu'on généralise, en considérant pour n jours secs, on obtient :

P_{wdd} Correspond à la probabilité d'avoir un jour sec sachant que la veille et l'avant-veille étaient respectivement sec et pluvieux. Comme il s'agit de probabilité conditionnelle sera l'évènement complémentaire serait donc avoir un jour pluvieux avec le même état initial à savoir jour sec précédé de jour pluvieux. En d'autres termes les évènements «avoir deux jours secs après un jour pluvieux » et « avoir un jour sec encadré de deux pluies sont des évènements complémentaires, la somme de leur probabilité vaut 1. Ainsi $P_{wdd} = 1 - P_{wdw}$

P_{ddd} Est la probabilité d'avoir un jour sec après deux jours secs et puisque selon les chaînes de Markov d'ordre 2, l'état d'un jour donné ne dépend que ceux des deux jours précédents, les évènements(ddd)et(wddd) sont équivalents donc $P_{ddd} = P_{wddd}$. Pourtant (wddd) est l'évènement complémentaire de(wddw). Donc $P_{wddd} = P_{ddd} = 1 - P_{wddw}$

$P_{ddw} = P_{wddw}$ Parce que selon la même logique des chaînes de Markov à l'ordre 2, l'état d'un jour donné ne dépend que de ceux des deux jours précédents.

En conclusion, pour les chaînes de Markov du 2^{ème} ordre, la probabilité qu'une séquence sèche dure n jour est donnée par la relation :

$$q_n = (1 - P_{wdw})(1 - P_{wddw})^{n-2}(P_{wddw})$$

Pour les chaînes de Markov à l'ordre 3:

$$q_n = (1 - P_{wddw})(1 - P_{wddd})^{n-3}(P_{wddd})$$

Les différentes probabilités contenues dans l'expression des chaînes de Markov du second et du 3^e ordre sont calculées de manières empiriques:

$$P_{wdw} = \frac{\text{Nombre de séquences wdw}}{\text{Nombre de séquences wd ...}}$$

$$P_{wddw} = \frac{\text{Nombre de séquences wddw}}{\text{Nombre de séquences wdd ...}}$$

$$P_{wdddw} = \frac{\text{Nombre de séquences wdddw}}{\text{Nombre de séquences wddd ...}}$$

Ainsi pour les probabilités empiriques la probabilité qu'une séquence sèche dure n jours est donnée

par :

$$q_n = \frac{\text{Nombre de séquences de n jours secs}}{\sum_{i=1}^{30} \text{Nombre de séquence } \underbrace{\text{wd.....dw}}_{i \text{ fois}}}$$

La démarche a consisté à identifier les séquences sèches selon les critères établis plus haut et effectuer les différents calculs pour faire ressortir les distributions de probabilités.

V. RESULTATS

1. Dates de début et de fin de saison observées selon les critères de Sivakumar de la station de Ouahigouya (1961-2012)

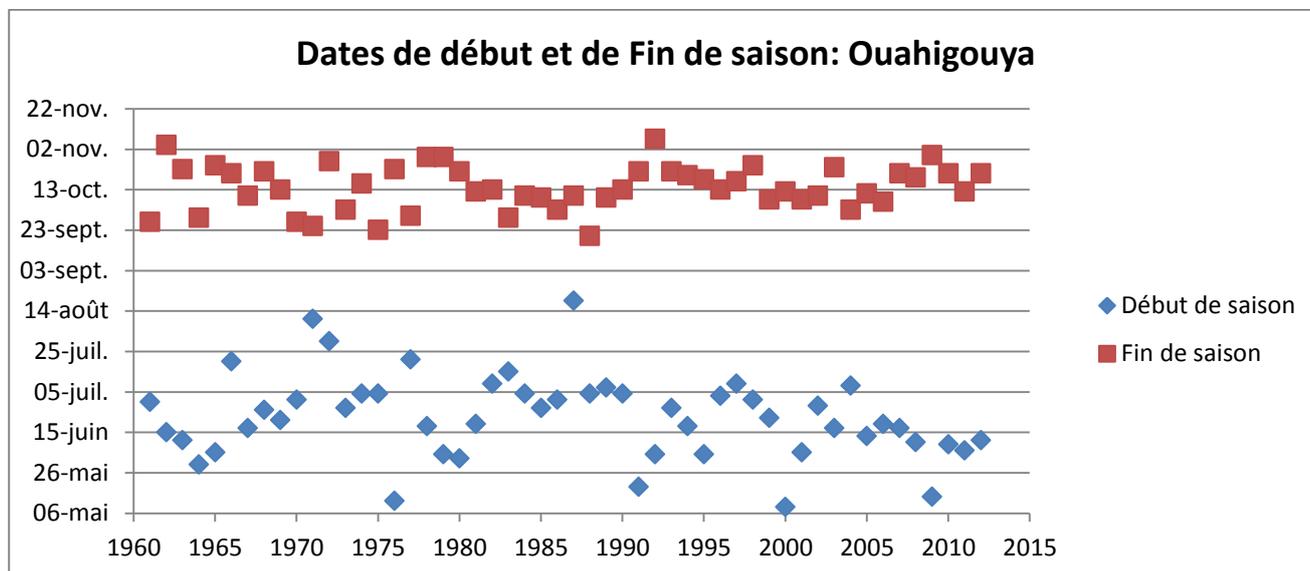


Figure 6: Dates de début et de fin de saison à Ouahigouya pour la période de 1961 à 2012

2. Date de début et de fin de saison observées selon les critères de Sivakumar de la station de Kongoussi (1960-2008)

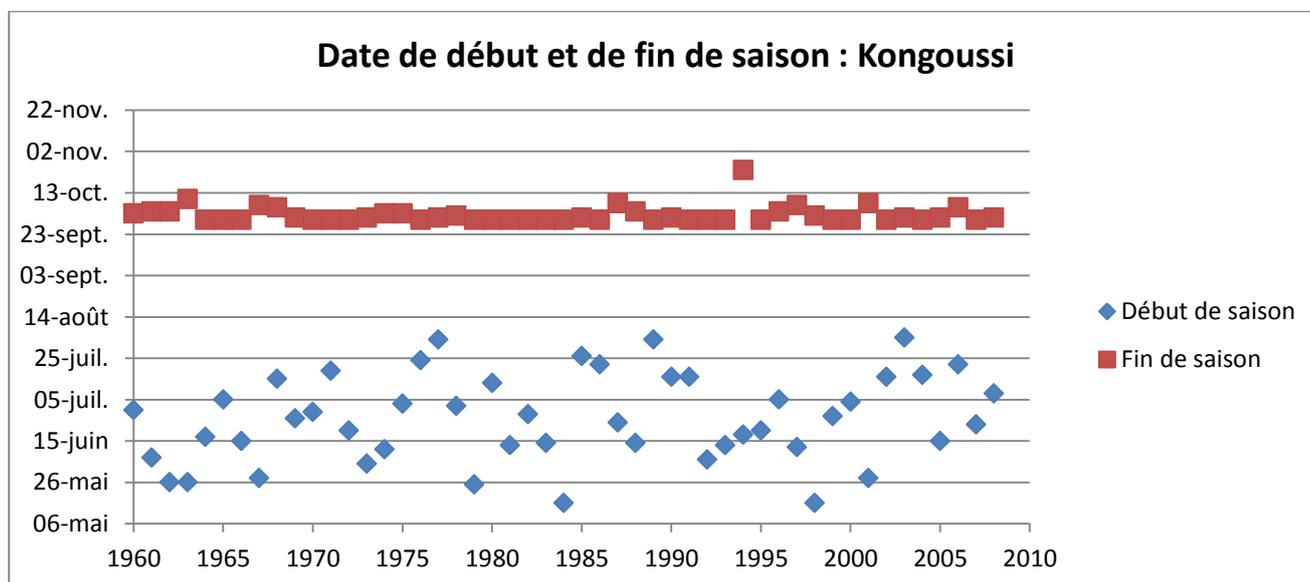


Figure 7: Dates de début et de fin de saison à Kongoussi pour la période de 1960 à 2008

Les figures 6 et 7 représentent les dates de début et de fin de saison observées dans la localité de Ouahigouya sur une période allant de 1961 à 2012 et de Kongoussi pour la période allant de 1960 à

2008. . On observe que les dates de début de saison sont variables d'une année à l'autre et d'une région à l'autre. Les dates de fin de saison sont plus ou moins stables.

3. Probabilités d'occurrences empiriques et celles données par le modèle de Markov pour le seuil de 1mm: Station de OUAHIGOUYA :

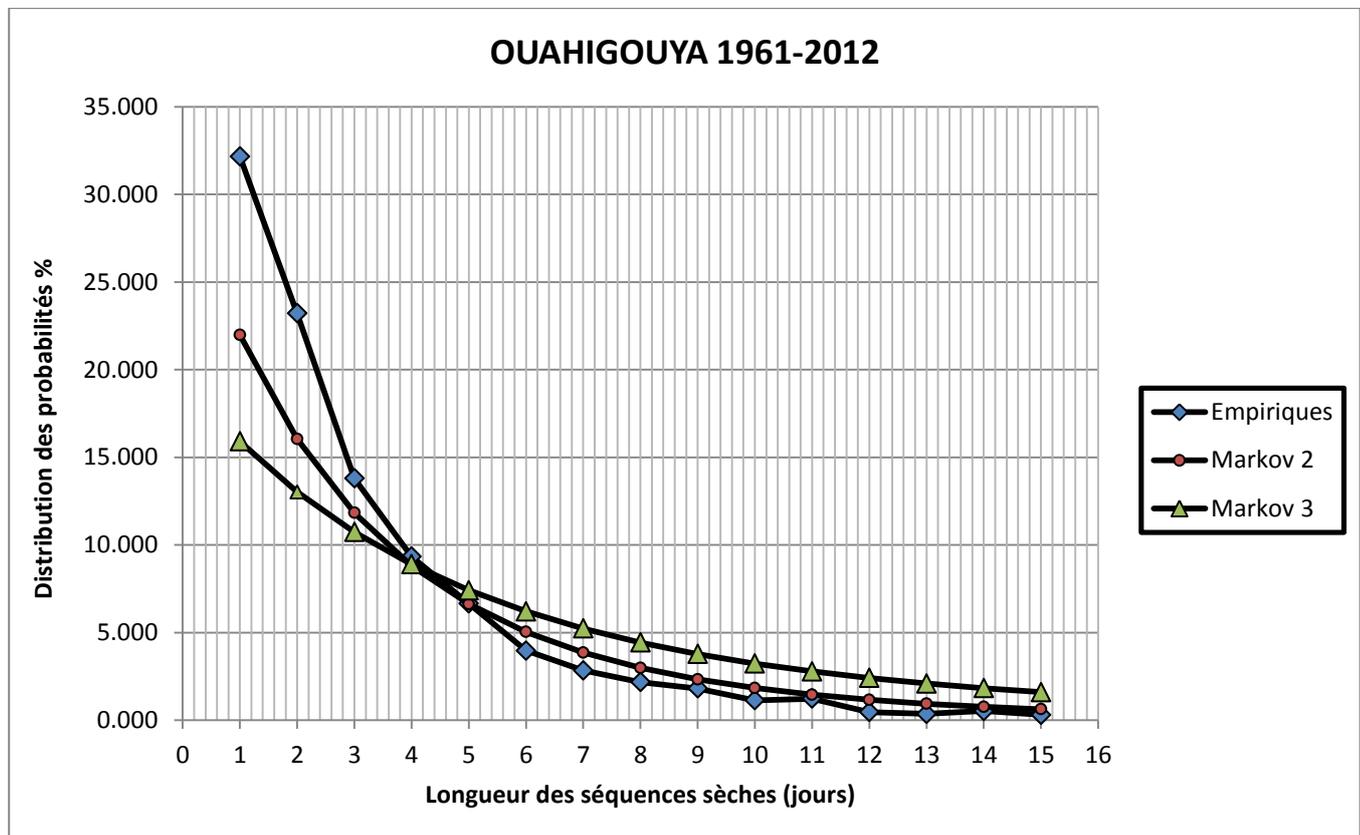


Figure 8: Distributions des probabilités empiriques et par les ajustements de Markov selon les différentes longueurs : Ouahigouya

Les distributions des probabilités d'apparition des séquences sèches en fonction de leur longueur sont consignées dans la figure 8. Les probabilités ont été calculées avec les ajustements de Markov et empiriques. Les séquences sèches de longues durées ont des probabilités faibles ($< 5\%$). Les plus fortes valeurs de probabilité sont rencontrées pour les séquences sèches de courte durée. Les probabilités empiriques estiment les chances d'apparition des séquences sèches de courte durée (< 7 jours) en moyenne 32% . Pour les autres ajustements, elles sont nettement inférieures. Les chaînes de Markov d'ordre 3 donnent les valeurs de probabilités les plus élevées pour les séquences sèches de longueur supérieure à 7 jours.

4. Distribution des probabilités d'occurrences empiriques et celles données par le modèle de Markov pour le seuil de 1mm: Station de KONGOUSSI

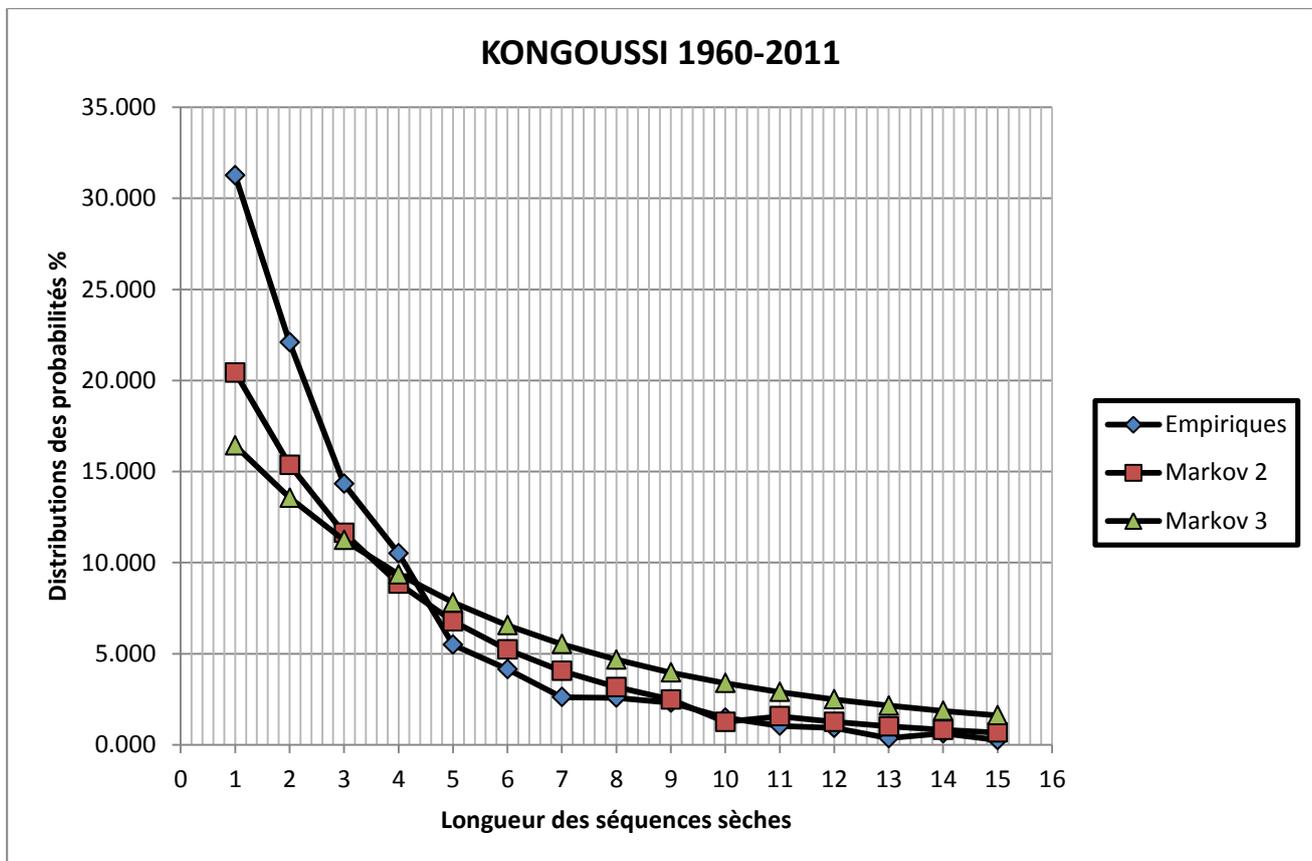


Figure 9: Distributions des probabilités empiriques et par les ajustements de Markov selon les différentes longueurs : Kongoussi

La figure 9 représente les distributions des probabilités d'apparition des séquences sèches en fonction de leur longueur pour la station de Kongoussi. Les différents constats au niveau de Ouahigouya réapparaissent. On observe une surestimation des probabilités d'apparition des séquences sèches de courte durée par les ajustements empiriques. Les chaînes de Markov d'ordre 3 surestiment par contre les probabilités des séquences sèches de longue durée. La répartition de ses séquences sèches est similaire à celle de Ouahigouya. Les plus faibles valeurs se rencontrent au niveau des séquences de longue durée et les plus fortes au niveau des courtes durées.

5. Comparaison des distributions des probabilités des différentes longueurs de séquences entre la station de Ouahigouya et de Kongoussi

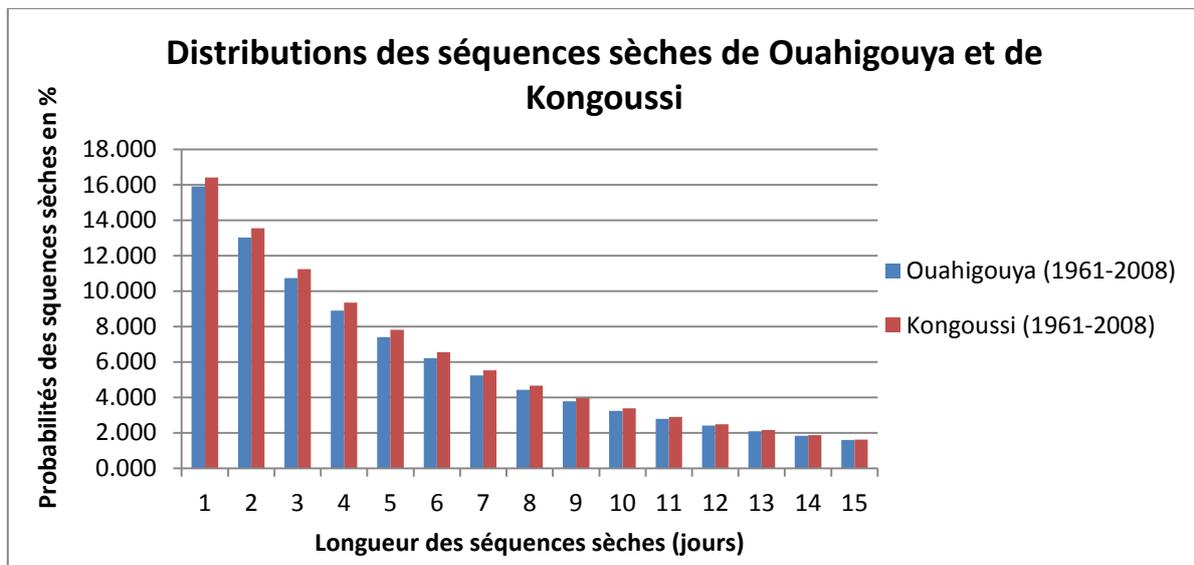


Figure 10: Comparaison des probabilités d'avènements des séquences sèches entre Ouahigouya et Kongoussi

Les probabilités de chaque localité selon les longueurs des séquences ont été représentées au niveau de la figure 10 : Dans le souci d'être objectif la période d'observation de Ouahigouya a été coupée afin de faire la comparaison sur les même périodes.

6. Mise en évidence des de la variation du climat : évolution des séquences sèches sur les périodes observées

6.1 Station de Ouahigouya

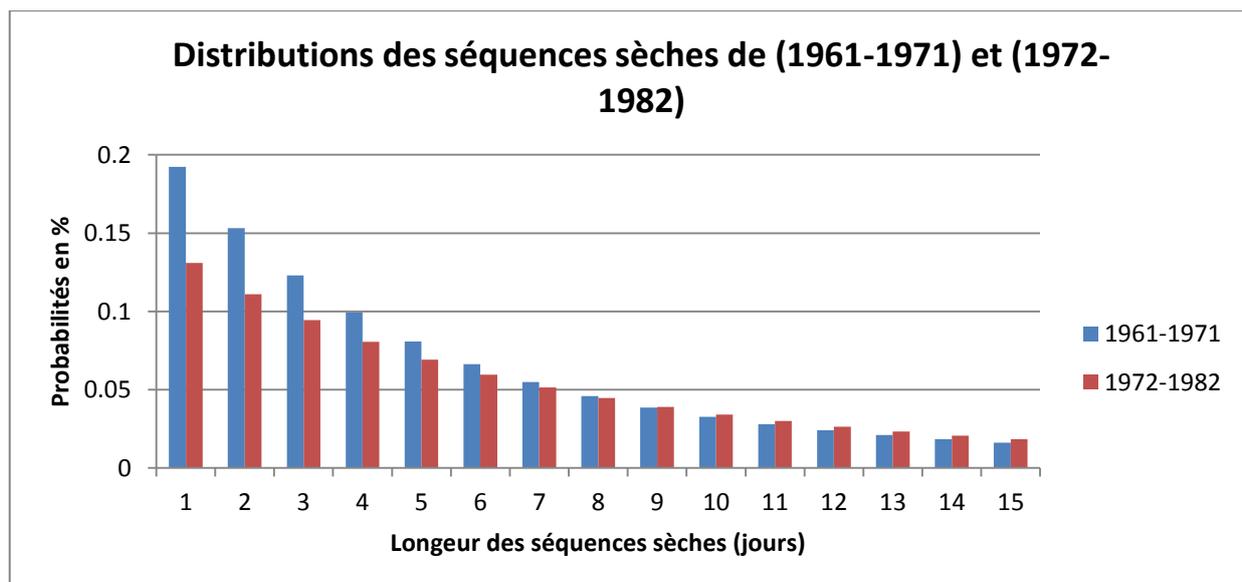


Figure 11: Comparaison des distributions des séquences sèches entre (1961-1971) et (1972-1982) : Ouahigouya

La figure 11 montre l'évolution des séquences sèches pour la période de 1972-1982 en comparaison avec celle de 1961-1971. Cette figure révèle que pour les années avant 1970, les séquences sèches de courte durée sont plus fréquentes et inversement pour les séquences sèches de longue durée.

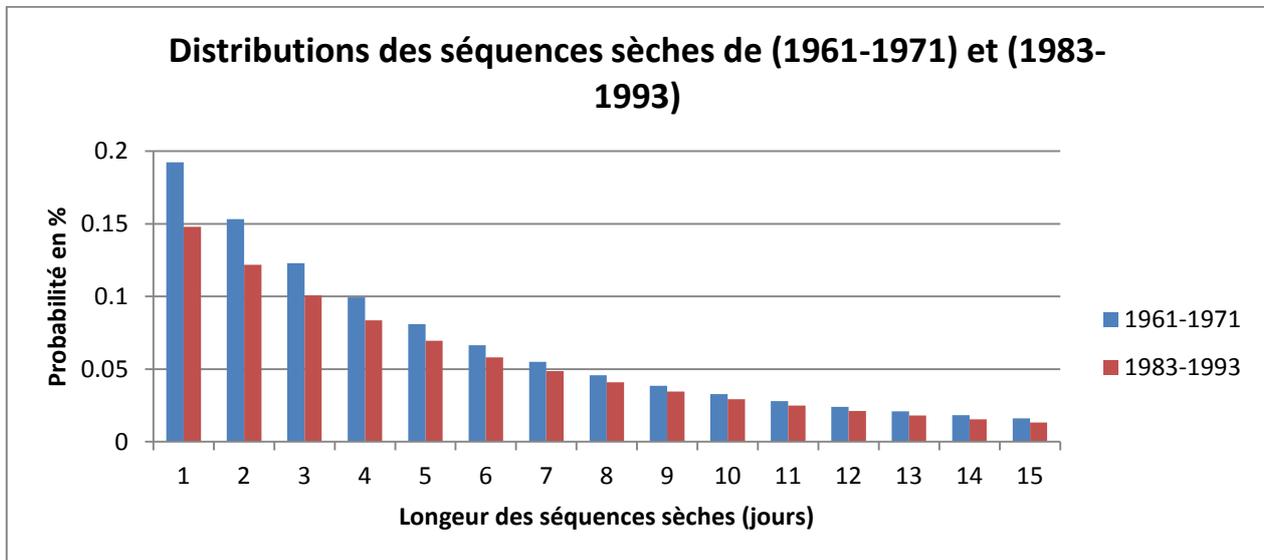


Figure 12: Comparaison des distributions des séquences sèches entre (1961-1971) et (1983-1993) : Ouahigouya

L'analyse de la figure 12, donne les similitudes et les différences entre l'évolution des séquences sèches entre les périodes 1961-1971 et 1983-1993 de Ouahigouya. Cette figure permet d'observer que les années de la période 1983-1993 sont moins sèches que celle de la période 1961-1971. Les séquences sèches de différentes longueurs de la période 1961-1971 ont des probabilités d'apparition supérieures à celle de la période 1983-1993.

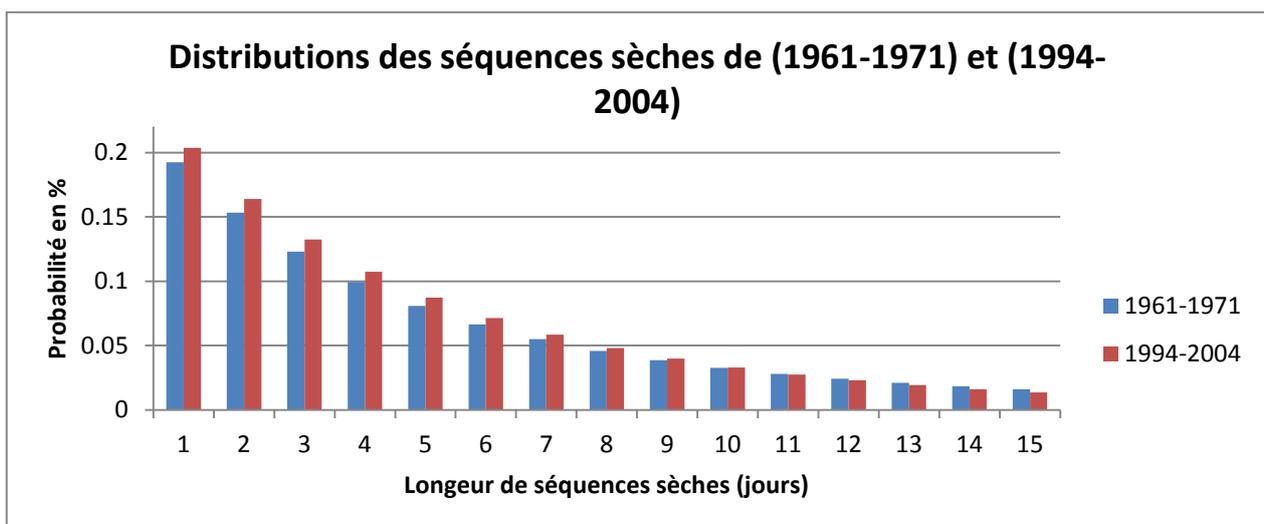


Figure 13: Comparaison des distributions des séquences sèches entre (1961-1971) et (1994-2004) : Ouahigouya

La figure 13 représente la comparaison entre les distributions en % des séquences sèches de la période 1961-1971 et celles de 1994-2004. Les séquences sèches de courte durée sont fréquentes dans la période 1994-2004. Quant aux séquences sèches de longue durée, les probabilités pour les périodes sont sensiblement égales. Ces résultats peuvent laisser penser qu'il y a un possible rétablissement du régime pluviométrique.

6.2 Station de Kongoussi

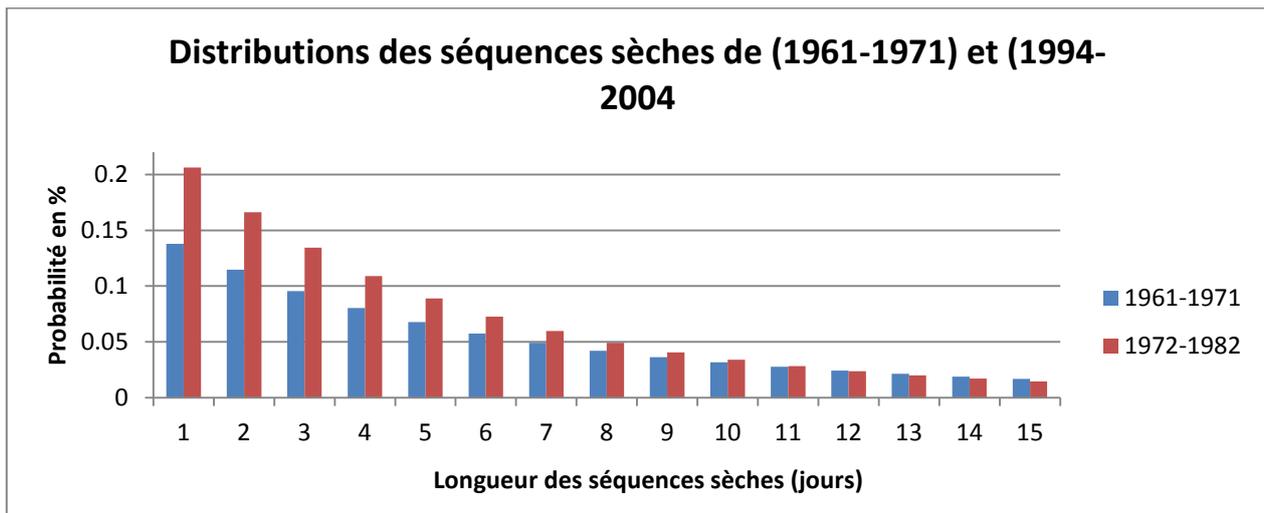


Figure 14: Comparaison des distributions des séquences sèches entre (1961-1971) et (1972-1982) : Kongoussi

La figure 14 représente la comparaison des fréquences d'apparition des séquences sèches entre les périodes 1961-1971 et celles de 1994-2004. Les probabilités des séquences sèches de la seconde période sont plus élevées que celles de la de toute longueur sont relativement plus élevées que celles de la période 1961-1971.

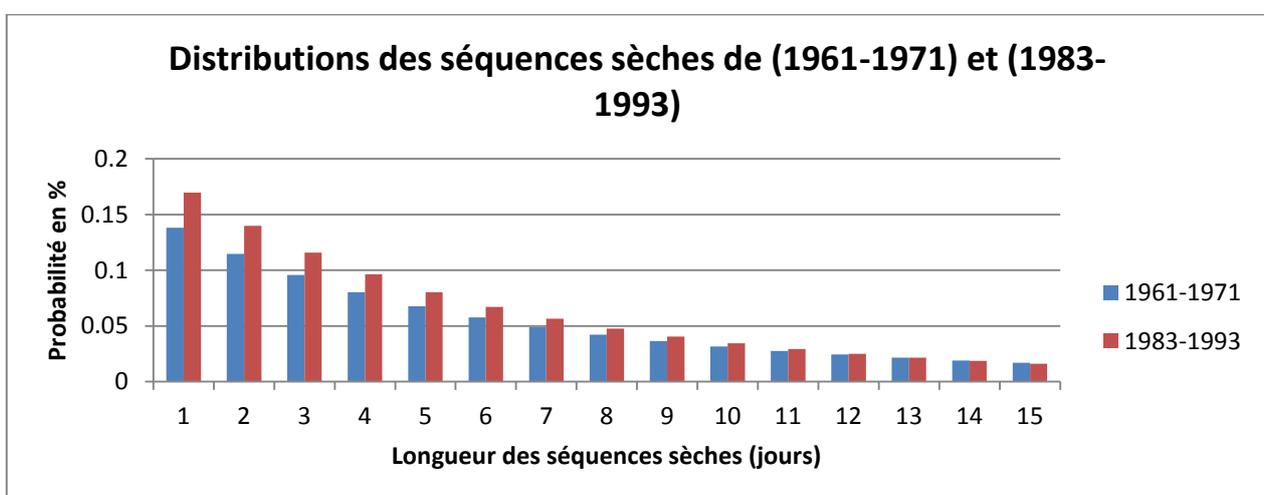


Figure 15: Comparaison des distributions des séquences sèches entre (1961-1971) et (1983-1993) : Kongoussi

Au niveau de la figure 15, sont représentées les distributions des probabilités d'apparition des séquences sèches de la période de 1961-1971 en comparaison avec les probabilités de la période de 1983-1993 de Kongoussi. Les séquences sèches de courte durée sont plus fréquentes que celles de longue durée.

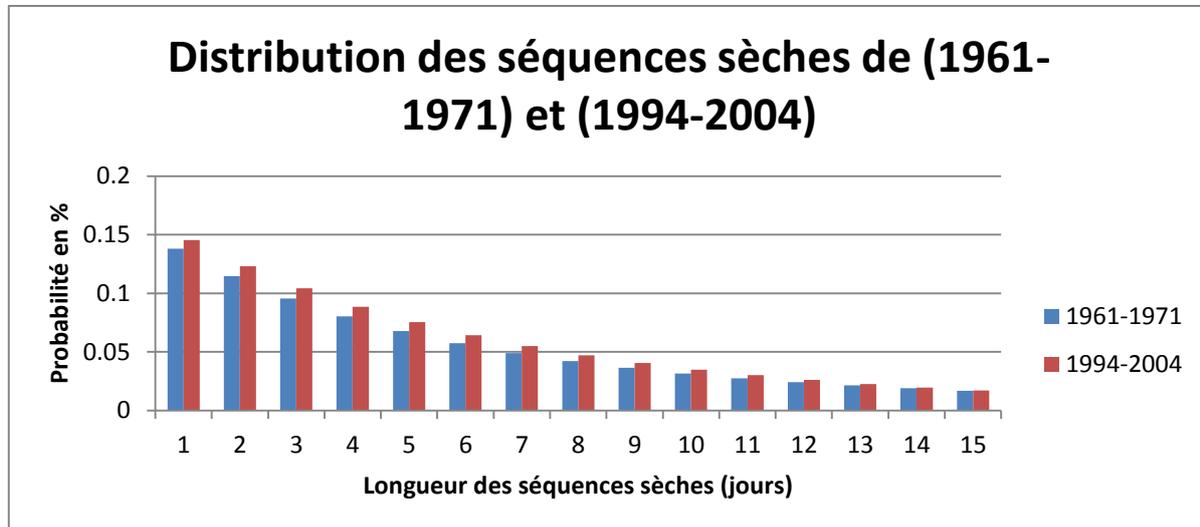


Figure 16: Comparaison des distributions des séquences sèches entre (1961-1971) et (1994-2004): Kongoussi

La figure 16 présente les probabilités d'apparition des séquences sèches sur deux périodes en vue d'une comparaison. Les probabilités des séquences sèches de longue durée sont quasiment égales sur les deux périodes et en plus les séquences sèches de courte durée sont plus fréquentes dans la période 1994-2004. Comme au niveau de Ouahigouya, il est possible qu'il y ait un phénomène de rétablissement du régime pluviométrique.

7. Préviation interannuelle des séquences sèches selon leurs différentes longueurs

Les probabilités d'apparition des différentes séquences sèches ont été déterminées et il apparaissait important de trouver une relation entre les années et ces séquences sèches. Cela permettrait de prévoir les différentes occurrences pour une année donnée afin de mieux se munir des éléments nécessaires pour les affronter et protéger les cultures. Après avoir tracé les courbes représentant les distributions en pourcentage des probabilités de chaque longueur de poches de sécheresse, l'allure de la courbe fait penser à une courbe de fonction sinusoïdale. Avec le logiciel MatLab (R2011a), l'équation qui permet de reproduire la courbe a été retrouvée et il s'agit d'une fonction de somme de plusieurs fonctions sinus. La forme générale de la fonction se présente ci-après :

$$f(x) = \sum_{i=1}^8 a_i \sin(b_i x + c_i)$$

Les coefficients a_i , b_i , c_i sont différents pour chaque longueur de séquence sèche et le x correspond à l'année pour laquelle la prévision doit être faite. L'intervalle de confiance pour ces coefficients est de 95 %. Le coefficient de détermination mesure la qualité de l'ajustement des estimations de l'équation de régression R^2 est en moyenne de 0,7. Les résultats des différents coefficients de chaque longueur de séquences sèches sont reportés au niveau de [l'annexe n°6](#).

8. Prévision des séquences sèches pour la saison de 2013 de Ouahigouya

L'application de l'ajustement selon la régression faite sur toute la période d'observation donne les résultats suivants (Tableau 5) :

Tableau 5: Probabilités d'apparition des séquences sèches: Prévision 2013 Ouahigouya

Longueur de la séquence sèche (jours)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Probabilités en %	31.87	25.22	2.13	10.00	2.95	3.85	1.13	0.04	4.13	2.25	1.73	2.76	1.60	1.20	0.65

Le constat du tableau 5 permet de voir que les séquences sèche évoluent de la même manière pour les toutes les années. Les séquences sèches de courte durée seront les plus fréquentes et celles de longues durées seront moins probables. On constate des biais et cela s'explique par le fait qu'il s'agit d'une tendance, ces valeurs sont justes relevées pour avoir une idée des probabilités d'apparition de chaque séquence sèche.

8. Fréquence d'avènements des séquences sèches en fonction des mois : Station de OUAHIGOUYA (1961-2012)

Tableau 6: Fréquence des séquences sèches selon les distributions mensuelles: Ouahigouya

Classe des durées de séquences sèches (jours)	[1 ; 4]	[5 ; 9]	[10 ; 16]
Mai	0.546	0.277	0.177
Juin	0.776	0.166	0.058
Juillet	0.878	0.114	0.008
Aout	0.935	0.065	0.000
Septembre	0.764	0.180	0.056

Le tableau 6 montre les fréquences d'apparition des séquences sèches pour les mois allant de Mai à Septembre de Ouahigouya, période couvrant la saison agricole. Les séquences sèches de la classe (1à 4jours) sont plus fréquentes au niveau du mois d'août qui en même temps présentent les distributions de probabilités les plus faibles pour les séquences sèches de la classe (10 à 16 jours).

9. Fréquence d'avènement des séquences sèches en fonction des mois : Station de KONGOUSSI (1960-2010)

Tableau 7: Fréquence des séquences sèches selon les distributions mensuelles : Kongoussi

Classe des durées de séquences sèches (jours)	[1 ; 4]	[5 ; 9]	[10 ; 16]
Mai	0.607	0.236	0.157
Juin	0.750	0.192	0.058
Juillet	0.866	0.108	0.026
Août	0.901	0.090	0.008
Septembre	0.773	0.143	0.084

Le tableau 7 montre les fréquences d'apparition des séquences sèches pour les mois allant de Mai à Septembre de Kongoussi. Les observations faites pour Ouahigouya sont les mêmes que celles de Kongoussi.

10. Régression linéaire entre début de saison et la longueur de la saison

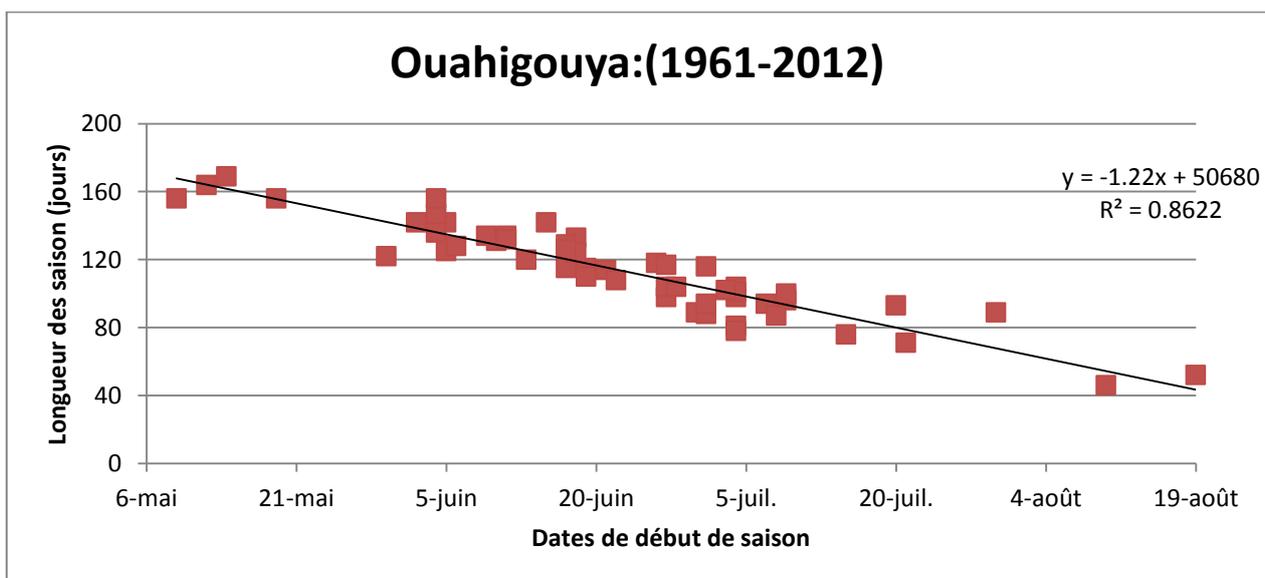
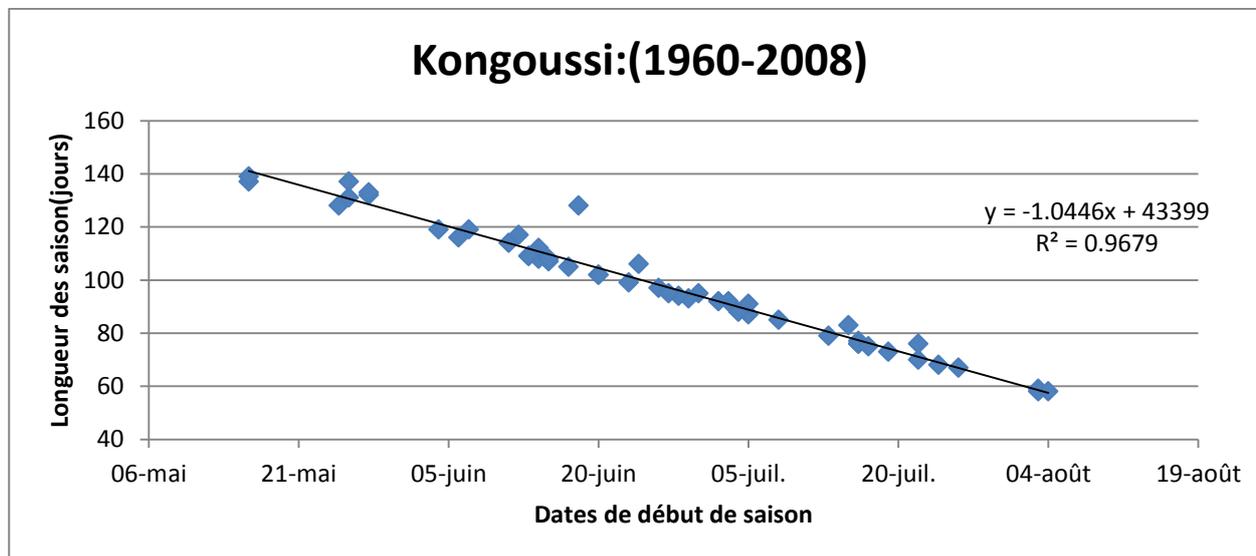


Figure 17: Relation entre le début de saison et la longueur de la saison : Ouahigouya

La figure 17 présente la régression linéaire entre le début de saison et la longueur de la saison au niveau de Ouahigouya. Il existe une étroite relation entre ces deux paramètres. Le coefficient de détermination de 80% confirme l'existence de cette relation. Ainsi, connaissant l'un de ces paramètres l'autre peut être déterminé.



- Les séquences sèches ont été identifiées selon les mêmes critères que précédemment. Les répartitions mensuelles de ces séquences sèches sont consignées dans les tableaux 8 et 9.

Tableau 8: Nombre de séquences sèches par mois selon les longueurs obtenus par RACMO (Prévision 2013 et 2014 de Kongoussi)

Longueur des séquences sèches (jours)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2013															
Mai	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Juin	3	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Juillet	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Août	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Septembre	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Octobre	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
2014															
Mai	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Juin	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Juillet	4	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Août	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Septembre	5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Octobre	0	2	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Tableau 9: Nombre de séquences sèches par mois selon les longueurs obtenus par RACMO (Prévision 2013 et 2014 de Ouahigouya)

Longueur des séquences sèches (jours)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2013															
Mai	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Juin	0	2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Juillet	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Août	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Septembre	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Octobre	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
2014															
Mai	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Juin	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Juillet	1	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Août	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Septembre	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Octobre	2	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

La distribution des séquences sèches au cours des années 2013 et 2014 des deux stations obtenues par Instat+ v3.36 sont présentées en annexe 9, 10, 11 et 12. Les jours secs sont marquées par le signe (--). Les jours ayant des numéros sont les jours ayant reçu des précipitations supérieures à 1mm.

- Les dates de début et de fin de saison ont été déterminées suivant les critères de Sivakumar en utilisant les prévisions pluviométriques journalières tirées des sorties du modèle. Concernant l'année 2013, le début de saison obtenu à Ouahigouya est prévu pour 28 Juin, avec une fin de saison prévue pour le 13 Octobre avec un écart-type de 3 jours. Pour 2014, la date de début de saison est prévue pour le 4 Août et la fin de saison pour le 11 Novembre. Le modèle prévoit pourtant des pluies régulières sur toute la période allant de Mai jusqu'en Octobre. Dans ce cas de figure, il serait préférable de recourir au bilan hydrique du sol, afin de vérifier si des semis avant cette date pourraient permettre à la plante boucler son cycle végétatif. Pour la localité de Kongoussi, la date de début pour 2013 est prévue pour le 28 Juin, pour une fin de saison prévue le 26 Septembre. En 2014, le modèle prévoit une saison tardive comme à Ouahigouya. Elle est sensée débutée le 3 Août pour finir le 11 Octobre.

La comparaison déférentes dates de démarrage et de fin de saison issues de certaines études notamment celle de (Maladonan, 2012) montre des écarts de ± 6 jours pour les dates de début de saison et ± 3 jours quand il s'agit des fins de saison.

Les données du modèle climatique RACMO ont permis la prévision des paramètres de la saison agricole et également l'évolution des séquences sèches. Ces pauses pluviométriques évoluent de la même manière que les séquences sèches déterminées à partir des chaînes de Markov. Les poches de sécheresse de longue durée présente des probabilités d'apparition assez faibles ($<5\%$) tandis que celles de courte durée ont des probabilités d'avènements supérieures à 30% surtout au moment des mois les plus pluvieux.

VI. DISCUSSIONS ET ANALYSES

1. Paramètres de la saison agricole

L'état actuel des connaissances scientifiques permet de prédire la qualité de la saison, avec des résultats plus ou moins fiables selon les modèles utilisés. Des efforts de recherche sont en cours sur des sujets tels que la date de début, fin de la saison des pluies et les séquences sèches. La méthode agronomique de Sivakumar a été appliquée pour la détermination des dates de début et de fin de saison. Il en est ressorti que la date de début au plus tôt de démarrage pour les observations de la période de 1961-2012 pour la station de Ouahigouya est le 12 Mai correspondant à l'an 1976. La date au plus tard par contre a été observée courant l'année 1987 et elle correspondait à la date du 19 Août. On remarque donc que la date correspondant au démarrage le plus tardif de la saison des pluies a été observée pendant la période de la deuxième grande sécheresse qui a frappé les bandes tropicales de l'Afrique de l'Ouest. La rareté des pluies durant cette période en est probablement la cause.

Pour la station de Kongoussi les dates de début au plus tôt et au plus tard sont respectivement le 16 Mai observé en 1998 et le 31 Juillet en 2003. Il existe donc une très forte variabilité lorsqu'il s'agit de l'installation de la saison car les dates de début ne sont pas toujours stables (Ozer., et al., 2005)

Les dates de fin de saison quant à elles se situent généralement courant septembre et octobre mais il arrive souvent que la saison s'étale jusqu'en Novembre. Pour la localité de Ouahigouya la date de fin de saison au plus tôt est le 23 Septembre observée en 1975 et la date au plus tard est le 7 Novembre observée en 1992. Pour Kongoussi la date de fin au plus tôt est observée en 1961 et elle correspond à la date du 24 Septembre, et la date de fin au plus tard est observée en 1992 et se situe au 9 Novembre.

Les longueurs de la saison agricoles sont également très variables au niveau des deux localités. Elles vont de 70 à 162 jours pour la localité de Kongoussi durant la période observée, et de 46 à 169 jours pour Ouahigouya. Les années comptant les pluviométries les plus hautes ne présentent pas nécessairement les longueurs de saison les plus longues, ce qui conduit à penser que l'étalement de la saison agricole est fonction de la meilleure répartition temporelle des pluies significatives et non de la quantité de pluie tombée.

Les paramètres les plus importants pour les agriculteurs sont les dates de début de saison et surtout la longueur de la saison et aussi le cumul et la répartition des pluies. La prévision de début de saison est très importante car il est important que les producteurs ne ratent pas les dates probables de semis au risque de perdre leurs semences au cas où le semis se fait tardivement ou de

manière précoce. La longueur de la saison est aussi un facteur important surtout en début de saison car cela contribuerait au choix de variété culturale.

Il y a des limites dans cette prévision du fait de la grande variation interannuelle des dates de début de saison, de ce fait il est judicieux de prendre en compte certains outils comme le bilan hydrique afin de diminuer les risques car il arrive souvent qu'en début d'hivernage une bonne pluie soit enregistrée avant la période dite sûre de semis (Ndiaye, non daté). Par simulation du bilan hydrique, on vérifie si les apports en eau pour les différentes peuvent être assurés de la date du semis précoce jusqu'à la période semis préconisée suivant les critères de Sivakumar. Si tel est le cas, les semis peuvent être conseillés. Et dans le cas contraire, il est recommandé d'attendre encore.

Il faut noter que les dates obtenues selon les différents critères de calculs ne seront pas nécessairement les dates réelles, raison pour laquelle on leur affecte des marges d'erreurs pour plus de souplesse.

2. Séquences sèches

La dernière sécheresse survenue vers les années 1970 a causé un déficit pluviométrique d'environ 50 % (Nicholson, 1983). Les aspects typiques de la variabilité interannuelle des précipitations dans la zone sahélienne sont leur persistance et leur amplitude (Nicholson, 1983). Les périodes sèches sont à considérer du point de vue de probabilité d'occurrence et de persistance durant la saison agricole. La prévision des événements météorologiques n'est pas assez aisée donc mettre en évidence certaines caractéristiques de ces événements serait un plus pour une meilleure connaissance des phénomènes climatiques. La méthodologie adoptée vise à donner des informations supplémentaires aux planificateurs principalement dans le domaine agricole. La problématique de l'étude de séquences sèches est axée sur l'impact qu'elles peuvent avoir sur le déroulement du cycle végétatif du point de vue persistance et fréquence d'avènements durant la saison agricole. L'impact des perturbations climatiques se manifestant par exemple par les séquences sèches s'est traduit par la prolongation anormale de la saison sèche, l'irrégularité et la mauvaise distribution des précipitations et la baisse sensible des rendements agricoles. L'exploitation des différentes informations en rapport avec les événements secs pourrait contribuer pour la gestion rationnelle des ressources en eau. D'une manière générale une année sèche se traduit par l'avènement d'un déficit des disponibilités naturelles en eau. Cela pendant un temps assez long par rapport à la valeur moyenne de ses disponibilités, aussi bien pour les précipitations, de l'écoulement superficiel ou des nappes souterraines. La sécheresse agricole survient lorsque l'approvisionnement hydrique est insuffisant pour satisfaire les besoins en eau. L'analyse des mécanismes géographiques qui sont à

l'origine des précipitations annuelles permet de constater que ces mécanismes prennent chaque année une configuration différente (Afouda., et al., 1997).

2.1. Distributions des probabilités d'occurrences des séquences sèches pour le seuil de 1mm

Les figures [7 et 8](#) présentent les distributions de probabilités empiriques et celles données par les chaînes de Markov d'ordre 2 et 3 pour les périodes 1961-2012 de la localité de Ouahigouya Et 1960 à 2008 pour Kongoussi. Nous pouvons remarquer que pour des séquences sèches de plus de 7 jours toutes les courbes de probabilités indiquent des probabilités faibles et approximativement les mêmes. Les chaînes de Markov sous estiment les séquences sèches de longueur inférieures à 7 jours et surestiment les probabilités de toutes les séquences sèches de longueur supérieur à 7 jours. Pour les séquences sèches de plus de 7 jours les 3 courbes sont quasiment les mêmes. La [figure 9](#) montre les probabilités des séquences sèches de la Station de Ouahigouya et de Kongoussi, les distributions sont assez proches, ce qui s'explique le fait que les deux localités sont dans la même zone climatique et aussi ont des cumuls de pluviométries similaires, mais apparemment la zone de Kongoussi est plus sèche que celle de Ouahigouya.

2.2 Variations des distributions de probabilités des séquences sèches

Les périodes d'observation de chaque localité a été divisée essentiellement en 4 parties afin d'essayer de situer le début des bouleversements climatiques en matières de cumul pluviométriques et d'évènements secs. En effet le découpage s'est fait par classe de 10 ans allant de 1961 à 2004, cela correspond aux classes d'années 1961-1971 ; 1972-1982; 1983-1993 et 1994-2004. Par la suite une comparaison selon les distributions des probabilités des séquences sèches a montré que les séquences sèches de plus de 7 jours des années des classes 1972-1982, 1983-1993 et 1994-2004 sont supérieures à celles des années 1961-1971. Ce qui laisse penser qu'après les années 1971 les évènements secs étaient plus récurrents et éventuellement les séquences sèches de longue durée. Les années avant 1971 ont été plus humides du fait que les probabilités des séquences sèches de longueur inférieure à 7 jours de ces années donnent les valeurs les plus élevées. Cette assertion est en concordance avec l'affirmation de Fodé et al., (1993) selon laquelle l'augmentation et la récurrence des séquences sèches peut s'interpréter comme une augmentation du nombre de jours de pluie sans pour autant que cela implique une augmentation de la hauteur totale des précipitations.

Néanmoins vers les années 1990, l'observation des probabilités des séquences sèches de longue durée (> 7 à jours) sont relativement en baisse, ce qui pourrait conduire à penser qu'il existe une possibilité de rétablissement du régime de la mousson. On pourrait penser que les années redeviennent normalement humides. C'est à partir de cette année que la plupart des pays ouest

africains ont connu des manifestations de phénomènes climatiques notamment des sécheresses dans certaines parties et des inondations dans d'autres (Afouda. ; et al. 1997).

Les distributions des probabilités mensuelles des séquences sèches par les classes en jours [1 ; 4], [5 ; 9] et [10 ; 16] sont consignées dans les [tableaux 6 et 7](#). Les valeurs les plus élevées des probabilités se constatent au niveau de la classe de [1 ; 4] et les plus faibles sont remarquées dans la classe [9-16]. Du point de vue mensuel il s'avère que le mois d'août a la valeur la plus élevée pour les séquences sèche de la classe inférieure. L'affirmation de Fodé et al (1993) intervient encore à ce niveau, car le mois d'Août est le mois généralement le plus pluvieux en zone sahélienne, pas forcément en terme de cumul pluviométrique mais répartition moyennement égale des pluies sur tout le mois. Par contre pendant cette même période d'Août l'avènement de séquences sèches de durée appartenant à la classe [9 ; 15] est très peu probable. Nous constatons globalement une diminution du nombre de séquences sèches de faibles longueurs ([1 ; 7]) au cours de la période avant 1971, ce qui montre qu'à partir de 1971 il y a une diminution de fréquence des précipitations.

2.3 Incidence des séquences sèches sur les cultures céréalières (maïs, mil, sorgho)

Les principales cultures céréalières cultivées dans la zone sahélienne sont essentiellement le mil et le sorgho. Le maïs occupe quelques petites superficies des domaines d'exploitation dont disposent les agriculteurs. Les spéculations réagissent différemment aux différentes durées de séquences sèches. Le maïs est une culture dont les besoins en eau sont plus élevés que ceux du mil et du sorgho. Éventuellement il est plus fébrile face aux séquences sèches de 4 jours de durée. Le sorgho et le mil peuvent tenir au moins 7 jours de séquences sèches sans risque de stress hydrique. Mais il faut reconnaître que c'est au moment de l'épiaison de chaque spéculation est vulnérable aux séquences sèches car c'est la phase du cycle végétatif la plus contraignante en terme de besoins en eau. L'occurrence d'épisodes secs ou pluvieux à certaines phases clés de la saison des pluies a des conséquences néfastes sur le développement des plantes cultivées, ce qui peut empêcher la plante d'accomplir la totalité de son cycle végétatif (Hachigonta, 2006). Les séquences sèches significatives pour chaque culture sont des facteurs de baisse de rendement agricole.

CONCLUSION

Les sujets abordés dans cette étude concernent en général la variabilité climatique à travers ses différentes manifestations au Burkina Faso surtout dans la zone sahélienne constituant la zone d'étude. Ce thème de changements climatiques étant un sujet de grands débats de nos jours constitue une suite logique dans la démarche participative des décideurs à trouver des stratégies d'adaptation à ces manifestations climatiques.

À travers ce travail les dates de d'installation des saisons ont pu être situées dans le calendrier pour une prévision de la campagne, ce qui permettrait aux paysans d'anticiper sur les dates de semis et aussi de planifier la saison. L'installation effective de la saison en zone sahélienne au Burkina Faso se situe en moyenne dans la 3^e décade de Juin. Les dates de début de saison sont très variables et souvent tardives. Il arrive souvent que la saison débute en Mai, mais en général la saison est effective entre le 20 et le 30 Juin. Aussi compte tenu de la faible pluviométrie et de la mauvaise répartition des pluies la saison pouvait débuter en Août, ce qui a été constaté durant en 1987 à Ouahigouya où la saison a débuté le 19 Août.

Quant aux séquences sèches, grâce à une analyse de la variabilité spatio-temporelle des séquences sèches intra-saisonnières, il est ressorti que les cumuls saisonniers sont influencés par les poches de sécheresses significatives. Une séquence sèche supérieure à 7 jours a été considérée comme significative pour la plupart des céréales comme le maïs le mi et le sorgho. Ces séquences sèches ont des probabilités d'apparition assez faibles (< 5 %). Les séquences sèches de courte durée présentent les valeurs de probabilité les plus fortes (> 30 %) mais sont sans grand danger pour les cultures.

L'impact de ses évènements secs sur l'évolution des cultures est appréciable selon le cycle végétatif pendant lequel la période sèche survient. L'analyse des poches de sécheresse s'installant au cours de la saison agricole, basée sur l'hypothèse d'indépendance des évènements successifs. Ce qui donne une méthode d'analyse des phénomènes par l'alternance par périodes du fait de la relativité du danger pour les cultures. L'interruption momentanée de la saison des pluies par une période sèche peut endommager les récoltes. Les dommages peuvent se produire même si la précipitation saisonnière totale est normale (Majid, et al., 2009).

L'étude de ces paramètres climatiques et agro-climatiques et l'élaboration de l'information climatique constitue une action entrant dans le cadre de l'adaptation aux phénomènes de changement climatique et éventuellement l'amélioration des rendements agricole en vue de la sécurisation alimentaire.

VII. RECOMMANDATIONS-PERSPECTIVES

Les résultats de ce travail pourraient constituer un guide pour les acteurs du secteur agricole particulièrement dans le sahel du Burkina Faso. Au terme de ce présent travail, il serait souhaitable de prendre en compte les notifications qui suivront.

Il serait judicieux d'effectuer un suivi de bilan hydrique du sol à la fin de chaque décennie afin de permettre aux différents agents de conseils agricoles de mieux juger l'état favorable du sol à une opération culturale. Aussi il serait utile de fournir des bulletins agro-météorologiques aux différents producteurs en vue d'une prévision de la campagne. L'irrigation d'appoint ou l'irrigation de complément serait aussi une action qui pourrait améliorer les rendements agricoles ou encore sécuriser les récoltes menacées. Pour cela la promotion de bassins de collecte des eaux de ruissellement est une solution.

Les localités de Kongoussi et Ouahigouya étant des zones à faibles pluviométries il faudrait mettre en place des stratégies de conservation des eaux et éventuellement de lutter contre les dégradations des sols. De plus il faut privilégier les variétés à cycle moyen ou augmenter les superficies sous cultures à haut potentiel de rendement (maïs, sorgho, mil) ou de rente (arachide, niébé, sésame). Aussi il faudrait apporter les quantités recommandées de fertilisants et observer les techniques appropriées permettant d'éviter leur lessivage.

Comme perspectives on pourrait envisager d'étendre la zone d'étude car étant donné le contexte de variabilité climatique ces événements secs pourraient s'installer de manière permanente dans les zones ayant des pluviométries assez élevées. Aussi la prévision intra-saisonnière des séquences sèches serait un atout pour les prévisions agricoles. L'installation d'un système d'alerte précoce agro-météorologique opérationnel contribuerait à une diffusion de l'information climatique dont a besoin le producteur. Pour cela il faudrait se doter des données météorologiques, agro-météorologiques, agronomiques fiables, et disposer d'une équipe compétente pour l'élaboration des conseils et de canaux de diffusion accessibles par la majorité des intervenants du domaine.

Les chaînes de Markov utilisées dans ce travail ont permis de simuler les données empiriques. Une réflexion est en cours afin d'appliquer la chaîne de Markov cachée, une variante de la propriété de Markov permettant de prédire les séquences sèches à partir des conditions climatiques d'une zone donnée. Cela permettrait de mieux prendre des décisions de déclenchement d'irrigation et des dispositions pour la planification à l'intérieur d'une saison agricole.

VIII.BIBLIOGRAPHIE

- Afouda, A., & Adisso, P. (1997, Avril). Etude Stochastique des structures de séquences sèches au Bénin. *Sustainability of Water Ressources under Increasing Uncertainty* (pp. 43-50). IAHS Publ. n°240 .
- Barbier, B., Hamma, Y., Karambiri, H., Zorom, M., & Somé, B. (2009). *Human Vulnerability to Climate Variability in the Sahel Farmers, Adaptation Strategies in Northern Burkina Faso*.
- Benzarti, Z., & Habaieb, H. (2013, Mai). *John Libbey Eurotext: L'essentiel de l'inforamtion scientifique et médicale*. Récupéré sur John Libbey Eurotext: <http://www.jle.com>
- Djoufack, V. (2011, Septembre 30). Etude multi-échelles des précipitations et du couvert végétal au Cameroun: Analyses spatiales, tendances temporelles, facteurs climatiques et anthropiques de variabilité du NDVI. *Thèse de doctorat spécialité Géographie (Option Climatologie), Universit de Bourgogne*.
- FAO. (1996, Juin). Sommet mondial de l'alimentation. *Notes d'orientation*(2), pp. 1-4.
- Fodé, M., & Amadou, O. (1993). Analyse des séquences sèches au Niger de 1950 à 1991. Niamey.
- Franquin, P. (1973). *Analyse agroclimatique en régions tropicales. Méthodes des intersections et période fréquentielle de végétation*.
- Hachigonta, S. ,. (2006). Interannual variability in dry and wet spell characteristics over Zambia. *Climate Research*, pp. 49-62.
- Karambiri, H., Gracia, G., Giraldo, J., Yacouba, H., Ibrahim, B., Barbier, B., & Polcher, J. (2011). *Climate Variability analysis and impacts assessment on water ressources in Waest Africa*. Atmos Sci. Let.12: 109-115.
- Keita, A. (2010). *Cours d'irrigation par aspersion*.
- Majid, M., & Lebdi, F. (2009, Décembre 19). Analyse Statistique des séquences sèches dans un bassin du Nord de la Tunisie/Statistical analysis of dry events in a northern Tunisian basin. *Hydrological Sciences Journal*, 54:3, pp. 442-455.
- Maladonan, I. (2012, Juin 25). Elaboration d'une information climatique de précampagne pour l'adaptation des producteurs à la variabilité et au changement climatqie au Burkina Faso. *Mémoire master en Ingénierie de l'eau (Insitut International d'Ingnieurie)*. Ouagadougou.
- Ndiaye, M. (s.d.). Avantages des prévisions climatiques et des avis agroclimatiques (Expérience sénégalaise).
- Ndong, J. (2003). Caractérisation de la saison des pluies dans le centre-ouest du SENEGAL. *Publication de l'Association Internationale de Climatologie Vol 15*, pp. 326-331.
- Nicholson, S. (1983). *Sub-Saharan Rainfall in the years 1976-1980. Evidence of continued drought*.

- Nicholson, S. (1983). Sub-Saharan Rainfall in the years 1976-1980. Evidence of continued drought.
- Ozer, P., Cathérine, B., & Bernard, P. (2005). *Analyse Climatique de la région de Gouré, Niger oriental récentes modifications et impacts environnementaux.*
- Ozer, P., Cathérine, B., & Bernard, P. (2005). Analyse Climatique de la région de Gouré, Niger oriental récentes modifications et impacts environnementaux. *Cybergeo: European Journal of Geographhy.*
- Phocaidès, A. (2008). *Manuel des techniques d'irrigation sous pression.*
- Réseau eau france. (s.d.). Consulté le Avril 20, 2012, sur <http://www.reseau.eaufrance.fr>
- SARR, M. A. (2008). *Variabilité pluviométrique en Afrique de l'Ouest: Dynamique des espaces végétaux à partir des images satellitales, exemple du bassin versant de Ferlo (SENEGAL).* Nantes.
- Seyni, S., Muller, B., Gaye, A., Hourdin, F., & Cisse, N. (2012). Analyses multi-échelles des pauses pluviométriques au Niger et au Sénégal. *Article de Recherche n°23-Secheresse*, pp. 3-13.
- Sircoulon, J. (1976). Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses de 1913 et 1940. *Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, vol. 13, n° 2, p.363-387, 363-387.*
- Sokona, Y., Briki, M., Youssef, D., Bijaber, N., Aouni, L., & al., e. (2009). Vers un système d'alerte précoce à la sécheresse au Maghreb. *Collection Synthèse de l'Observatoire du Sahara et du Sahel*, pp. 11-15.
- Soro, & Tamina, D. (2011). La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire).
- Sultan, B. (2011). *L'étude des variations et du changement climatique en Afrique de l'Ouest et ses retombées sociétales.*

IX. ANNEXES

Sommaire :

Annexe 1 : Bassin de collecte des eaux de ruissellement	44
Annexe 2: Nombre de séquences sèches de Ouahigouya selon leur longueur	44
Annexe 3: Nombre de séquences sèches de Kongoussi selon leur longueur	46
Annexe 4: Date de début et de fin de saison de Kongoussi	47
Annexe 5: Dates de début et de fin de saison observées au niveau de Ouahigouya	48
Annexe 6: Coefficients pour le calcul prévisionnel des probabilités des séquences sèches	49
Annexe 7 : Questionnaire proposé dans le cadre de l'enquête lors de la sortie terrain	49
Annexe 8: Besoins en eau de quelques cultures	53
Annexe 9: Prévision des séquences sèches de Kongoussi 2013	54
Annexe 10: Prévision des séquences sèches de Kongoussi 2014	55
Annexe 11 : Prévision des séquences sèches de Ouahigouya 2013.....	56
Annexe 12: Prévision des séquences sèches de Ouahigouya 2014.....	57
Annexe 13: Carte de migrations des isohyètes 600mm-800mm-1000mm de 1951--2000.....	58
Annexe 14: Carte des migrations des isohyètes 600mm et 900mm: 1931-2010	59
Annexe 15 : Carte des migrations des isohyètes 600mm et 900mm: 1961-2010	60

Annexe 1 : Bassin de collecte des eaux de ruissellement



Photo prise le 01/05/2013, Lionel

Annexe 2: Nombre de séquences sèches de Ouahigouya selon leur longueur

Années	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1961	10	8	6	3	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0
1962	12	8	7	0	2	4	0	0	1	0	0	2	0	0	0
1963	15	5	6	3	2	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0
1964	19	3	3	4	3	4	1	1	0	1	0	0	0	0	0
1965	13	6	2	4	2	3	3	0	0	0	0	0	1	0	0
1966	7	7	9	3	1	1	0	1	3	1	0	0	0	0	0
1967	14	5	8	2	1	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0
1968	12	8	3	2	1	1	0	0	1	2	0	0	0	1	0
1969	10	8	9	3	1	1	3	0	0	0	1	0	0	0	0
1970	17	2	2	4	2	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0
1971	11	8	2	0	3	3	1	0	1	0	0	0	0	0	0
1972	7	6	5	7	4	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0
1973	3	7	5	2	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1
1974	11	7	3	2	2	2	0	0	1	0	1	0	0	1	0
1975	8	14	3	4	0	1	1	2	1	0	1	0	0	0	0
1976	12	4	8	2	6	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1977	12	7	2	4	1	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0
1978	14	8	4	6	4	0	3	1	1	0	0	0	0	0	0
1979	18	10	4	2	1	0	0	2	1	0	0	0	0	1	0
1980	14	6	2	2	4	2	1	1	0	0	0	1	0	0	0
1981	10	7	6	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

1982	11	6	2	2	0	1	3	1	0	1	0	0	0	2	0
1983	6	8	4	6	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
1984	9	4	6	5	3	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
1985	9	9	1	3	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0
1986	12	13	0	5	0	0	1	0	3	0	1	0	0	0	0
1987	7	3	6	3	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1988	5	9	4	0	4	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0
1989	8	10	5	3	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
1990	9	7	4	4	2	0	0	2	1	0	0	1	0	0	0
1991	13	14	4	2	1	2	2	0	1	1	0	0	0	0	0
1992	13	7	4	2	3	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0
1993	8	9	5	2	3	2	0	2	1	1	1	0	0	0	0
1994	11	14	8	2	1	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0
1995	11	11	5	2	1	4	2	0	0	1	1	0	1	0	0
1996	8	8	8	0	2	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
1997	6	8	2	5	0	2	2	1	0	0	1	0	1	1	0
1998	11	4	8	5	4	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0
1999	12	5	5	2	3	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
2000	7	5	4	3	1	1	2	3	1	0	0	0	0	0	0
2001	3	7	6	4	0	1	1	3	0	1	1	0	0	0	0
2002	9	12	4	5	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
2003	13	4	5	2	4	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0
2004	11	6	6	3	1	0	2	0	1	0	1	1	0	0	1
2005	6	5	3	1	4	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0
2006	11	8	3	1	5	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
2007	10	10	3	2	4	0	0	0	2	1	0	0	0	0	1
2008	15	7	2	3	2	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0
2009	10	4	7	2	3	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2010	8	8	2	1	4	3	3	1	0	0	1	1	1	0	0
2011	11	11	2	5	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2012	13	8	3	6	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1

Annexe 3: Nombre de séquences sèches de Kongoussi selon leur longueur

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Années															
1960	15	4	7	3	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1961	13	8	7	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0
1962	11	9	5	2	2	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0
1963	15	10	3	4	1	2	1	1	0	1	0	0	0	0	0
1964	17	9	2	3	2	2	1	0	0	0	0	2	0	0	0
1965	9	9	6	1	1	1	1	3	1	1	0	0	0	0	0
1966	14	11	3	5	4	0	1	0	1	2	0	0	0	0	0
1967	12	6	6	2	0	2	0	2	1	0	1	0	0	0	0
1968	19	9	3	3	3	1	0	1	2	0	0	0	1	0	0
1969	7	11	9	4	3	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0
1970	12	4	3	3	0	2	1	0	2	2	0	0	0	0	0
1971	9	5	1	3	2	3	0	1	2	0	0	0	0	1	0
1972	10	8	2	3	1	1	2	4	1	0	2	0	0	0	0
1973	6	7	6	5	3	0	0	0	1	0	2	0	0	1	1
1974	12	2	5	2	1	2	0	1	0	0	1	0	0	1	0
1975	11	8	4	4	3	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0
1976	5	5	7	4	3	1	3	1	0	1	0	1	0	0	0
1977	9	6	5	2	1	0	3	2	0	0	0	0	1	0	0
1978	13	6	6	5	2	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
1979	10	5	8	2	3	2	1	0	0	0	0	0	2	0	0
1980	9	10	2	3	2	3	0	1	0	1	0	0	0	0	0
1981	10	6	4	2	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0
1982	8	5	7	2	1	2	1	1	0	1	0	0	0	0	1
1983	3	8	5	5	2	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
1984	10	3	3	4	2	0	1	3	0	1	0	1	0	0	0
1985	11	7	5	3	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1986	9	11	6	3	2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
1987	5	1	3	1	5	2	2	0	0	1	0	0	0	0	0
1988	11	12	4	0	3	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0
1989	13	7	2	2	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0
1990	6	4	7	4	4	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0
1991	7	10	7	5	0	0	1	2	1	3	0	0	0	1	0
1992	14	5	2	2	0	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0
1993	6	7	4	4	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0
1994	5	9	4	4	4	2	2	0	0	1	0	1	0	0	0
1995	13	5	4	3	0	0	3	0	2	0	0	0	0	0	0
1996	13	4	3	4	2	3	2	0	0	1	0	0	0	0	1
1997	8	6	5	3	4	1	0	0	0	2	0	2	0	0	0
1998	9	8	4	6	1	4	1	0	1	0	1	0	0	0	0
1999	12	7	5	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0
2000	4	4	4	4	0	3	0	1	3	0	0	0	0	0	0
2001	6	7	4	5	0	4	1	1	1	0	0	0	0	0	0
2002	5	7	3	5	0	0	1	2	2	0	0	0	0	2	0

2003	11	10	1	2	4	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0
2004	7	7	6	3	0	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0
2005	10	6	5	5	2	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
2006	9	8	4	7	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1
2007	6	8	2	4	3	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
2008	14	8	4	2	1	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0

Annexe 4: Date de début et de fin de saison de Kongoussi

Année	Début de Saison	Fin de Saison	Longueur de la saison (jrs)	NJP	Pluie annuelle (mm)
1960	30-juin	03-oct	95	58	658.3
1961	08 Juin	04-oct	119	55	875.2
1962	26-mai	04-oct	131	64	756.5
1963	26-mai	10-oct	137	61	691.9
1964	17-juin	30-sept	105	64	632.7
1965	05-juil	30-sept	87	51	744.7
1966	15-juin	30-sept	107	57	698.1
1967	28-mai	07-oct	132	51	537.6
1968	15-juil	06-oct	83	75	755.8
1969	26-juin	01-oct	97	56	636
1970	29-juin	30-sept	93	52	508
1971	19-juil	30-sept	73	47	560
1972	20-juin	30-sept	102	50	492.4
1973	04-juin	01-oct	119	48	621.2
1974	11-juin	03-oct	114	50	861.3
1975	03-juil	03-oct	92	59	668.5
1976	24-juil	30-sept	68	53	564.5
1977	03-août	01-oct	59	44	434.1
1978	02-juil	02-oct	92	67	787.9
1979	25-mai	30-sept	128	60	554.2
1980	13-juil	30-sept	79	51	610.4
1981	13-juin	30-sept	109	47	751.5
1982	28-juin	30-sept	94	48	528
1983	14-juin	30-sept	108	38	464.4
1984	16-mai	30-sept	137	36	413.8
1985	26-juil	01-oct	67	39	419.7
1986	22-juil	30-sept	70	43	547.1
1987	24-juin	08-oct	106	30	484.8
1988	14-juin	04-oct	112	50	822.5
1989	03-août	30-sept	58	49	567.1
1990	16-juil	01-oct	77	34	447.3
1991	16-juil	30-sept	76	48	703.4
1992	06-juin	30-sept	116	44	637.5
1993	13-juin	30-sept	109	35	558.9
1994	18-juin	24-oct	128	54	922.2
1995	20-juin	30-sept	102	43	513.9
1996	05-juil	04-oct	91	53	643.2
1997	12-juin	07-oct	117	70	773.1
1998	16-mai	02-oct	139	48	775.7
1999	27-juin	30-sept	95	57	718.2

2000	04-juil	30-sept	88	38	476.9
2001	28-mai	08-oct	133	45	720.3
2002	16-juil	30-sept	76	35	594.9
2003	04-août	01-oct	58	44	749
2004	17-juil	30-sept	75	40	494
2005	15-juin	01-oct	108	52	762.8
2006	22-juil	06-oct	76	45	425.3
2007	23-juin	30-sept	99	40	634.8
2008	08-juil	01-oct	85	44	497.7

Annexe 5: Dates de début et de fin de saison observées au niveau de Ouahigouya

Année	Début de Saison	Fin de Saison	Longueur de la saison (jrs)	NJP	Pluie annuelle (mm)
1961	30-juin	27-sept.	89	47	749
1962	15-juin	4-nov.	142	53	805
1963	11-juin	23-oct.	134	49	819
1964	30-mai	29-sept.	122	54	591
1965	5-juin	25-oct.	142	53	751
1966	20-juil.	21-oct.	93	43	660
1967	17-juin	10-oct.	115	54	782
1968	26-juin	22-oct.	118	53	702
1969	21-juin	13-oct.	114	43	610
1970	1-juil.	27-sept.	88	44	521
1971	10-août	25-sept.	46	43	481
1972	30-juil.	27-oct.	89	43	501
1973	27-juin	3-oct.	98	37	477
1974	4-juil.	16-oct.	104	51	758
1975	4-juil.	23-sept.	81	45	583
1976	12-mai	23-oct.	164	52	520
1977	21-juil.	30-sept.	71	47	425
1978	18-juin	29-oct.	133	54	775
1979	4-juin	29-oct.	147	48	578
1980	2-juin	22-oct.	142	44	576
1981	19-juin	12-oct.	115	51	836
1982	9-juil.	13-oct.	96	37	360
1983	15-juil.	29-sept.	76	36	358
1984	4-juil.	10-oct.	98	39	391
1985	27-juin	9-oct.	104	35	420
1986	1-juil.	3-oct.	94	47	590
1987	19-août	10-oct.	52	42	466
1988	4-juil.	20-sept.	78	35	707
1989	7-juil.	9-oct.	94	44	612
1990	4-juil.	13-oct.	101	39	403
1991	19-mai	22-oct.	156	55	679
1992	4-juin	7-nov.	156	58	713
1993	27-juin	22-oct.	117	41	603
1994	18-juin	20-oct.	124	60	964
1995	4-juin	18-oct.	136	46	613
1996	3-juil.	13-oct.	102	42	730

1997	9-juil.	17-oct.	100	41	590
1998	1-juil.	25-oct.	116	48	671
1999	22-juin	8-oct.	108	49	672
2000	9-mai	12-oct.	156	39	577
2001	5-juin	8-oct.	125	35	733
2002	28-juin	10-oct.	104	47	579
2003	17-juin	24-oct.	129	48	729
2004	8-juil.	3-oct.	87	38	596
2005	13-juin	11-oct.	120	37	575.1
2006	19-juin	7-oct.	110	44	647.5
2007	17-juin	21-oct.	126	49	935.6
2008	10-juin	19-oct.	131	46	759.3
2009	14-mai	30-oct.	169	43	755
2010	9-juin	21-oct.	134	63	898.7
2011	6-juin	12-oct.	128	53	505.3
2012	11-juin	21-oct.	132	72	963.6

Annexe 6: Coefficients pour le calcul prévisionnel des probabilités des séquences sèches

Coefficients		Longueurs des séquences sèches (jours)														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
a	a1	20.37	14.08	11.88	11.36	9.249	7.983	5.283	5.365	9.968	5.09	3.08	9.71	2.275	1.956	1.821
	a2	3.714	2.577	2.4	3.347	2.562	2.353	17.79	1.321	4.209	2.176	0.45	2.72	0.497	0.445	0.523
	a3	6.396	4.184	3.336	2.466	1.778	1.265	0.801	0.58	0.443	0.375	0.359	0.286	0.34	0.352	0.36
	a4	5.605	4.398	2.935	1.941	7.631	1.452	0.841	1.917	0.306	1.566	0.343	0.236	0.333	0.323	0.318
	a5	4.683	3.007	2.366	31.95	1.246	0.746	0.78	0.276	0.325	1.423	0.267	0.314	0.33	0.295	0.234
	a6	3.898	40.68	34.94	1.671	0.863	0.643	17.51	0.269	0.223	0.292	0.247	0.22	0.258	0.251	0.266
	a7	3.252	40.61	34.51	1.171	6.946	0.765	0.46	1.831	0.328	0.196	0.251	0.274	0.198	0.234	0.231
	a8	3.766	2.165	1.451	31.33	1.164	0.768	0.74	0.82	0.41	0.212	0.215	0.226	0.217	0.177	0.287
b	b1	0.002	0.023	0.03	0.045	0.043	0.044	0.008	0.036	0.015	0.057	0.023	0.012	0.035	0.033	0.04
	b2	0.194	0.195	0.172	0.13	0.129	0.121	0.221	0.116	0.038	0.111	0.092	0.05	0.155	0.158	0.144
	b3	2.535	2.193	2.205	2.211	2.215	2.221	1.2	1.205	1.223	0.616	0.654	2.519	2.517	2.513	2.523
	b4	2.187	2.531	2.52	2.516	1.25	1.226	2.192	2.169	0.691	0.376	0.461	0.623	0.444	0.438	0.445
	b5	1.889	1.893	1.772	1.258	2.515	2.51	2.124	0.245	0.276	0.37	2.522	0.472	0.643	0.637	2.155
	b6	1.347	1.273	1.262	1.774	2.064	2.067	0.224	0.639	2.401	1.241	0.258	2.999	2.991	2.99	2.986
	b7	2.999	1.279	1.267	2.062	1.262	1.285	1.742	2.144	0.511	2.314	2.996	0.711	0.727	1.332	1.878
	b8	0.666	3.005	2.061	1.262	1.767	1.764	2.278	2.251	2.24	1.593	1.588	0.277	1.854	0.727	0.657
c	c1	118.4	75.91	60.56	32.07	35.85	33.51	106	50.06	91.56	6.991	74.93	95.53	51.66	55.14	41.06
	c2	-140	-143	-97.8	-14.9	-12.8	3.26	-195	13.83	168.9	23.41	60.98	142.6	-64.7	-70.3	-43
	c3	107.1	49.13	24.58	12.49	5.59	-6.49	65.35	55.39	20.31	0.841	-75	134.1	138.4	147.5	126.4
	c4	61.45	114.5	136.2	144.3	-33.4	14.91	52.48	98.52	-149	-12.6	-182	-13.8	-147	-135	-150
	c5	-81.7	-87.8	149.8	-48.3	146.5	156.5	-60.1	7.365	-53.9	-242	130	-203	-52.9	-42.5	120.8
	c6	15.68	-85.3	-62.5	145	58.77	52.79	49.19	-45.2	-119	-15.6	-17.7	156.3	172.8	174.6	182.8
	c7	160	151.4	175.4	63.51	184.8	139.5	-36.5	-101	-280	52.9	163.9	57.25	26.78	48.85	-62.9
	c8	143	147.4	65.44	185.7	-85.3	-79.3	124.5	178.2	-44.9	15.18	24.19	-56.2	-15.2	26.89	164.1
Coef	R ²	0.654	0.659	0.709	0.741	0.766	0.773	0.75	0.698	0.661	0.55	0.611	0.612	0.656	0.647	0.662

Annexe 7 : Questionnaire proposé dans le cadre de l'enquête lors de la sortie terrain

QUESTIONNAIRE ADRESSÉ AUX PAYSANS

Date de l'entretien :

Région : CENTRE NORD

Province : BAM

Commune :

Village/Secteur :

Questions

Nom et Prénoms :

Village/Secteur :

1. Quelle est la superficie de terre que vous exploitez ?

.....
.....

2. Quels types de sols rencontre-t-on ici ?

.....
.....
.....

3. Techniques utilisées en fonction du lieu de culture

	Bas-fonds	Plaines	Pied de colline	
Maïs				
Mil				
Sorgho				
Aubergine				
Piment				
Niébé				

Autres :

4. Quelles sont les spéculations que vous avez l'habitude de produire ? Pourquoi ?

.....
.....
.....

5. Et pour cette saison qu'est-ce que vous envisagez de produire ? Pourquoi ?

.....
.....
.....

6. Quel est le cycle des différentes cultures que vous produirez ?

Cultures						
Cycle (jours)						

7. À quel moment avez-vous l'habitude de semer ? Qu'est-ce qui vous guide sur le choix des dates de semis ?

Cultures						
Date de semis						

8. Quelle est la date au plus tôt/plus tard à laquelle vous avez déjà semé ? Pourquoi ?

	Date	Raisons
Au plus tôt		
Au plus tard		

9. Comment ont été les récoltes ces années ?

	Appréciation de la récolte	Rendement approximatif
Mise en terre précoce		
Semis tardif		

10. Y a-t-il des structures ou des personnes particulières qui vous fournissent des informations sur les prévisions de la campagne agricole ? OUI : ; NON :

Si oui, lesquelles?

11. Si non, aimeriez-vous en avoir, et de quels types ?

12. Ces informations influencent-elles le choix de vos cultures ou encore les dates de semis ?

OUI : ; NON :

Si oui, de quelle manière ?

Quelle est la plus longue période sans pluie durant la saison des pluies, que vous avez vécue durant ces cinq dernières années ? Selon vous qu'est ce qui a causé cela ?

13. Étiez-vous informé à l'avance qu'il y allait avoir ce manque de pluie ?

OUI : ; NON :

Si oui comment l'avez-vous su ?

.....
.....
14. Comment avez-vous comblé ce manque d'eau ?

.....
.....
15. Pendant une campagne, combien de fois avez-vous de périodes sans pluies ?

.....
16. Entre le mil, le maïs et le sorgho, quelle est la spéculation qui résiste le mieux sans pluies ?

Maïs : ; Mil : ; Sorgho :

16. Quelle est la longueur maximale de séquence sèche que chacune de ces cultures peut supporter ?

Maïs	Mil	Sorgho

17. Qu'est-ce qui vous indique qu'il faut irriguer ou non ?

.....
.....
18. Avez-vous un BCER ?

OUI : ; NON :

19. Si non, aimeriez-vous en avoir ?

20. Lorsque le BCER contient de l'eau, quels sont les raisons qui vous amènent à vous en servir?

.....
.....
21. Quel est votre moyen d'exhaure ? Pourquoi ?

.....
22. Avez-vous choisi de construire les BCER par nécessité ?

OUI : ; NON :

Si oui, à quelles fins ?

.....
En quoi ces bassins sont-ils avantageux ?

Annexe 8: Besoins en eau de quelques cultures**RÉCAPITULATIF DES ETM DES DIFFÉRENTES CULTURES EN FONCTION DU
STADE VÉGÉTATIF**

Spécificité culturelle	Besoins en mm/j en fonction du stade végétatif			
	Initiale	croissance	Mi saison	Maturation
Maïs	2,3	3,9	5,5	3,9
Mil	2,1	3,9	5,4	3,1
Sorgho	2,1	4,0	5,3	3,2
Aubergine	2,6	3,7	5,5	4,0
Piment	2,1	3,8	5,0	4,5
Niébé	2,1	4,0	5,3	2,5

Annexe 9: Prédiction des séquences sèches de Kongoussi 2013

Spell Lengths

SPELL X3, X4;RANGE 1;INTO X9, X10

: : day X9, X10;max;fix 0;code 0

Daily data for: X9

Mon	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
Day.													
1	--	--	--	--	1	3	--	2	--	2	--	--	
2	--	--	--	--	2	4	1	3	1	3	--	--	
3	--	--	--	--	--	--	--	4	--	--	--	--	
4	--	--	--	--	--	--	1	5	--	--	--	--	
5	--	--	--	--	--	--	2	6	1	--	--	--	
6	--	--	--	--	--	--	3	7	2	1	--	--	
7	--	--	--	--	--	--	--	--	3	2	--	--	
8	--	--	--	--	--	--	1	1	4	--	--	--	
9	--	--	--	--	--	--	2	2	5	--	--	--	
10	--	--	--	--	--	--	3	--	6	--	--	--	
11	--	--	--	--	--	1	4	1	7	--	--	--	
12	--	--	--	--	--	2	--	2	8	--	--	--	
13	--	--	--	--	--	--	1	3	9	--	--	--	
14	--	--	--	--	--	1	2	4	10	--	--	--	
15	--	--	--	1	--	2	3	5	--	--	--	--	
16	--	--	--	2	--	3	4	6	--	--	--	--	
17	--	--	--	--	--	--	5	--	1	--	--	--	
18	--	--	--	--	--	--	6	1	2	1	--	--	
19	--	--	--	--	1	--	7	2	--	--	--	--	
20	--	--	--	--	2	1	8	3	1	--	--	--	
21	--	--	--	--	3	2	--	4	2	--	--	--	
22	--	--	--	--	4	3	1	5	3	--	--	--	
23	--	--	--	--	5	4	2	6	--	--	--	--	
24	--	--	--	--	6	5	3	7	--	--	--	--	
25	--	--	--	1	--	--	4	--	--	--	--	--	
26	--	--	--	2	--	1	5	1	1	--	--	--	
27	--	--	--	3	1	2	6	2	2	--	--	--	
28	--	--	--	4	2	3	--	--	--	--	--	--	
29	--	--	1	--	--	4	1	1	--	--	--	--	
30	--	--	--	--	1	--	--	2	1	--	--	--	
31	--	--	1	--	2	--	1	--	--	--	--	--	
Maximum	0	0	1	4	6	5	8	7	10	(Overall: 10)			0

Annexe 10: Prévion des séquences sèches de Kongoussi 2014

Daily data for: X10

Mon	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
Day.													
1	--	--	--	--	3	3	8	6	7	7	1	--	
2	--	--	--	--	4	4	9	7	8	--	2	--	
3	--	--	--	--	5	5	--	8	9	--	3	--	
4	--	--	--	--	6	--	1	9	10	1	--	--	
5	--	--	--	--	7	1	2	10	11	--	--	--	
6	--	--	--	--	8	--	--	11	12	--	--	--	
7	--	--	--	--	9	--	--	12	13	1	--	--	
8	--	--	--	--	--	1	--	13	14	2	--	--	
9	--	--	--	--	1	2	--	14	15	3	--	--	
10	--	--	--	--	2	3	1	15	16	4	--	--	
11	--	--	--	--	--	4	2	16	--	--	--	--	
12	--	--	--	--	1	5	3	17	1	1	--	--	
13	--	--	--	--	2	6	4	18	2	2	--	--	
14	--	--	--	--	--	7	--	--	--	3	--	--	
15	--	--	--	--	--	8	--	1	1	4	--	--	
16	--	--	--	--	--	9	--	2	2	5	--	--	
17	--	--	--	--	--	10	1	3	3	6	--	--	
18	--	--	--	--	1	11	--	--	4	--	--	--	
19	--	--	--	--	2	12	1	1	5	1	--	--	
20	--	--	--	--	--	13	2	--	--	--	--	--	
21	--	--	--	--	--	14	--	--	1	--	--	--	
22	--	--	--	--	1	15	1	1	--	--	--	--	
23	--	--	1	--	2	--	--	2	--	--	--	--	
24	--	--	--	--	3	1	--	--	--	--	--	--	
25	--	--	--	--	4	2	--	--	1	--	--	--	
26	--	--	--	--	5	3	--	1	2	--	--	--	
27	--	--	--	--	--	4	1	2	3	1	--	--	
28	--	--	--	--	--	5	2	3	4	2	--	--	
29	--	--	--	1	--	6	3	4	5	--	--	--	
30	--	--	--	2	1	7	4	5	6	--	--	--	
31	--	--	--		2		5	6		--	--	--	
Maximum	0	0	1	2	9	15	9	18	16	(Overall: 18)			0

Annexe 11 : Prévion des séquences sèches de Ouahigouya 2013

Spell Lengths

SPEll X3, X4;RANge 1;INTo X17, X18

: day X17, X18;max;fix 0;code 0

Daily data for: X17

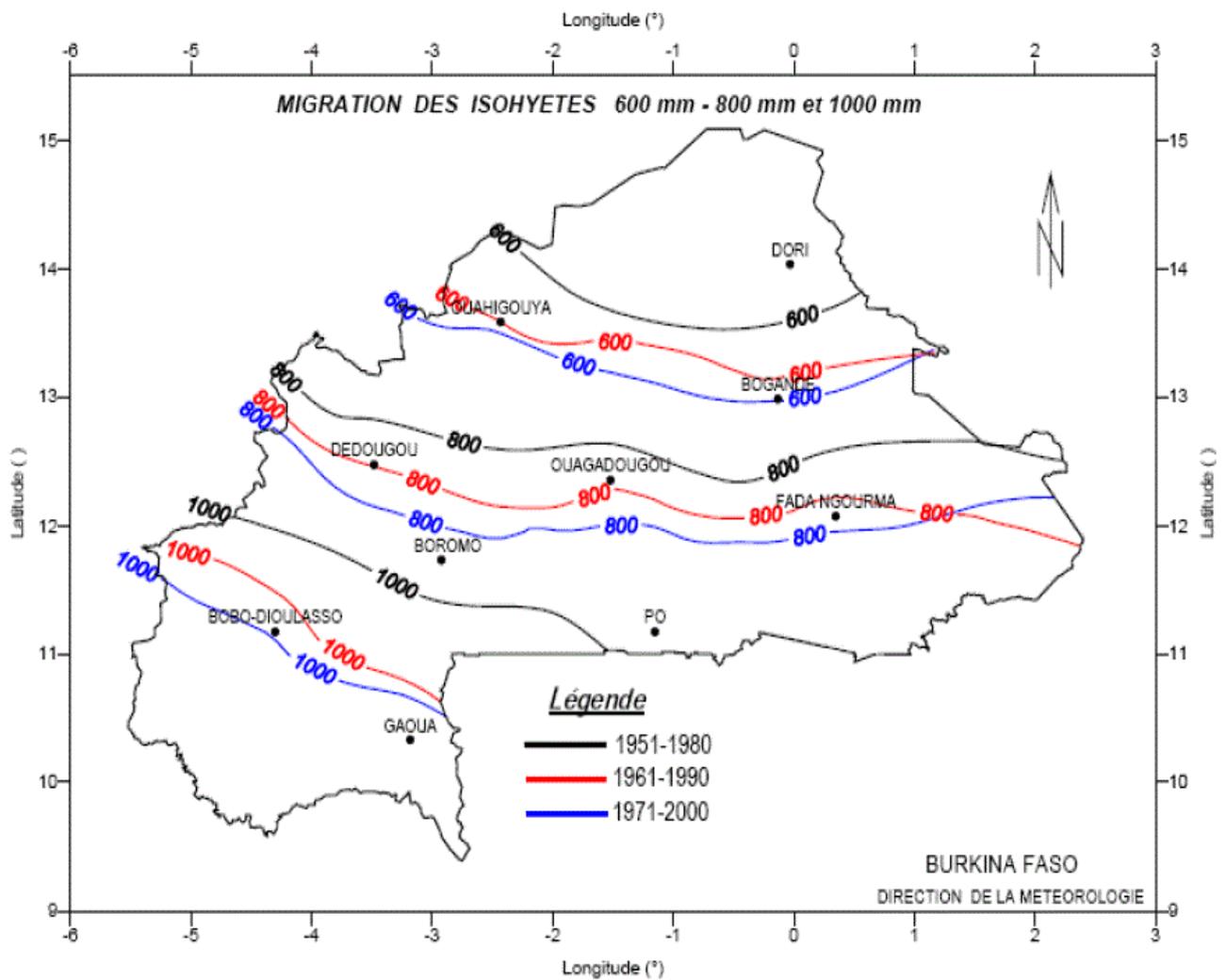
Mon	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Day.												
1	--	--	--	--	--	6	--	4	4	2	--	--
2	--	--	--	--	1	7	1	5	5	3	--	--
3	--	--	--	--	--	--	--	6	--	4	--	--
4	--	--	--	--	1	--	1	7	--	5	--	--
5	--	--	--	--	--	--	2	8	1	--	--	--
6	--	--	--	--	--	--	3	9	2	1	--	--
7	--	--	--	--	--	--	--	--	3	2	--	--
8	--	--	--	--	--	--	1	1	4	--	--	--
9	--	--	--	--	--	--	2	2	5	--	--	--
10	--	--	--	--	--	--	3	--	6	--	--	--
11	--	--	--	--	--	1	4	--	7	--	--	--
12	--	--	--	--	--	2	5	1	8	--	--	--
13	--	--	--	--	--	--	--	2	9	--	--	--
14	--	--	--	--	--	--	1	3	10	--	--	--
15	--	--	--	1	--	1	2	4	--	--	--	--
16	--	--	--	2	--	2	3	5	--	--	--	--
17	--	--	--	--	--	--	4	6	1	1	--	--
18	--	--	--	--	--	--	5	7	2	--	--	--
19	--	--	--	--	--	--	6	8	--	--	--	--
20	--	--	--	--	1	--	7	9	1	--	--	--
21	--	--	--	--	--	1	8	10	2	--	--	--
22	--	--	--	--	1	2	9	11	3	--	--	--
23	--	--	--	--	--	3	10	12	--	--	--	--
24	--	--	--	--	1	4	11	13	--	--	--	--
25	--	--	--	1	--	5	12	--	1	--	--	--
26	--	--	--	2	--	6	13	1	2	--	--	--
27	--	--	--	3	1	7	14	2	3	--	--	--
28	--	--	--	4	2	8	--	--	4	--	--	--
29	--	--	--	--	3	9	1	1	--	--	--	--
30	--		--	--	4	--	2	2	1	--	--	--
31	--		1		5		3	3		--		--
Maximum										(Overall: 14)		
	0	0	1	4	5	9	14	13	10	5	0	0

Annexe 12: Prévion des séquences sèches de Ouahigouya 2014

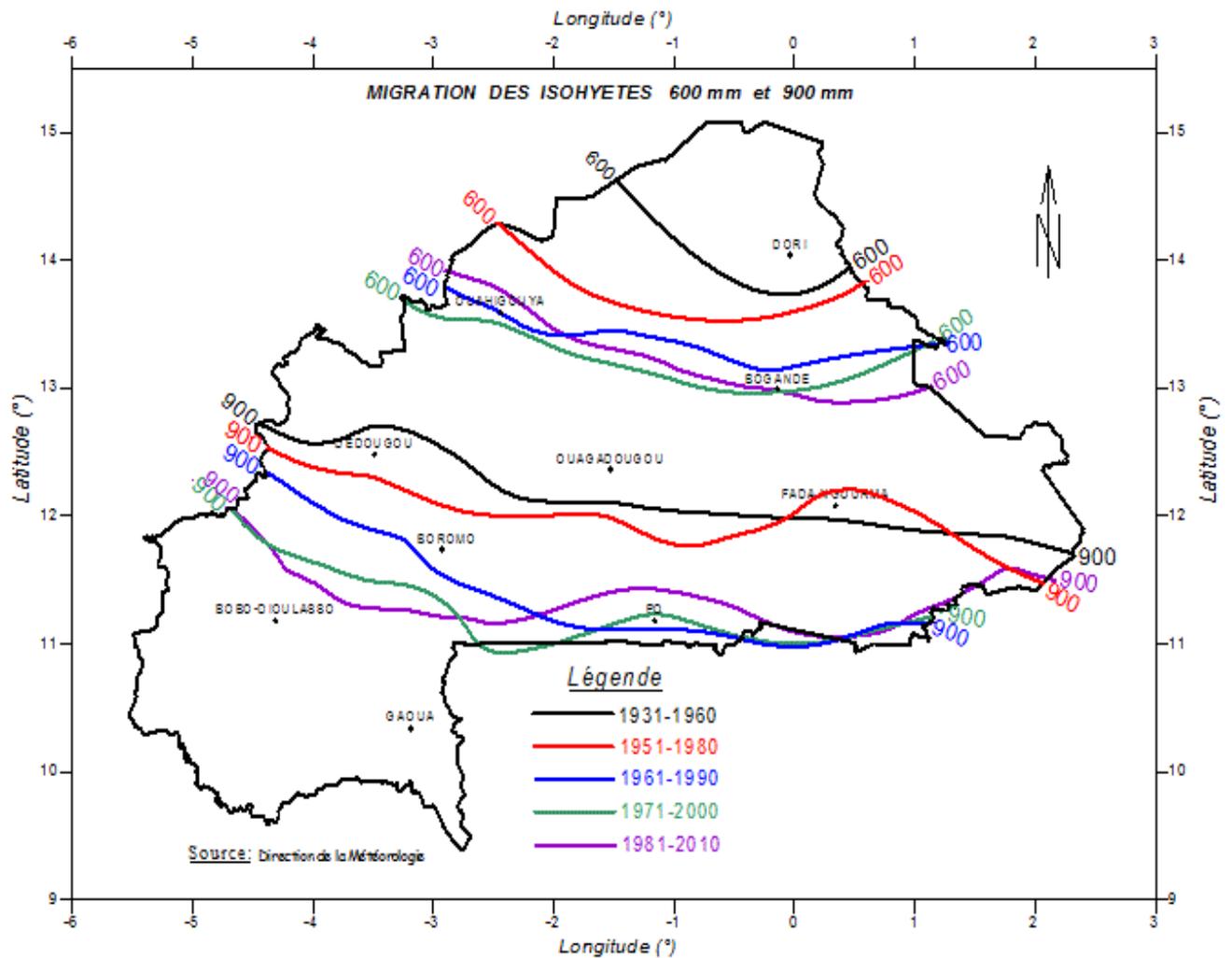
Daily data for: X18

Mon	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Day.												
1	--	--	--	--	4	--	6	6	7	3	--	--
2	--	--	--	--	5	1	7	7	8	--	1	--
3	--	--	--	--	6	2	8	8	9	1	2	--
4	--	--	--	--	7	3	9	9	10	2	--	--
5	--	--	--	--	8	4	10	10	11	--	--	--
6	--	--	--	--	9	--	--	11	12	1	--	--
7	--	--	--	--	10	--	--	12	13	2	--	--
8	--	--	--	--	--	1	--	13	14	3	--	--
9	--	--	--	--	--	2	--	14	15	4	--	--
10	--	--	--	--	1	3	--	15	16	5	--	--
11	--	--	--	--	--	4	1	16	--	--	--	--
12	--	--	--	--	1	--	2	17	1	1	--	--
13	--	--	--	--	2	1	--	18	2	2	--	--
14	--	--	--	--	3	2	--	--	--	3	--	--
15	--	--	--	--	--	3	--	1	1	4	--	--
16	--	--	--	--	--	4	1	2	2	5	--	--
17	--	--	--	--	1	--	2	3	3	--	--	--
18	--	--	--	--	2	1	--	--	4	--	--	--
19	--	--	--	--	3	--	1	--	5	1	--	--
20	--	--	--	--	--	1	2	1	6	--	--	--
21	--	--	--	--	--	2	3	--	--	--	--	--
22	--	--	--	--	1	--	4	--	--	--	--	--
23	--	--	1	--	2	--	--	1	--	--	--	--
24	--	--	--	--	3	1	--	--	--	--	--	--
25	--	--	--	--	4	--	--	--	--	--	--	--
26	--	--	--	--	5	1	--	1	1	--	--	--
27	--	--	--	--	--	2	1	2	2	1	--	--
28	--	--	--	1	--	3	2	3	--	2	--	--
29	--	--	--	2	--	4	3	4	1	--	--	--
30	--	--	--	3	1	5	4	5	2	--	--	--
31	--	--	--	--	2	--	5	6	--	--	--	--
Maximum										(Overall: 18)		
	0	0	1	3	10	5	10	18	16	5	2	0

Annexe 13: Carte de migrations des isohyètes 600mm-800mm-1000mm de 1951--2000



Annexe 14: Carte des migrations des isohyètes 600mm et 900mm: 1931-2010



Annexe 15 : Carte des migrations des isohyètes 600mm et 900mm: 1961-2010

