

Approches prédictives des rendements du cotonnier (*Gossypium hirsutum*) dans le Département de l'Alibori au Bénin

F. H. G. Ephrem TOSSOU^{1,2*}, T. Fabrice DOVONOU¹, I. Joseph ETEKA³, C. Yvon HOUNTONDJI^{1,2}, Bakary DJABY² et Bernard TYCHON²

¹ *Laboratoire d'Etudes et de Recherches Forestières (LERF), Faculté d'Agronomie, Université de Parakou, Bénin*

² *Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université de Liège, Belgique*

³ *Laboratoire Pierre PAGNEY-Climats Eau, Ecosystème et Développement LACEED, FASH, Université d'Abomey-Calavi, Bénin*

* Correspondance, courriel : tossouephrem@gmail.com

Résumé

L'étude couvre la période 2002-2016 et son objectif est de contribuer à l'amélioration de la production des statistiques des rendements du cotonnier par les méthodes de prévisions des rendements dans le département de l'Alibori au Bénin. Les sorties des programmes, de GeoWRSI et SPIRITS, ont permis d'avoir des résultats qui après validation ont conduit à sélectionner les meilleurs modèles sur la base de la faiblesse des valeurs de la racine carrée quadratique de l'erreur moyenne de prédiction (RMSE). Il ressort des résultats obtenus que le modèle de prédiction des rendements du coton à l'échelle départementale (Alibori) semble mieux prédire les rendements qu'à l'échelle communale (Banikoara).

Mots-clés : *coton, prévision, rendement, GeoWRSI, SPIRITS, Bénin.*

Abstract

Predictive approaches to cotton yields (*Gossypium hirsutum*) in the Alibori department in Benin

The study covers the period 2002-2016 and its objective is to contribute to the improvement of cotton production statistics through yield forecasting methods in the department of Alibori in Benin. The outputs of the programs, GeoWRSI and SPIRITS, made it possible to have results which after validation had lead us to select the best ones on the basis of the weakness of the Root Mean Square Error (RMSE). Our results show that the model for predicting yields of cotton at the departmental level (Alibori) seems to better predict yields than at the munic level (Banikora).

Keywords : *cotton, forecast, yield, NDVI, GeoWRSI, SPIRITS, Benin.*

1. Introduction

La production du cotonnier fait des économies aux pays, aux paysans et aux ménages agricoles en Afrique [1]. Au Bénin, le coton est la première et la principale culture d'exportation [2] ; au Nord- Est du pays, particulièrement les conditions pédologiques et agro météorologiques sont favorables à la production du cotonnier dans la mesure où, cette partie du Bénin produit à elle seule plus de 70 % de la production nationale [3]. Cependant depuis des décennies cette filière connaît des difficultés de maîtrise de sa production afin de mieux gérer les stocks et son développement [3]. Cette étude a pour objectif de proposer des méthodes de prévision des rendements du cotonnier dans le département de l'Alibori et dans la commune de Banikoara. Précisément, il s'agira de prévoir les rendements du coton à partir des données météorologiques, agro météorologiques et de la télédétection à l'aide d'une série de programmes tels : GEOWRSI, SPIRITS et R. Un modèle statistique, robuste et puissant exploitera ensuite un nombre restreint de variables de sorties de ces logiciels pour proposer une prévision des rendements. Cette démarche a déjà été appliquée avec succès dans le cadre du projet 'Global Monitoring for Food Security' au Sénégal pour la prévision des rendements du mil, du sorgho, du maïs et du niébé [4] et plus récemment pour leurs Travaux de Fin d'Etude (TFE), [5 - 7] respectivement pour le sorgho et le coton.

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation des milieux d'étude

Situé entre 11°19' de latitude Nord et 2°55' de longitude Est, l'Alibori est un département du Nord-Est Bénin. Il est limité au Nord par la République du Niger, au Nord-Ouest par la République du Burkina Faso, à l'Est par la République Fédérale du Nigéria, à l'Ouest par l'Atacora et au Sud par le département du Borgou. D'une superficie de 26 242 km² (23 % du territoire national), l'Alibori est subdivisé en six (6) communes. L'Alibori (*Figure 1*) s'étend sur deux zones agro-écologiques : la zone de l'Extrême - Nord et la zone cotonnière du Nord Bénin. Le climat dans la zone évolue du type soudanien dans sa partie Sud vers le type soudano sahélien dans sa partie Nord. L'Alibori ne connaît qu'une seule saison de pluie qui dure entre 5 à 6 mois, et démarre au cours des mois Avril-Mai avec une pluviosité moyenne annuelle oscillant entre 700 et 1100mm. La variété du cotonnier (H279-1) produit a un cycle de 180 jours avec les conditions de pluviométrie minimale de 700 mm [8]. Quant à la commune de Banikoara (*Figure 2*) objet aussi de cette étude, est située au Nord-Ouest du Bénin. Elle est limitée au Nord par la commune de Karimama, au Sud par les communes de Gogounou et de Kérou, à l'Est par la commune de Kandi et à l'Ouest par la République du Burkina-Faso. Elle couvre une superficie de 4.383 km² et le climat qui y règne est celui de type soudano-sahélien avec une pluviométrie moyenne de 850 mm [8]. On y distingue deux saisons bien distinctes : une saison de pluie de mai à octobre et une saison sèche de novembre à avril [8]. Les conditions naturelles et humaines favorisent la production d'une gamme variée de cultures telles que : le coton, le maïs, le sorgho, le mil, le riz, l'igname, le manioc, le soja, le niébé, l'arachide, le gombo, l'oignon, la tomate, le piment, la pomme de terre, la patate douce, le citrilus, et le voandzou. La commune de Banikoara dispose de nombreux bas-fonds aménageables ; cette activité agricole est accompagnée de l'élevage essentiellement de gros bétails [8].

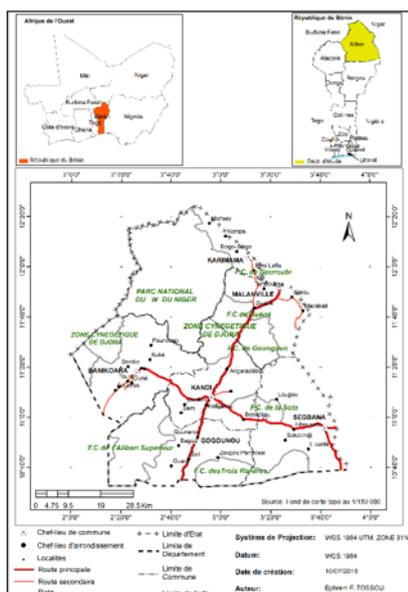


Figure 1 : Département de l'Alibori

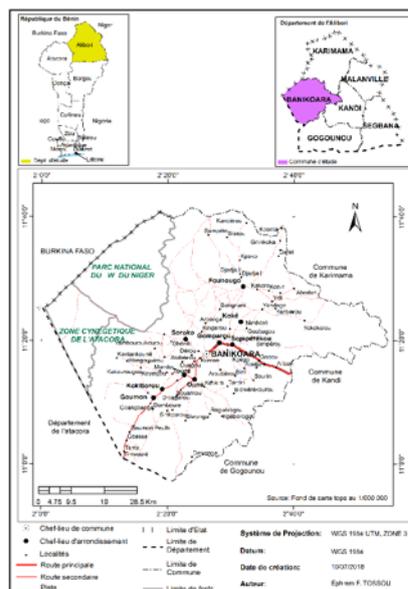


Figure 2 : Commune de Banikoara

2-2. Logiciels et principales fonctions

SPIRITS (Software for the Processing and Interpretation of Remotely sensed Image Time Series), a été développé par VITO pour MARS /CCR. Il est un des logiciels de traitement d'images en général, mais ses avancées sont spécifiquement axées sur la surveillance des cultures. Les indices de végétation et leurs anomalies peuvent être cartographiés rapidement et les statistiques peuvent être tracées dans des graphiques saisonniers à partager avec les analystes et les décideurs. Ainsi, il a été appliqué à Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Il permet de quantifier l'activité photosynthétique et d'en dériver la quantité de biomasse. Il utilise deux bandes spectrales dans le rouge et proche infra-rouge. Sa valeur varie théoriquement entre -1 et 1. En pratique, une surface d'eau libre (océan, lac, etc.) aura des valeurs de NDVI proches de 0, un sol nu prendra des valeurs de 0.1 à 0.2, alors qu'une végétation dense aura des valeurs de 0.5 à 0.8. SPIRITS analyse une série d'images et celles d'entrée sont les images SPOT VEGETATION (2002-2013) et du PROBA-V (2014-2016), téléchargées sur le site du VITO. Une analyse de l'évolution du NDVI, ressort plusieurs paramètres de sorties. Ces sorties sont les caractéristiques de l'évolution du NDVI au cours d'une année et cependant la saison de croissance. Ainsi nous avons, le cumul du NDVI, pendant la période végétative est le cumul de NDVI_{d15_32} ; la période avant le semis, est le cumul du NDVI_{d1_15}, le Peak est la décade à laquelle le NDVI atteint son maxi au cours de l'année, l'amplitude est la différence entre le niveau le plus bas et le niveau le plus haut de l'évolution du NDVI et le Peak_Val est la valeur du NDVI lorsqu'il atteint son niveau maximal. GéoWRSI (Geospatial Water Requirement Satisfaction Index) est un logiciel géo spatial autonome à installer et gratuitement disponible. Il est mis en œuvre par l'US Geological Survey (USGS) pour l'activité du réseau de systèmes d'alerte précoce de FEWSNET (Famine Early Warning System Network). Il exécute un modèle de bilan hydrique spécifique à une culture sélectionnée par l'utilisateur dans une zone géographique dans le monde. Les estimations de réduction ou d'accroissement de rendement basées sur les résultats de WRSI contribuent à la préparation et à la planification de la sécurité alimentaire. Le WRSI est caractérisé par la disponibilité en eau et le besoin en eau d'une culture pendant sa période de croissance. Il est le rapport de l'évapotranspiration réelle saisonnière (AET) à l'exigence d'eau de la campagne saisonnière (WR).

$$WRSI = WR * 1/AET * 100 \tag{1}$$

$$\text{avec, } WR = PET * KC \tag{2}$$

PET de Penman-MonteithS et KC pour équilibrer le besoin en eau de la culture au cours de la croissance de la culture. Chaque fois que la teneur en eau du sol est supérieure au niveau d'appauvrissement maximal admissible selon le type de culture, l'AET restera le même que WR, c'est-à-dire pas de stress hydrique. La teneur en eau du sol est obtenue grâce à une équation de bilan de masse simple où le niveau d'eau du sol est surveillé dans un seau défini par la capacité de retenue d'eau (WHC) du sol et la profondeur de la racine de la culture, c'est-à-dire.

$$W_i = SW_{i-1} + PPT_i - AET_i \quad (3)$$

où, SW constitue la teneur en eau du sol, PPT est une précipitation, et i est indice du pas de temps. Les sorties courantes de GeoWRSI sont :

WRSI	:	Indice de satisfaction de l'eau requise
WRSI anomaly	:	Anomalies de WRSI
SOS	:	Début de la saison
SOS anomaly	:	Anomalies de début de saison
EOS	:	Fin de la saison
% LGP	:	Longueur des différents stades de croissance des cultures
Soil water index	:	Indice d'eau du sol (flétrissement, stress, satisfaction)
Total water surplus	:	Excédent hydrique total dans le sol
EOS	:	Fin de la saison

2-3. Traitement et modélisation dans R, Core Team, 2017

Essentiellement trois étapes ont été passées en revue. La première consiste à constituer à l'ensemble des variables de sortie de SPIRITS et GéoWRSI, les cumuls des données météo, du NDVI et de l'année constituent des variables explicatives potentielles du rendement. Parmi elles, seules les mieux corrélées aux rendements mesurés sur une série historique de quinze ans (15 ans) seront retenues dans un modèle de régression multiple chargé de retrouver le rendement des cultures. Le logiciel R, Core Team, 2017 a été utilisé pour la recherche de la régression multiple. On dénombre entre 30 à 60 variables explicatives potentielles pour le set de calibration. La régression linéaire multiple se décline en plusieurs étapes. Premièrement, les variables qui ne sont pas corrélées au rendement (à variances nulles) sont supprimées et ne sont pas intégrées dans les sets de calibration. Les variables explicatives potentielles restantes du rendement sont ensuite sélectionnées par régression pas à pas. La deuxième étape consiste en la création de modèles de prévision de rendement et la mise en évidence des variables impliquées dans ceux-ci. Pour ce faire, une recherche exhaustive de modèles est lancée à partir des variables sélectionnées dans l'étape précédente. Les modèles doivent satisfaire à certaines exigences pour être retenus, à savoir : les variables qui ont un sens du point de vue agronomique et qui ne sont pas corrélées entre elles, afin de donner une certaine robustesse au modèle ; avoir un coefficient de détermination (R^2) supérieur à 0.5 ; faire appel à un nombre restreint de variables, compris entre 2 et 4 [9]. La troisième étape comprend la validation des modèles respectant ces critères, c'est-à-dire la capacité de ceux-ci à prédire les rendements. Le nombre d'années étant relativement faible (15 années), il n'est pas raisonnable de séparer les observations en un échantillon pour la calibration et un autre pour la validation. La méthode la plus adaptée dans ce cas est donc la validation croisée dite "Leave-One-Out" (LOO) [9]. Le principe de cette méthode consiste à retirer une observation de l'échantillon, de calibrer le modèle sur les $n-1$ observations restantes, et de le valider ensuite avec l'observation mise de côté. La même opération est ensuite répétée en mettant à chaque fois de côté une autre observation pour effectuer la validation, jusqu'à ce que toutes les observations de l'échantillon y soient passées. Le coefficient de détermination de validation (R^2_{cv}) entre les observations historiques et les valeurs prédites lors de chaque

étape de validation peut ensuite être calculé et permettra d'évaluer l'efficacité de prévision du modèle. En pratique, pour chaque set de données, 2 à 3 modèles sont sélectionnés et soumis à la validation croisée "Leave-One-Out", afin de sélectionner celui qui présente le meilleur R^2_{cv} et la plus petite erreur quadratique moyenne (RMSE : Root Mean Square Error). Les prévisions ont lieu, a priori, à la date de récolte, c'est-à-dire que les cumuls pour tous les stades, y compris le stade de maturation, sont intégrés au set de calibration.

2-4. Méthodes générales

Le concept de base sur lequel repose la présente étude est relativement simple. Il s'agit en effet de rechercher un modèle de prévision des rendements en mettant en évidence les corrélations entre les rendements historiques du coton des années 2002 - 2016 et différentes variables explicatives. Celles-ci sont de différents types météorologiques, agro-météorologiques, ou issus d'images satellites de NDVI (SPOT VEGETATION et PROBA-V). Les variables météorologiques pouvant expliquer le rendement sont constituées de cumul de différents paramètres météorologiques, par phase phénologique ou au total sur le cycle végétatif de la plante. Les variables agro météorologiques sont représentés par les sorties GéoWRSI. Enfin, les données issues des images satellitaires sont les sorties de SPIRITS sur le département de l'Alibori d'une part, et les cumuls par phases phénologiques des valeurs de NDVI extraites d'autre part (Figure 3).

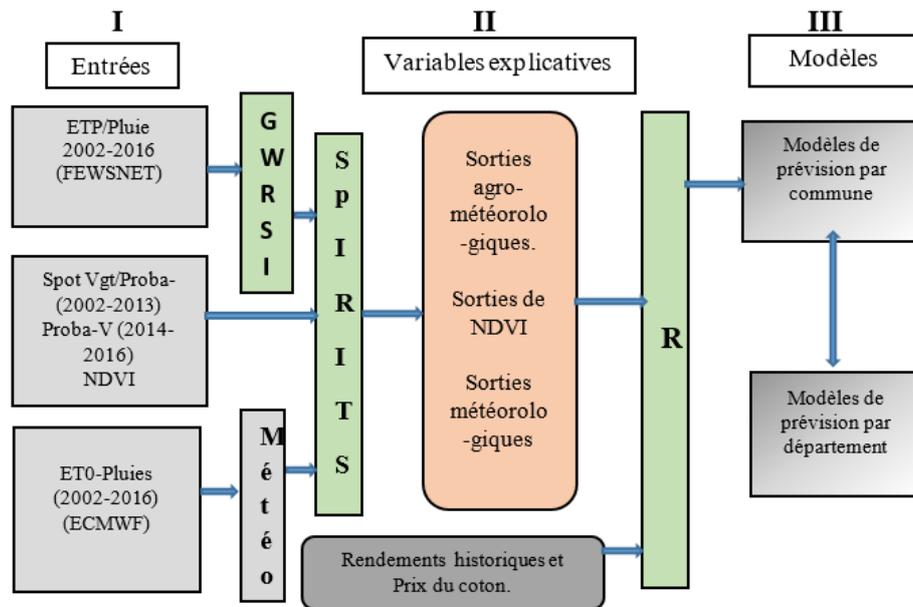


Figure 3 : Méthodologie générale de prévision des rendements dans l'Alibori et Banikoara

2-5. Méthode de collecte de données

Les données de la pluie et de l'ETo, toutes au pas de temps décennales de la période 2002-2016, sont issues du modèle atmosphérique global de l'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) et représentent déjà les valeurs moyennes pour chacune des unités administratives (département et commune). Les séries d'images du NDVI décennales de 2002-2016 du satellite SPOT VEGETATION (2002-2013) et du PROBA-V (2014-2016) sont téléchargées sur le site du VITO. Un lissage temporel afin de réduire l'effet des nuages et le bruit atmosphérique sur les images décennales est réalisé [10]. Malgré la technique utilisée pour la création de NDVI décennaire appelée « Maximum Value Composite », ces bruits persistent dans certaines régions ou pendant les périodes nuageuses. Plusieurs procédures ont été élaborées pour lisser une série d'images par jour, sur la base de la Best Index Slope Extraction (BISE26) [10]. Les images NDVI sont traitées dans SPIRITS

afin de suivre l'évolution de NDVI pendant chaque année et surtout au cours de la période végétative. Les dates de semis, les valeurs des coefficients culturaux, la longueur du cycle végétatif, la capacité de rétention d'eau et le pourcentage de la pluie effective ont été fournis par la FAO en 1987 et confirmés par les organes en charge de la gestion de la filière du coton au Bénin. Les données historiques des rendements du coton et le prix d'achat ont été fournies par la Direction Générale des Statistiques Agricoles au Bénin (DSA) et l'Association Interprofession du Coton. (AIC).

3. Résultats

Les deux jeux de calibrations (Alibori et Banikoara), réalisés à partir d'une seule date de semis estimé en tenant compte d'un cycle de végétatif de 180 jours, ont abouti aux résultats présentés au (**Tableau 1**). Le meilleur et robuste modèle est celui du département de l'Alibori ayant $R^2cv = 0.87$, (**Tableau 1**) le RMSE relatif de 63.68 kg/ha, soit un pourcentage de 5.6 %. Il est basé sur la date de semis de la deuxième décennie du mois de Mai de l'année de campagne. L'évolution des valeurs prédites par ce modèle et celles des valeurs observées est représentée à la (**Figure 2**). Quant aux variables explicatives des deux modèles, les facteurs communs explicatifs sont la valeur maximale de NDVI (Peak-val) et l'Indice de Satisfaction de l'Eau Requise à la phase d'Initialisation $Wrsi_1$. Le modèle de la commune de Banikoara par contre est moins robuste que celui de l'Alibori avec son $R^2cv = 0.66$ et son RMSE relatif = 106.14 kg/ha. (**Tableau 1**), soit un pourcentage de 9.3 % largement inférieur au pourcentage seuil de 20 % d'appréciation d'un modèle de prévision des rendements [10]. Les **Tableaux 1 et 2** qui suivent, présentent respectivement les résultats des validations des différents modèles sur la base d'un cycle de 180 jours du coton et les coefficients culturaux à chaque phase sur la base d'un même cycle végétatif.

Tableau 1 : Résultats des validations des différents modèles calculés sur la base d'un cycle de 180 jours

	R^2cv	RMSE relatif (Kg/ha)	Variables Explicatives
Alibori	0.87	63.68	$Wrsi_1 - Wrsi_4$. Tws_1 . Peak-val
Banikora	0.66	106.14	$Wrsi_1$. Peak-val- $Wrsi_3$ - Prix

avec, $Wrsi_1$: Indice de satisfaction de l'eau requise à la phase initialisation ; $Wrsi_3$: Indice de satisfaction de l'eau requise à la phase de maturation ; $Wrsi_4$: Indice de satisfaction de l'eau requise à la phase finale ; Tws_1 : Excédent hydrique total dans le sol à la phase initiale ; $Wrsi-a3$: Anomalies de l'indice de satisfaction de l'eau requise à la phase de maturation ; Peak-val : Valeur maximale du NDVI au cours du cycle végétatif ; Prix : Prix unique d'achat du coton au cours de la campagne.

Tableau 2 : Les coefficients culturaux à chaque phase sur la base d'un cycle de 180 jours

Pré-essais	Initial	Végétatif	Reproduction	Maturation	Total
FAO	30j	40j	60j	50j	180j
Kc	0.35		1.15	0.5	

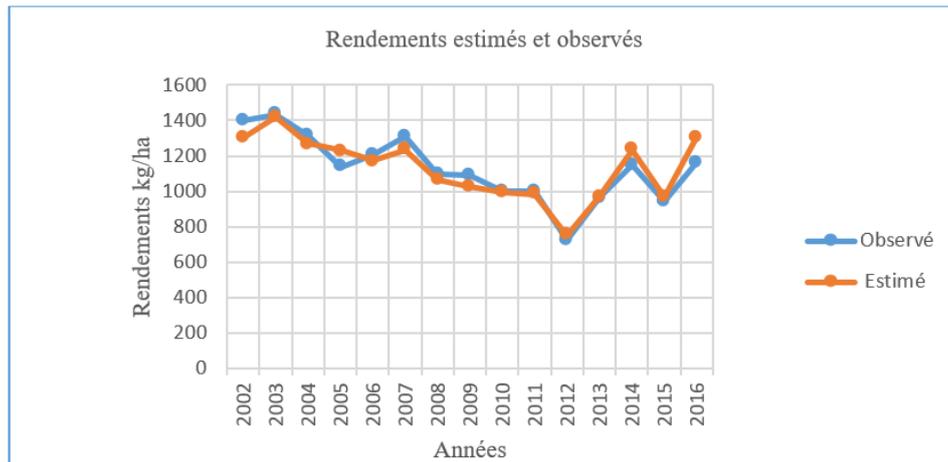


Figure 4 : Comparaison rendements estimés (rouge) et observés (bleu) pour le coton d'un cycle de 180 jours pour l'Alibori

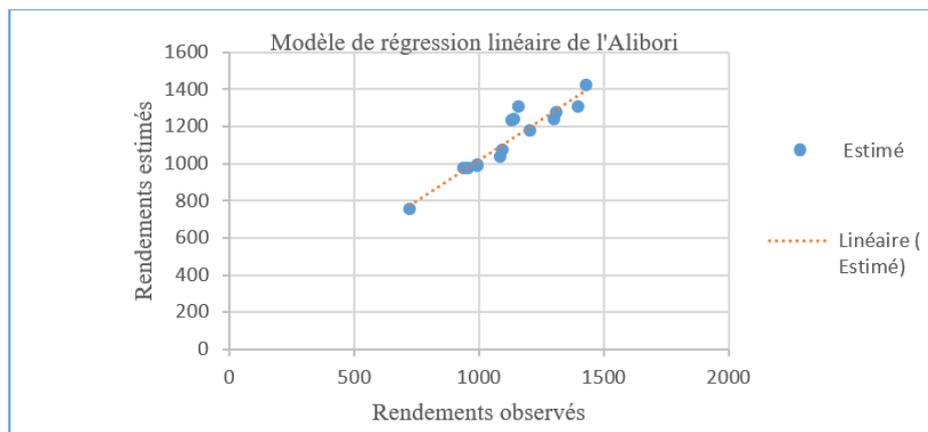


Figure 5 : Modèle de régression linéaire du département de l'Alibori

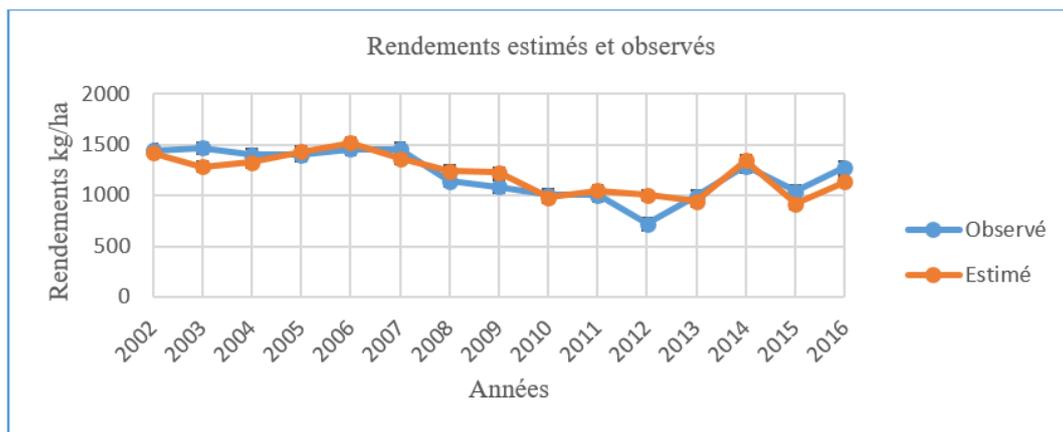


Figure 6 : Comparaison rendements estimés (rouge) et observés (bleu) pour le coton d'un cycle de 180 jours pour Banikoara

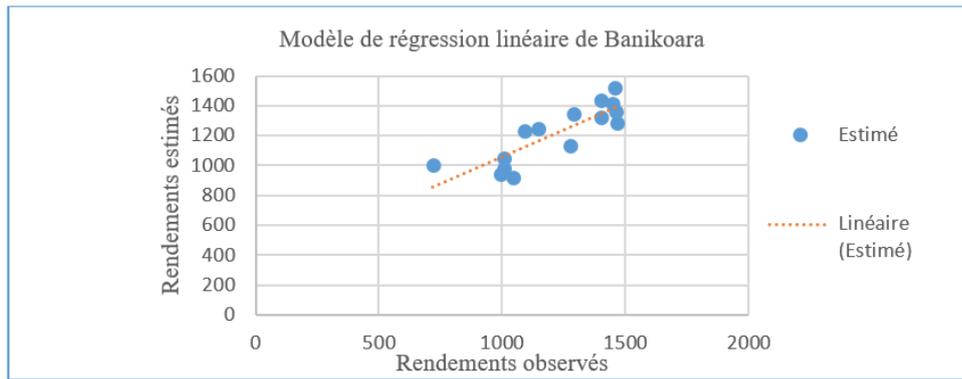


Figure 7 : *Modèle de régression linéaire pour le coton d'un cycle de 180 jours pour Banikoara*

4. Discussion

4-1. Performance des programmes

Globalement les sorties des deux programmes de GéoWRSI et de SPIRITS utilisés se retrouvent dans les différents modèles. Ainsi, cela témoigne de la performance de ces deux outils utilisés dans cette méthodologie de prévision des rendements [11]. Le modèle validé du département de l'Alibori et celui de la commune de Banikoara, ont fait ressortir les variables sorties semblables ou non mais celui de la commune de Banikoara est composé en particulier de la variable prix.

4-2. Importance des variables explicatives

Les résultats présentés plus haut mettent en exergue la pertinence et l'importance de certaines variables telles que l'Indice de Satisfaction de l'Eau Requise (WRSI) pour la culture à la phase d'initialisation et la valeur maximale de NDVI (Peak_val) au cours du cycle végétatif du cotonnier. Le NDVI interprète le développement de la culture [5, 12]. Ces variables sont très corrélées au rendement et très stables par rapport aux données phénologiques, ce qui nous permet de dire qu'ils sont de bons prédicteurs [9]. Toutes les variables utilisées dans les deux modèles sont disponibles à la phase de maturation, à moins un mois avant la phase de fin de cycle, à part une seule variable qui est au fait négligeable ou substituable. De ceci nous pouvons dire, les prévisions des rendements peuvent être opérées à l'aide de ces modèles au moins un mois de la date des récoltes [9, 12]. Ceci permettra aux décideurs de savoir l'état des récoltes à travers les résultats obtenus et de prendre des décisions. Ces résultats permettront aussi, d'évaluer les déficits, de cibler les zones déficitaires, de suivre les zones à risque, de mettre en place des stratégies d'intervention et de faire des alertes humanitaires au besoin [4].

4-3. Département de l'Alibori et commune de Banikoara

Les modèles généraux du département de l'Alibori et de la commune de Banikoara présentent idéalement au plus quatre variables [8], toutes sorties des programmes utilisés. Les coefficients de validation $R^2_{cv} = 0.87$ et le RMSE relatif de 63.68 kg/ha du département de l'Alibori sont les mieux exprimés que ceux de la commune de Banikoara avec $R^2_{cv} = 0.66$ et un RMSE relatif de 106.14 kg/ha. Cette robustesse du modèle de l'Alibori par rapport au modèle de la commune est due au fait que les données historiques de rendements de l'Alibori sont extraites des données agrégées moyennes des rendements du coton de chaque année de toutes les communes qui la composent et donc y compris la commune de Banikoara. Le prix d'achat du coton, est une variable absolument gérée par le gouvernement et est fixé par celui-ci, selon ses objectifs, à l'entame de la campagne cotonnière de chaque année. Cette variable prix apparaît seulement dans le modèle de la commune et est négativement corrélée au rendement.

5. Conclusion

Les données décennales agro météorologiques et satellitaires de NDVI ont permis à l'élaboration des modèles basés sur les données météorologiques, phénologiques variées, avec des résultats satisfaisants et très précis. Le modèle le mieux exprimé est celui de l'Alibori découlant des données agrégées, se caractérisant par un R^2 de validation de 0.87 et un RMSE de 5.6 % (soit 63.68 kg/ha.). Par contre celui de Banikoara issu des données non agrégées des rendements est moins bon avec un R^2 de validation de 0.66 et un RMSE de 9.6 % (soit 106.44 kg/ha). On peut donc déduire que les données agrégées fourniraient des modèles robustes, puissants et précis. Malgré ces résultats pertinents la présente étude n'a pas la prétention d'avoir abordé tous les aspects de la prédiction des rendements dans les domaines d'étude, celle-ci a donc des limites car certains paramètres tels que, les fertilisants, les produits de protection, la main d'œuvre et les conditions générales d'installation des cultures ne sont pas pris en compte. Elle a été réalisée aussi à deux échelles spatiales, le département et la commune. Elle aurait pu être faite avec un plus grand nombre de départements, de communes d'arrondissements, de villages et même avec les parcelles de culture afin d'avoir des possibilités de comparaison des résultats et de sélectionner les meilleurs modèles. Il serait très utile que d'autres études dans le domaine de la prévision des rendements abordent ces aspects afin de mesurer l'influence de ceux-ci sur les rendements du cotonnier ou autres cultures au Bénin.

Références

- [1] - D. E. YAI, B. G. C. AHODODE et F. C. BIAOU, « Incidence du Changement Climatique sur les Productions Agricoles : cas de la commune de Banikoara ». Article. Université de Parakou, Bénin, (2012) 27 p.
- [2] - RGPH4 « Synthèses des résultats du RGPH4 ». INSAE, Bénin, (2013) 8 p.
- [3] - AIC « Manuel d'instruction au personnel impliqué dans le recensement des producteurs de coton et mesures parcellaires », (2010) 26 p.
- [4] - A. L. KOUADIO, « Prévision de la production nationale d'arachide au Sénégal à partir du modèle agro météorologique et du NDVI », Master en Gestion des Risques et Catastrophes. Université de Liège, Belgique, (2007) 41 p.
- [5] - R. AISSAN, « Elaboration de modèles de prévision des rendements du Sorghum Bicolor au Bénin dans les Départements du Borgou et de l'Alibori selon les communes ». Master Complémentaire en Gestion des Risques et des catastrophes, ULiège, Belgique, (2014) 65 p.
- [6] - A. M. TOUCOUROU, « Prévision des rendements du coton dans les Départements de l'Atacora- Donga du Bénin ». Master en Gestion de l'Environnement dans les Pays En voie de Développement, ULiège, Belgique, (2012) 62 p.
- [7] - F. E. H. G. TOSSOU, « Vers une précision de la prévision des rendements cotonniers au Bénin : Cas d'étude dans le département de l'Alibori à partir du modèle agro météorologique GeoWRSI et du NDVI ». Master de Spécialisation en Gestion des Risques et des Catastrophes, ULiège, Belgique, (2018) 65 p.
- [8] - A. KLISCH, A. ROYER, C. LAZAR, B. BARUTH and G. GENOVESE, « Extraction of phenological parameters from temporally smoothed vegetation indices », Workshop proceedings: Remote sensing support to crop yield forecast and area estimates. Allemagne, (2006) 65 p.
- [9] - B. TYCHON, « Suivi de la croissance des cultures : potentialités des modèles agro météorologiques et des systèmes d'observation de la terre ». Communication personnelle Belgique, (2012) 16 p.
- [10] - B. TYCHON et D. ROSILLON, « Prévision des rendements (mil, sorgho, maïs et niébé) », Sénégal. Pp 68-105. Dans Gilliams S., Mars 2007. Service operations report Senegal. Earth Watch GMES Service Element (GSE) ESA ESRIN, (2006) 122 p.

- [11] - R. OGER, D. BUFFET, B. TYCHON, D. DEHEM et H. EERENS, « Estimation et prévision des productions agricoles à l'échelle de la Belgique à l'aide d'un système intégré ». *Modèle agro météorologique - Télédétection, Belgique*, (2000) 28 p.
- [12] - R. BALAGHI, M. JLIBENE, B. TYCHON et H. EERENS, « La prédiction agro météorologique des rendements céréaliers au Maroc » *INRA, Maroc*, (2012) 146 p.