



Revue des Sciences et Sciences de l'ingénieur

Journal of sciences and engineering sciences

ISSN 2170-0737 EISSN: 2600-7029

<https://www.asjp.cerist.dz/en/PresentationRevue/303>



Utilisation du Modèle Agrométéorologique pour la Prévion des Rendements des Céréales au Mali : cas du mil, sorgho et maïs

*Dramane COULIBALY^{1,2}, Souleymane SANOGO^{1,2}, Cheick Oumar SANOGO¹, Moussa KAREMBÉ^{1,3}, Abdramane BA^{1,2}

¹Faculté des Sciences et Techniques (FST)

²Laboratoire d'Optique de Spectroscopie et des Sciences Atmosphériques (LOSSA)

³Laboratoire d'Écologie Tropicale (LET)

Article history

Received: 2020-10-04

Accepted: 2021-01-16

Abstract

The conceptual models of yield prediction were made from water balance indices related to millet, sorghum and maize crops in the Sikasso, Ségou and Mopti departments. The objective is to use an agrometeorological model (AMS) to pre-calculate water balance indices from agrometeorological data. Crop yield data and water balance indices from AMS were combined to establish regression models. Conceptual models of yield prediction are configured from the combination of two to four water balance indices as explanatory variables. The water balance indices with a better predictability of yields are: TWR (total water requirements of the plant), INDXhar (end-of-cycle water satisfaction indices), Cr1a (Decades to which the Rangeland index crosses the line defined by $0.4 \cdot \text{PET}$), WEXt (total value of water excess at the end of the cycle), SWi (Initial content in soil water) and ETA (Actual evapotranspiration at initialization, stages, flowering and harvesting). The best models developed were validated by comparing their estimates to actual values of returns. The cross-validation of the millet yield forecast model of the Ségou circle indicates the following statistics: $R^2_{cv} = 0.51$, RMSE = 144 Kg/ha and the statistics are $R^2_{cv} = 0.45$, RMSE = 137 Kg/ha for the sorghum from the circle of Sikasso. On the other hand, the validation statistics are not very significant for the Mopti circle with coefficients of determination $R^2_{cv} = 0.27$; $R^2_{cv} = 0.20$ and $R^2_{cv} = 0.16$ respectively for millet, sorghum and maize. In this study, conceptual predictive models developed from agronomic and climatic data provided acceptable estimates of millet, sorghum and maize crop yields in the Sikasso, Ségou and Mopti departments.

Key-words: Yield forecast, Mali, early warning, water balance, AgroMetShell.

* Corresponding author.

E-mail address: coulibalywanted@gmail.com (D. Coulibaly).

Résumé

Les modèles conceptuels de prévision des rendements ont été réalisés à partir des indices du bilan hydrique liés aux cultures du mil, du sorgho et du maïs dans les départements de Sikasso, Ségou et Mopti. L'objectif est d'utiliser un modèle agrométéorologique (AMS) pour calculer au préalable les indices du bilan hydrique à partir des données agrométéorologiques. Les données de rendement des cultures et les indices du bilan hydrique, sortis de AMS ont été combinées pour établir des modèles de régression. Des modèles conceptuels de prévision des rendements sont configurés à partir de la combinaison de deux à quatre indices du bilan d'eau, comme variables explicatives. Les indices du bilan d'eau présentant une meilleure prédictibilité des rendements sont : TWR (Besoins totaux en eau de la plante), INDXhar (Indices de satisfaction en eau en fin de cycle), Cr1a (Décades auxquelles le "Rangeland index" croise la ligne définie par $0.4 \cdot \text{PET}$), WEXt (valeur totale de l'excès en eau en fin de cycle), SWi (Contenu initial en eau du sol) et $\text{ETA}(i,f,r)$ (Évapotranspiration réelle aux stades d'initialisation, de floraison et de récolte). Les meilleurs modèles conçus ont fait l'objet d'une validation en comparant leurs estimations aux valeurs réelles des rendements. La validation croisée du modèle de prévision des rendements du mil du cercle de Ségou indique les statistiques suivantes : $R^2_{cv} = 0,51$, $\text{RMSE} = 144 \text{ Kg/ha}$ et les statistiques sont $R^2_{cv} = 0,45$, $\text{RMSE} = 137 \text{ Kg/ha}$ pour le sorgho du cercle de Sikasso. Par contre les statistiques de validation sont peu significatives pour le cercle de Mopti avec des coefficients de détermination $R^2_{cv}=0,27$; $R^2_{cv}=0,20$ et $R^2_{cv}=0,16$ respectivement pour le mil, le sorgho et le maïs. Dans le cadre de la présente étude, les modèles conceptuels de prévision élaborés à partir des données agronomiques et climatiques ont permis des estimations acceptables des rendements des cultures du mil, sorgho et maïs dans les départements de Sikasso, Ségou et Mopti.

Mots-clés : Prévision de rendements, Mali, alerte précoce, bilan hydrique, AgroMetShell.

* Corresponding author.

E-mail address: coulibalywanted@gmail.com (D. Coulibaly).

1. Introduction

Le secteur agricole joue un rôle fondamental dans l'économie et la société de la plupart des pays d'Afrique subsaharienne [1 ;2]. L'économie du Mali repose essentiellement sur le secteur primaire et plus particulièrement sur le secteur agro-sylvo-pastoral qui occupe près de 80% de la population et intervient pour un peu plus de 40% dans le PIB [3]. L'agriculture, fortement dépendante de la pluviométrie est très vulnérable aux effets des variabilités climatiques. L'ensemble de ces éléments affectent et rendent incertain la sécurité alimentaire.

Les principaux processus biophysiques impliqués dans la production agricole, tels que l'évaporation des sols, la transpiration des plantes, les cycles des nutriments et la croissance des plantes, dépendent des variables climatiques [4]. La prévision des rendements agricoles basés sur les variables climatiques est nécessaire pour la réalisation d'un système d'alerte précoce des rendements adaptés à nos différentes zones agricoles. Selon Jlibene and Balaghi [5], les modèles de prévision agricole s'adaptent mieux à des échelles locales, mieux contrôlées et où il est possible d'avoir de l'information précise.

Un système opérationnel de surveillance et de prévision du rendement des cultures a été développé en intégrant les informations météorologiques du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF), le modèle de bilan hydrique spécifique aux cultures (CSWB) et la base de données des zones du système de production des cultures (CPSZ) dans le Système d'Information Géographique (SIG). Le modèle proposé a été appliqué à la première campagne agricole de 2001 et 2002 pour montrer le potentiel en tant qu'outil de suivi agrométéorologique du rendement des cultures en temps réel en Afrique de l'Est [6].

La modélisation du bilan hydrique, est au cœur du développement de la plupart des modèles de prévisions agricoles. Or l'estimation des rendements repose sur des régressions linéaires entre les rendements agricoles et les indices du bilan hydrique.

Cette méthode a déjà été appliquée au Burkina Faso pour la prévision des rendements du mil, du sorgho [9] et du coton [8], mais également au Sénégal pour la prévision des rendements de l'arachide [9]. Dans la littérature nous n'avons pas trouvé des cas d'études utilisant le bilan hydrique pour estimer les rendements agricoles au Mali ; or dans le contexte de la variabilité climatique, des telles méthodes sont indispensables pour l'élaboration des bons systèmes d'alerte précoce des rendements.

La présente étude a pour objectif général, d'utiliser un modèle agrométéorologique AMS, pour l'alerte précoce et la prévision des rendements. Ce modèle est basé sur les données agrométéorologiques et les données des rendements agricoles du Mali de la zone d'étude.

Les objectifs spécifiques sont alors de:

- Utiliser le modèle AMS pour estimer, à partir des variables climatiques, les paramètres du bilan d'eau liés aux cultures ;
- Identifier parmi les paramètres du bilan hydrique, les meilleurs prédicteurs des rendements de mil, sorgho et maïs pour les cercles de Sikasso, Ségou et Mopti;
- Calibrer et valider des modèles d'estimations de rendements de mil, sorgho et maïs dans les cercles considérés.

2. Matériels et méthodes

La présente étude est effectuée sur trois cercles du Mali (Figure 1). Il s'agit des cercles de Sikasso, Ségou et Mopti. Le choix de ces cercles se justifie par la disponibilité des données climatiques et des données agronomiques et aussi par les zones agro-climatiques différentes.

La pluviométrie moyenne annuelle est très variable du Nord au Sud. Les pluies liées aux lignes de grains et aux systèmes convectifs de méso-échelles sont particulièrement importantes aux latitudes sahéennes [10]. Le régime de mousson est le facteur dominant de la saison des pluies. Le climat est marqué par une pluviométrie annuelle décroissante du Sud au Nord (de plus de 1100 mm à moins de 100 mm).

- Le climat est de type soudanien à Sikasso. En hiver, les précipitations y sont plus faibles qu'en été. Il tombe en moyenne 1121 mm de pluies réparties entre 58 à 60 jours par an ;
- Le climat dominant à Ségou est du type soudano-sahélien. Les précipitations sont en moyenne de 642 mm. La mousson soufflant du Sud au Nord est le vent le plus fréquent en hivernage, tandis que l'harmattan, vent dominant en saison sèche souffle du Nord au Sud ;
- Le climat dominant à Mopti est un climat purement sahéen. À Mopti, les précipitations sont peu importantes toute l'année. Sur l'année, la précipitation moyenne est de 495 mm.

2.1 Données climatiques

Les données climatiques sont obtenues auprès de l'Agence Nationale de la Météorologie Mali-Météo. Il s'agit essentiellement de l'humidité relative maximale et minimale, la température maximale et minimale, la précipitation, vitesse du vent et l'évapotranspiration potentielle. Ce sont des données décennales qui couvrent une période de 30 ans (1986 – 2015).

2.2 Données agronomiques

Les statistiques agricoles concernent notamment les rendements annuels des principales cultures céréalières (mil, maïs et sorgho) collectés au niveau de la Cellule de la Direction Nationale de l'Agriculture (DNA) du Mali. Les rendements agricoles utilisés couvrent la période de campagne agricole de 1985/1986 à 2014/2015.

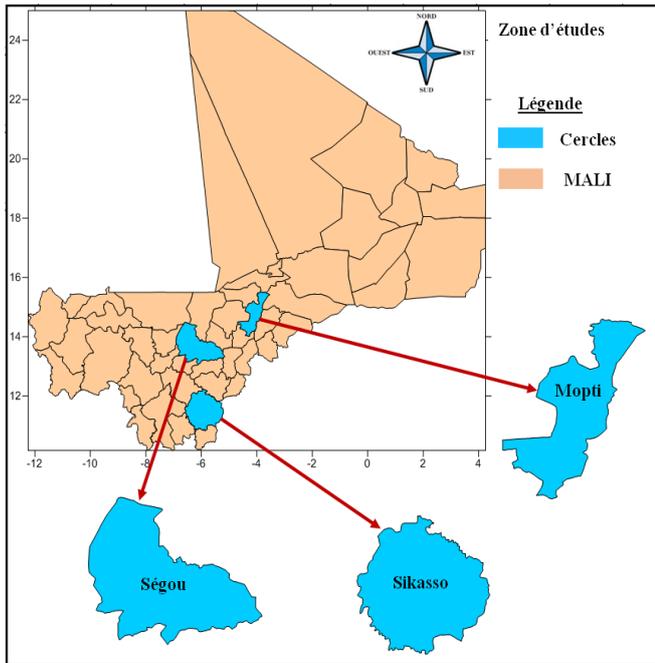


Figure 1 : Carte du Mali montrant les départements administratifs concernés par la présente étude

2.3 Principe de fonctionnement d'AMS

Le modèle AgroMetShell (AMS) est un outil développé par la FAO pour le suivi agro-météorologique des cultures et la prévision des rendements. Les opérations que réalise AMS s'appuient sur le calcul du bilan hydrique des cultures (Figure 2). Une formulation simplifiée de ce bilan peut s'écrire :

$$W_{(j)} = W_{(j-1)} + P - ET_m - \text{autres pertes} \quad (1)$$

- ✓ $W_{(j)}, W_{(j-1)}$: quantité d'eau disponible dans la zone racinaire à la fin des périodes j et $j-1$.
- ✓ P = précipitation durant la période j (gain),
- ✓ ET_m = Évapotranspiration maximale durant la période j (perte),
- ✓ **Autres Pertes** = pertes d'eau par ruissellement et infiltration profonde.

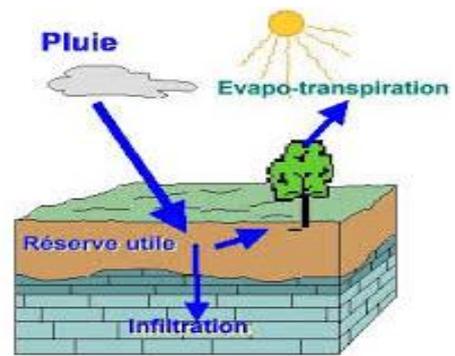


Figure 2 : schéma illustrant le bilan hydrique

$$ET_m = ET_0 \times K_c \quad (2)$$

- ✓ ET_m : l'évapotranspiration réelle de la culture (mm/unité de temps)
- ✓ K_c : coefficient cultural
- ✓ ET_0 : évapotranspiration de référence (mm/unité de temps)

2.3.1 Données d'entrée du modèle AMS

Pour pouvoir tourner, et donc procéder aux simulations des bilans hydriques, AMS doit disposer d'une série d'informations et de données. Les données climatiques concernent essentiellement la pluviométrie, l'évapotranspiration potentielle mesurée au niveau des stations, la durée du cycle de développement de la plante étudiée, les dates de semis, la capacité de rétention en eau du sol, le pourcentage de pluie effective et le coefficient cultural de présaison et des différentes phases phénologiques de la plante (K_c). Ces données doivent être disponibles au format décadaire pour toute la durée du cycle.

2.3.2 Sorties du modèle AMS

Tableau 1: Les sorties de AgrometShell et leur définition.

SWi	Contenu initial en eau du sol.
%avail	Pourcentage de données réelles utilisées pour la simulation (toujours supérieur à 40%).
TWR	Besoins totaux en eau de la plante.
INDX (Harvest, Normal, Latest)	Indices de satisfaction en eau en fin de cycle calculés à partir des données réelles, des données normales et à la dernière décade bénéficiant de données réelles.

WEX (i,v,f,r,t)	Excès en eau à chaque phase phénologique et valeur totale de l'excès en fin de cycle.
WDEF(i,v,f,r,t)	Déficit en eau à chaque phase phénologique et valeur totale du déficit en fin de cycle.
ETA (i,v,f,r,t)	Évapotranspiration réelle de la culture à chaque phase phénologique et valeur totale en fin de cycle.
Cr1a à Cr4a	Décades auxquelles le "Rangeland index" croise la droite définie par $0.4 * PET$. Ces dates qui sont calculées avec les données réelles peuvent être assimilées au début réel de la saison.
Cr1n à Cr4n	Décades auxquelles le "Rangeland index" croise la droite définie par $0.4 * PET$. Ces dates qui sont calculées avec les données normales peuvent être assimilées au début réel de la saison.

Les paramètres se rapportant aux phases d'initialisation, de végétation, de reproduction, et de maturation sont associés respectivement aux indices i, v, f et r. Le "Rangeland Index", ou RI, est un indice de satisfaction en eau calculé sur un intervalle de 5 décades, avec l'évapotranspiration maximale normale prise avec un $KC = 1$ et une capacité de teneur en eau du sol de 50 mm.

3. Results and discussions

Les résultats sont relatifs à la méthode de conception des modèles de rendement, dont le choix des variables explicatives est important et nécessaire pour la bonne réalisation de ces modèles.

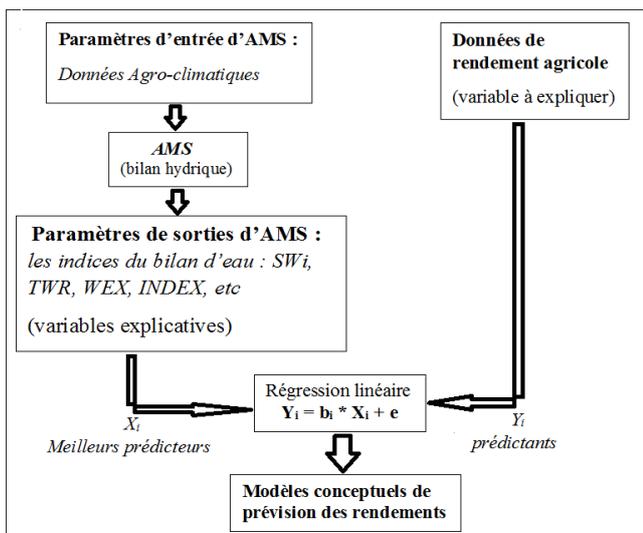


Figure 3 : Schéma technique de la méthode de conception des modèles de rendement

3.1 Méthode de conception des modèles de rendement

3.1.1 Choix des variables explicatives

Le principe du choix de meilleur prédicteur est basé sur le résultat du test de significativité du coefficient de détermination expliquant le lien entre les indices du bilan d'eau et le rendement des cultures. Seules les variables exprimant une variance significative sont à retenir dans la formulation du modèle.

Ces paramètres, indices du bilan d'eau, sont retenus car comparés aux autres facteurs ils présentent un coefficient de détermination (R^2) plus significatif. La valeur de la probabilité (p-value) a été comparée à un seuil préalablement défini (5%). Si p-value est inférieure à ce seuil, on rejette l'hypothèse nulle (probabilité de non événement) en faveur de l'hypothèse alternative, et le résultat du test est déclaré « statistiquement significatif ». Dans le cas contraire, si la p-value est supérieure au seuil, on ne rejette pas l'hypothèse nulle, et on ne garde que les meilleures hypothèses. Ainsi le niveau de confiance correspondant à l'hypothèse alternative est déterminé à partir du contraire de la probabilité de non événement.

L'analyse bivariate entre les rendements et les indices du bilan d'eau a abouti aux résultats suivants :

- Pour le cercle de Sikasso, les indices du bilan d'eau ; ETAi et SWi ont été les mieux corrélés aux rendements du mil et du maïs à Sikasso à la 1ère décade de juin. Les indices ayant des meilleures corrélations avec le rendement du maïs sont SWi et Cr1a.
- Pour le cercle de Ségou, le rendement du sorgho présente quatre indices de bilan d'eau que sont TWR, INDXhar., ETAi et ETAv. L'indice ETAi est corrélé au rendement à la 2ème décade de juillet et l'indice ETAv, à la 2ème décade du mois d'août.
- Pour le cercle de Mopti, les paramètres présentant les meilleures corrélations avec le rendement du mil sont TWR, ETAi et ETAr. Les indices ayant des meilleures corrélations avec le rendement du sorgho sont TWR, INDXhar., ETAf ; et ceux avec le rendement du maïs sont TWR, ETAi, ETAf. L'indice ETAi est corrélé au rendement du mil et Sorgho à la 2ème décade de juillet.

Tableau 2 : résumé sur les meilleures variables explicatives choisies pour la conception des différents modèles de prévision des rendements des cultures.

Cercles	Sikasso	Ségou	Mopti
Cultures	Meilleures variables prédictives		
Mil	ETAi, ETAf, SWi	TWR, INDXhar., WEXt	TWR, ETAi, ETAr
Sorgho	Cr1a, INDXhar., WEXt	TWR, INDXhar., ETAi, ETAv	TWR, INDXhar., ETAf
Maïs	SWi, Cr1a	INDXhar., ETAr, INDXnor.	TWR, ETAi, ETAf

Avec :

- SWi : Contenu initial en eau du sol ;
- TWR : Besoins totaux en eau de la plante ;
- INDXhar., INDXnor. : Indices de satisfaction en eau en fin de cycle (données réelles et données normales) ;
- WEXt : valeur totale de l'excès en eau en fin de cycle ;
- ETAi, ETAf, ETAv, ETAr : Évapotranspiration réelle aux stades d'initiation, floraison, végétatif et récolte ;
- Cr1a : Décades auxquelles le "Rangeland index" croise la droite définie par $0.4 \cdot PET$.

3.1.2 Calibration

Une observation visuelle des données est faite en premier lieu et ensuite le logiciel Matlab est utilisé pour faire les analyses. Les données de rendement des cultures et les indices du bilan hydrique, sortis d'AMS, ont été combinés pour établir des modèles de régression. Les données de 1986 à 2005 sont utilisées pour déterminer les constantes des modèles conceptuels. Pour une culture donnée, nous cherchons à exprimer la tendance générale des rendements Y, en fonction des différentes variables explicatives retenues, sorties d'AMS (X_1, X_2, \dots, X_p) à l'aide d'une équation de régression du type :

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + \dots + b_p \cdot X_p + e. \quad (3)$$

Avec :

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_p$: les coefficients estimés du modèle ;
 e : la composante aléatoire.

La composante aléatoire (e) représente des facteurs non pris en compte comme variables explicatives pour prédire les rendements agricoles, dans le présent cas il s'agit entre autres les intrants agricoles, les variétés des semences, la nature des sols etc...

3.1.3 Validation indépendante

La validation consiste à estimer la variable à prédire en fonction des données de la variable explicative en utilisant la régression multiple établie lors de la calibration. Après la validation croisée des modèles calibrés ; les modèles retenus (Tableau 4) présentent un R^2 plus significatif comparé autres facteurs. Nous constatons que la probabilité de la régression est significative (p -value < 0,05) pour les modèles du mil et du sorgho à Sikasso avec des R^2 respectivement égales 0,40 et 0,45 excédant 95% (p -value < 0,05) de niveau de significativité et pour les modèles du mil et du maïs à Ségou, $R^2 = 0,51$ excède le niveau de significativité de 99% (p -value < 0,01). Par contre, dans le cercle de Mopti aucun modèle ne présente une variance exprimée excédant 90% (p -value < 0,1) de niveau de significativité.

Tableau 3 : Modèles conceptuels de prévision des rendements conçus des céréales (mil, sorgho et maïs) et les statistiques issues de leurs validations croisées. Les variances exprimées excédant 95% et 99% de niveau de confiance sont indiquées respectivement par un astérisque et par deux astérisques.

Cercles	Cultures	Modèles	R ² cv
Sikasso	Mil	$Rdt = -103,5 \cdot ETA_1 - 14,9 \cdot ETA_f - 2,7 \cdot SW_1 + 2960,3$	0,40*
	Sorgho	$Rdt = -1,03 \cdot TWR - 32,2 \cdot INDX_h - 57,3 \cdot Cr1a + 5297,7$	0,45*
	Maïs	$Rdt = -3,78 \cdot SW_1 - 61,93 \cdot Cr1a + 2621,9$	0,24
Ségou	Mil	$Rdt = 8,017 \cdot TWR - 4,294 \cdot INDX_h + 0,76 \cdot WEX_t - 1708,5$	0,51**
	Sorgho	$Rdt = -2,4 \cdot TWR - 14,1 \cdot INDX_h - 14,4 \cdot ETA_1 + 7,5 \cdot ETA_v + 2657,3$	0,29
	Maïs	$Rdt = -14,58 \cdot INDX_h + 19,8 \cdot INDX_N + 13,3 \cdot ETA_r + 702,51$	0,41*
Mopti	Mil	$Rdt = -2,064 \cdot TWR - 168 \cdot ETA_1 + 2,26 \cdot ETA_r + 2423,6$	0,27
	Sorgho	$Rdt = -2,9 \cdot TWR + 6,7 \cdot INDX_h + 1,32 \cdot ETA_f - 2171,8$	0,20
	Maïs	$Rdt = -2,38 \cdot TWR + 80,24 \cdot ETA_1 + 8,38 \cdot ETA_v - 397,04$	0,16

3.1.4 Validation indépendante des modèles

Les analyses effectuées par la validation indépendante montrent la fiabilité des modèles quel que soit les paramètres climatiques étudiés, et tant qu'ils sont utilisés dans leurs domaines de validité. Les données de 10 ans (2006-2015) ont été utilisées pour faire la validation indépendante. On a comparé les estimations faites, aux mesures réelles de ces 10 ans, pour déterminer les paramètres statistiques : les variances expliquées (R^2) et la son niveau de significativité.

- Pour le cercle de Sikasso

Les indicateurs d'appréciations ($R^2 = 0,26$; $R^2 = 0,11$ et $R^2 = 13$) (Figure 4) respectivement pour le mil, sorgho et maïs, de la validation indépendante montre qu'il n'y a pas une relation forte entre les rendements réels et rendements simulés. L'erreur des modèles sur les rendements est très considérable et les valeurs prédites sont peu significatives. On constate que, pour le mil et le maïs, les modèles sous-estiment les rendements. Par contre, les rendements du sorgho sont surestimés par le modèle.

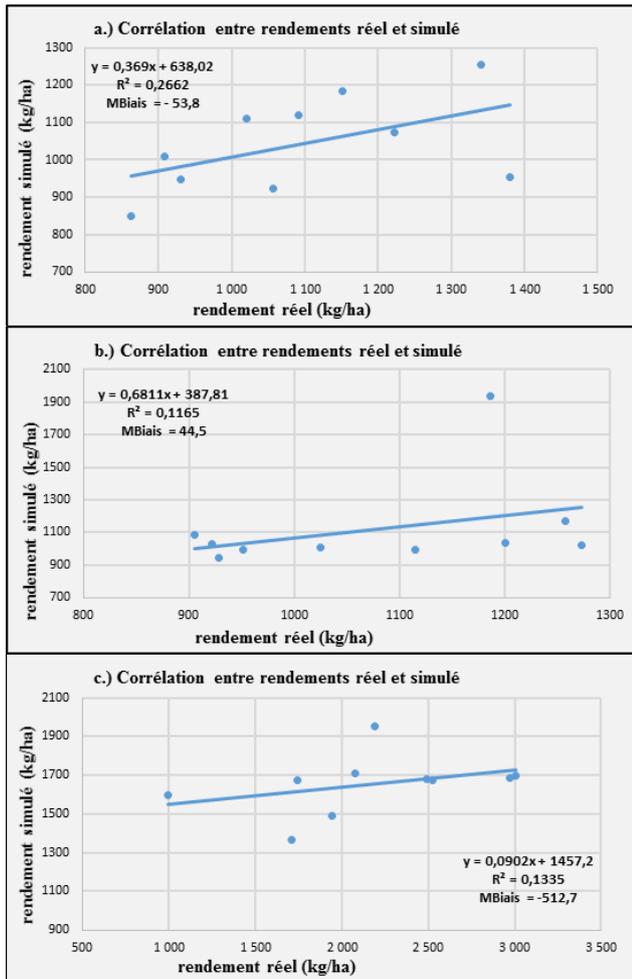


Figure 4 : les trois figures montrent la régression linéaire entre les rendements réels et prédits du mil (a), sorgho(b) et maïs(c) pour le cercle de Sikasso.

- Pour le cercle de Ségou

Pour le mil, le coefficient de détermination ($R^2 = 0,48$) (Figure 5) nous montre que la relation entre les rendements réels et rendements simulés est considérable. Mais pour le sorgho et le maïs cette relation est très faible, on observe qu'il n'y a pas une très grande concordance entre rendements réels et rendements simulés pour ces deux cultures avec des coefficients de détermination respectives ($R^2 = 0,14$ et $R^2 = 0,25$) (fig. 5). Ce qui pourrait laisser penser que, le modèle trouvé pour le mil par la validation croisée ($R^2_{cv} = 0,51$) (tableau 4) est pertinent pour simuler le rendement.

Comme pour le cas de Sikasso, par la moyenne des biais, le mil et le maïs ont été sous-estimés par les modèles alors que le sorgho est surestimé par le modèle.

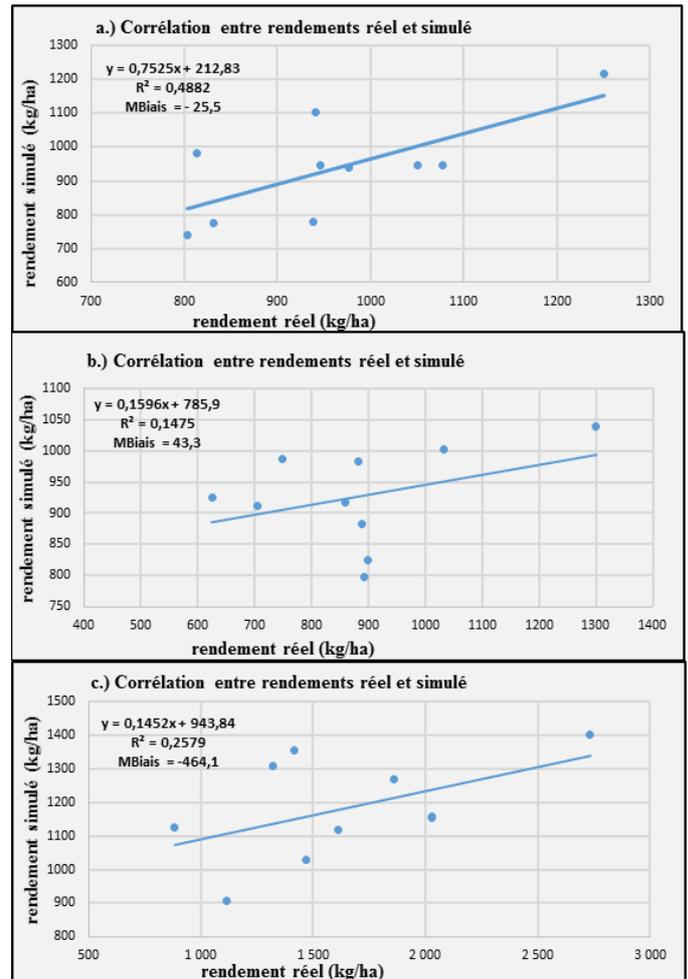


Figure 5 : les trois figures montrent la régression linéaire entre les rendements réels et prédits du mil (a), sorgho(b) et maïs(c) pour le cercle de Ségou.

- Pour le cercle de Mopti

La relation entre les rendements réels et rendements simulés n'est pas très grande pour les trois cultures et les statistiques de performance trouvées par la validation sont peu significatives. On constate que les rendements des trois cultures, ont tous été sous-estimés par les modèles. Cependant, la Figure 6 montre que les coefficients de détermination entre rendements réels et rendements simulés restent légèrement faibles pour les trois cultures : pour le mil ($R^2 = 0,26$), pour le sorgho ($R^2 = 0,10$) et pour le maïs ($R^2 = 0,18$).

3.1.5 Discussion

Il est intéressant de noter que chacun des modèles obtenus présente au moins deux à quatre facteurs explicatifs qui ont un sens du point de vue agronomique. Ces résultats exposés ci-dessus mettent en évidence l'importance des variables explicatives dans les différents modèles. La capacité prédictive de ces modèles retenus est entre autres légèrement satisfaisante.

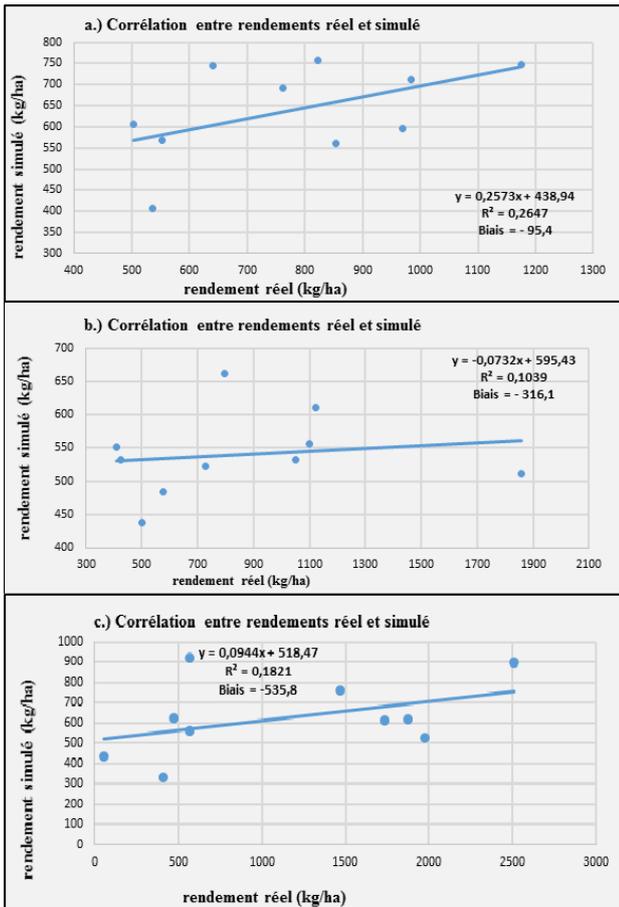


Figure 6 : les trois figures montrent la régression linéaire entre les rendements réels et prédits du mil (a), sorgho(b) et maïs(c) pour le cercle de Mopti.

Ainsi, TWR (Besoins totaux en eau de la plante), INDXhar (Indices de satisfaction en eau en fin de cycle), Cr1a (Décades auxquelles le "Rangeland index" croise la ligne définie par $0.4 \cdot PET$), WEXt (valeur totale de l'excès en eau en fin de cycle), SWi (Contenu initial en eau du sol) et ETA (i, f, r) (Évapotranspiration réelle aux stades d'initialisation de floraison et de récolte) se retrouvent dans les quatre modèles les plus performants pour estimer le rendement.

Ce qui pourrait laisser penser que, ces paramètres sont les plus corrélés aux rendements par rapport aux autres et que ce sont donc des bons prédicteurs. Les impacts du changement climatique ont été évalués sur les besoins en eau des cultures, les besoins en eau d'irrigation, les rendements et la productivité en eau des cultures du maïs pluvial dans le bassin de la rivière Ogun-Osun, au Nigeria. L'étude a montré que les besoins en eau d'irrigation devraient augmenter considérablement dans la période future, tandis que le rendement pourrait probablement diminuer [11].

Le rendement du blé d'hiver a été prévu pour la Turquie à l'aide du modèle de bilan hydrique, les paramètres de

l'indice de satisfaction en eau, calculés par le modèle Agrometshell, ont été régressés avec les statistiques historiques de rendement des cultures de l'Institut national de statistique pour produire des prévisions de rendement des cultures avant la récolte [12]. Cette approche est basée sur les données des stations agrométéorologiques pour estimer les conditions de l'usine et le rendement [13,14].

In this project Water Satisfaction Index parameters, calculated by Agrometshell model, were regressed with historic crop yield statistics of State Institute of Statistics to produce crop yield forecasts before harvest time. Contraire à d'autres méthodes développées, cette approche est simple et intègre principalement les données de stations météorologiques avec des paramètres constants des cultures. Ainsi on trouve que Ogutu et al. [15] a proposé un système de prévision des rendements pour l'Afrique de l'Est, mais ce système repose sur des simulations de modèles qui n'ont pas été validées avec des données d'observation à une échelle infranationale de sorte que la précision des prévisions est inconnue. Liu et Basso [16] fournissent une prévision de rendement pour trois études de cas en Tanzanie basées sur un modèle basé sur les processus avec un délai de 14 à 77 jours. Ils calibrent et valident les prévisions à l'aide de données d'enquête à l'échelle du terrain.

Pour les modèles élaborés dans le cadre de la présente étude, certains représentent des paramètres qui sont disponibles au début de la saison agricole (phase d'initialisation) et juste avant la récolte (phase de maturation). Ceci signifie que les estimations des rendements peuvent être faites à l'aide de ces modèles au moins un mois avant les dates de récolte. Ces résultats obtenus auraient pu être beaucoup meilleurs en termes de prévision si on avait utilisé en plus des facteurs climatiques, les données satellitaires de NDVI comme dans le cas des études précédentes [5; 7] qui ont trouvés des résultats encore meilleurs.

4. Conclusion

Dans le cadre de la présente étude, les modèles conceptuels de prévision élaborés à partir des données agronomiques et climatiques ont permis des estimations acceptables des rendements des cultures du mil, sorgho et maïs dans les cercles de Sikasso, Ségou et Mopti. Le meilleur d'entre eux, conçu sur des variables prédictives favorables à l'alerte précoce, est caractérisé par un R^2 de validation croisée de 0.51 et conduit à une RMSE d'environ 144 kg/hectare. Cependant, les variables explicatives des modèles conceptuels telles que les indices ETai, ETAv, ETAf, ETAf, TWR, Cr1a, INDXhar et SWi sont obtenues plutôt avant la phase récolte, ce qui permet leur applicabilité à l'alerte précoce des rendements. Ces résultats satisfaisants pourront certainement contribuer à l'amélioration des outils

de prévision des rendements agricoles. Les méthodes de prévision des rendements peuvent être développées pour d'autres cultures, à l'instar des céréales, car le modèle AMS fournit des paramètres pour plusieurs autres cultures.

Remerciements :

Ces activités de recherche ont été pleinement soutenues par deux programmes au sein de la Faculté des Sciences et Techniques de Bamako (FST): "International Science Programme (ISP) / UPPTS" à travers le Laboratoire d'Optique, de Spectroscopie et des Sciences Atmosphériques (LOSSA) et le programme WAPP à travers le Laboratoire d'Ecologie Tropicale (LET).

5. Références

- [1]. Banque mondiale, Rapport annuel de la Banque mondiale - Rapport annuel 2007
- [2]. Dewbre J et A. B. Battisti . Progrès agricole au Cameroun au Ghana et au Mali. Comprendre les causes et maintenir la dynamique. Oecd 2004.
- [3]. FAO. Intégrer les questions de genre dans le secteur forestier en Afrique, Mali, 2007.
- [4]. Raza, A.; Razzaq, A.; Mehmood, S.S.; Zou, X.; Zhang, X.; Lv, Y.; Xu, J. Impact of Climate Change on Crops Adaptation and Strategies to Tackle Its Outcome: A Review. *Plants* 2019, 8, 34.
- [5]. Jlibene M. et R. Balaghi. Le risque sécheresse en agriculture pluviale : cas des céréales. *Transfert de Technologie en Agriculture*, 2009, n°181.
- [6]. Rojas O, F. Rembold, A. Royer, and T. Negre. Real-time agro-meteorological crop yield monitoring in Eastern Africa. *Agronomie* 2005, DOI: 10.1051/agro:2004056
- [7]. RAMDE O. L'alerte précoce et la prévision des rendements agricoles au Burkina Faso : cas de trois provinces Passoré, Yatenga et Soum. 2009. (Mémoire de master).
- [8]. Bronne, C.E., Wellens, J., Diakitè, M., Farid, T., Diallo, M. et Tychon¹, B. Elaboration d'un modèle de prévision des rendements cotonniers dans la province du Houet, Burkina Faso: 2009.
- [9]. Kouadio. Prévision de la production nationale d'arachide au Sénégal à partir du modèle agrométéorologique AMS et du NDVI. Des interuniversitaires en gestion des risques naturels, ULiege : 2007
- [10].Gaye A., Viltard, de Félice. Lignes de grains et pluies en Afrique de l'Ouest : variations diurnes. *Sécheresse* 2004 ; 15 (3) : 287-92
- [11].Durodola O.S and K. A. Mourad. Modelling Maize Yield and Water Requirements under Different Climate Change Scenarios. *Climate* 2020, 8, 127
- [12].Yildiz H, A. Mermer, M. Aydoğdu. Forecasting of Winter Wheat Yield for Turkey Using Water Balance Model. Conference Paper DOI: 10.1109/Agro-Geoinformatics.2015.7248135, 2015.
- [13]. Gomme R.A. Pocket Computers in Agrometeorology. FAO Plant Production and Protection Paper No. 45. Rome, Italy 1983.
- [14]. FAO. Early Agrometeorological Crop Yield Assessment. FAO Plant Production and Protection Paper No. 73. Rome, Italy 1986.
- [15]. Ogotu, G. E. O., Franssen, W. H. P., Supit, I., Omondi, P. & Hutjes, R. W. A. Probabilistic maize yield prediction over East Africa using dynamic ensemble seasonal climate forecasts. *Agric. For. Meteorol.* 250–251, 243–261, 2018.
- [16]. Liu, L. & Basso, B. Linking field survey with crop modeling to forecast maize yield in smallholder farmers' fields in Tanzania. *Food Secur.* 12, 537–548, 2020.