

MINISTRE DE L'EDUCATION NATIONALE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

oooooooooooooooo

UNIVERSITE DES SCIENCES, DES TECHNIQUES ET DES
TECHNOLOGIES DE BAMAKO (USTTB)



ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DU MALI (EDSTM)

REPUBLIQUE DU MALI
Un Peuple-Un But-Une Foi
oooooooooooooooo

THESE DE DOCTORAT

TITRE:

Combinaison de méthodes de phénotypage et de modélisation
pour l'identification de lignées de sorgho (*Sorghum bicolor*
(L) Moench) adaptées au climat soudano-sahélien du Mali

Pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université des Sciences, des Techniques et des
Technologies de Bamako (USTTB)

Domaine: Agriculture

Spécialité : Modélisation des cultures

Présentée et soutenue le : 29/10/2020/

Par **Mme Madina DIANCOUMBA**

Jury

Président : Pr Alhousseini BRETAUDEAU, Professeur
Titulaire, IPR/IFRA, Katibougou, Mali

Membres

Examineur : Dr. Michel VACKSMANN, Directeur de Recherche, CIRAD/IER, Mali

Examineur : Pr Moussa KAREMBE, Professeur Titulaire, FST-USTTB, Bamako, Mali

Examineur : Pr Moussa SAMAKE, Professeur Titulaire, FST-USTTB, Bamako, Mali

Rapporteur : Pr Ousmane NIANGALY, Professeur Titulaire, IPR/IFRA, Katibougou,
Mali

Rapporteur : Dr. Sory SISSOKO, Maître-Assistant, FST-USTTB, Bamako, Mali

Directeur : Pr Mahamoudou FAMANTA, Professeur Titulaire, IPR/IFRA, Katibougou
Mali

Co-directeur : Dr. Vincent VADEZ, Directeur de Recherche, IRD-ICRISAT, France

Table des matières

Table des matières	i
Dédicace	v
Remerciements	vi
Liste des sigles et abréviations	viii
Liste des Figures	x
Liste des Tableaux	xii
Liste des annexes	xiii
Résumé	xiv
Abstract.....	xvi
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE	6
1.1 Généralités sur le sorgho	6
1.1.1 Origine et dispersion géographique.....	6
1.1.2 Morphologie du sorgho	6
1.1.3 Croissance et développement du sorgho	9
1.1.4 Besoins en eau du sorgho	10
1.2 Généralités sur les modèles	17
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES	19
2.1 Caractérisation des scénarios de stress hydrique et leurs effets sur la production du sorgho au Mali utilisant une approche de modélisation	19
2.1.1 Sites d'étude	19
2.1.2 Données utilisées	20
2.1.3 Description du modèle APSIM	24
2.1.4 Méthodologie.....	28
2.2 Modélisation de l'interaction GxExM pour l'identification des meilleures pratiques culturales pour la variété de sorgho CSM335 (TIÉBLÉ) au Mali.....	32
2.2.1 Choix de la variété et de données sur les pratiques culturales.....	32

2.2.2 Mise en place de simulations.....	33
2.3 Evaluation des résultats de simulations des effets combinés de différentes pratiques culturales sur le sorgho par le modèle APSIM au Mali.....	36
2.3.1 Matériel végétal.....	36
2.3.2 Conduite de l'essai	36
2.3.3 Données climatiques.....	40
2.3.4 Données sur le sol.....	40
2.3.5 Analyse statistique.....	41
2.4 Réponse de la transpiration des lignées parentales de sorgho malien au déficit de pression de vapeur atmosphérique et au séchage du sol.....	41
2.4.1 Matériel végétal et conditions de croissance de la plante.....	41
2.4.2 Essais de déficit de pression de vapeur (VPD).....	43
2.4.3 Essais d'assèchement du sol	44
2.4.4 Protocole de mesure	45
2.4.5 Analyse statistique.....	49
CHAPITRE III : RÉSULTATS.....	51
3.1 Caractérisation des scénarios de stress hydrique et leur effet sur la production du sorgho au Mali utilisant une approche de modélisation	51
3.1.1 Paramétrage des variétés	51
3.1.2 Validation du modèle	55
3.1.3 Types de stress hydriques identifiés	58
3.1.4 Fréquence d'occurrence des principaux types de stress hydrique à travers les isohyètes	60
3.1.5 Evolution des scénarios de stress hydrique à travers les saisons, sites et sols.....	63
3.1.6 Rendement en grains	65
3.2 Modélisation de l'interaction G x E x M pour identifier les meilleures pratiques susceptibles d'avoir un impact significatif sur les scénarios de déficit hydrique et les rendements du sorgho au Mali.....	67
3.2.1 Dates de semis.....	67
3.2.2 Utilisation des engrais	74
3.2.3 Densité de semis	80

3.3 Evaluation des résultats de simulation de l'effet combiné de différentes pratiques culturales sur le sorgho par le modèle APSIM au Mali.....	85
3.3.1 Effets des dates de semis sur les rendements	85
3.3.2 Effets des différentes doses d'engrais sur les rendements.....	86
3.3.3 Effets de la densité de semis sur les rendements	87
3.3.4 Effet combiné de la date de semis, de la fertilisation et de la densité de semis sur les rendements.....	87
3.4 Réponse de la transpiration des lignées parentales de sorgho malien au déficit de pression de vapeur atmosphérique et au séchage du sol.....	88
3.4.1 Réaction des variétés au VPD à travers la transpiration dans des environnements contrôlé et naturel.....	88
3.4.2 Réaction des variétés à l'assèchement du sol à travers la transpiration dans des environnements contrôlé et naturel (dans les pots)	95
3.4.3 Réaction des variétés à l'assèchement du sol à travers la transpiration dans les lysimètres (Essais 7 et 8)	96
3.4.4 Réaction des variétés au VPD et à la baisse d'humidité du sol dans les pots et dans les lysimètres.....	98
CHAPITRE IV : DISCUSSION.....	99
4.1 Caractérisation des scénarios de stress hydrique et leur effet sur la production du sorgho au Mali utilisant une approche de modélisation	99
4.1.1 Changement d'algorithmes était nécessaire pour prédire la performance agronomique des types de cultures sensibles à la photopériode	99
4.1.2 Scénarios de stress hydrique identifiés ainsi que leur fréquence d'occurrence dans la zone d'étude.....	99
4.1.3 Variabilité du rendement en grains selon les scénarios de stress hydrique, les zones bioclimatiques et le type de sol	100
4.2 Modélisation de l'interaction G x E x M pour identifier les meilleures pratiques susceptibles d'avoir un impact significatif sur les scénarios de déficit hydrique et les rendements du sorgho au Mali.....	102
4.3 Evaluation des résultats de simulation de l'effet combiné de différentes pratiques culturales sur le sorgho par le modèle APSIM au Mali.....	104

4.4 Réaction des lignées parentales de sorgho malien au déficit de pression de vapeur atmosphérique et au séchage du sol à travers la transpiration	106
CHAPITRE V : CONCLUSION ET PERSPECTIVES	109
5.1 Caractérisation des scénarios de stress hydrique et leurs effets sur la production du sorgho au Mali utilisant une approche de modélisation	109
5.2 Modélisation de l'interaction G x E x M pour identifier les meilleures pratiques susceptibles d'avoir un impact significatif sur les scénarios de déficit hydrique et les rendements du sorgho au Mali.....	110
5.3 Evaluation des résultats de simulation de l'effet combiné de différentes pratiques culturales sur le sorgho par le modèle APSIM au Mali.....	111
5.4 Réaction des lignées parentales de sorgho malien à travers la transpiration au déficit de pression de vapeur atmosphérique et au séchage du sol	111
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	113
ANNEXES.....	xvi

Dédicace

A Baba et Maman,

J'aurais tout donné, si je pouvais, juste pour que vous soyez là avec moi pour témoigner et surtout apprécier le fruit de votre effort car si je suis là aujourd'hui c'est surtout grâce à vous.

Qu'Allah Soubhana Wa Ta'Allah vous accueille dans son paradis éternel, amen.

Remerciements

Ce travail de thèse a vu le jour grâce à l'accompagnement et au support des collègues supérieurs, parents et amis. De ce fait, à son terme, j'exprime ma profonde reconnaissance à tous ceux-ci, qui ont de près ou de loin contribué à sa réalisation.

Tout d'abord je remercie mes superviseurs : le Professeur Mahamoudou Famanta, qui a accepté sans condition de superviser ce travail au moment où je cherchais désespérément un encadreur et qui a été disponible pendant ces longues années malgré ses multiples occupations; Dr Vincent Vadez, Dr Jana Kholova qui ont cru en moi, qui ont été patients et qui m'ont acceptés dans leur équipe pluridisciplinaire, une des meilleures que je connaisse et qui m'ont donné l'opportunité de faire cette thèse et de passer des mois inoubliables, plein d'échanges et de découverte en Inde; et Dr Myriam Adam qui a accepté d'être mon encadreur de Bamako à l'ICRISAT et m'a accueillie chaleureusement durant mes séjours à Bobo Dioulasso. Merci à vous tous pour votre temps, votre patience, votre disponibilité, votre appui, vos encouragements et votre contribution scientifique.

Qu'il me soit permis d'exprimer ma profonde gratitude au Doyen de la FST de l'USTTB, le Professeur Fana Tangara et au Chef de département de Biologie, le Professeur Alpha Seydou Yaro, de m'avoir accepté comme étudiante dans ledit département. Que tous les enseignants du département de Biologie trouvent ici l'expression de ma profonde satisfaction.

Je remercie particulièrement le Professeur Karambé Moussa qui a facilité mon adhésion au sein de la famille du Département d'Enseignement et de Recherche (DER) de Biologie de la FST.

Je remercie de tout cœur le Professeur Alhousseïni Bretaudeau pour sa disponibilité, son temps et pour les cours privés dispensés.

Je remercie sincèrement Dr Sory Sissoko pour les orientations, les conseils, la disponibilité et surtout pour le temps consacré à la lecture de ma thèse. Dr Sissoko fut la première personne externe qui a bien voulu lire mon document en entier, merci beaucoup pour cela.

Qu'il me soit aussi permis d'exprimer mes sincères remerciements au Directeur pour l'Afrique de l'Ouest et du Centre de l'Institut de Recherche sur les Cultures des Zones Tropicales Semi-arides (ICRISAT), Dr Ramadjita Tabo, pour m'avoir acceptée au sein de la famille ICRISAT.

Dr Eva Weltzien et Dr Fred Rattunde, vous avez accepté de m'accueillir et vous avez guidé mes premiers pas de recherche comme étudiante en thèse, je vous en suis très reconnaissante.

Dr Aboubacar Touré et Dr Baloua Nebié, merci de m'avoir offert le confort nécessaire et d'avoir mis à ma disposition les outils nécessaires pour la réalisation de cet ouvrage. Merci surtout pour vos précieux conseils, votre orientation et surtout votre temps.

Mes sincères remerciements vont à l'équipe GEMS de l'ICRISAT Inde pour leur accompagnement, leur conseil et leur support.

Qu'il me soit permis de remercier tout le personnel scientifique de l'ICRISAT Mali pour l'assistance que vous m'avez apportée et l'atmosphère agréable créée autour de moi.

Merci particulièrement à l'équipe du Programme sorgho de l'ICRISAT Mali, plus particulièrement Badra, Mamourou, Sissoko, Tangara, Aly, Sabine, Marthe, Toure, Sidi, Sékouba, Sidibé, Mariam, Diakité, et Bouba. Chaque jour passé avec vous était pour moi un réel plaisir.

Merci à tous les chercheurs de l'ICRSIAT Samanko à savoir Dr Jummai Yila pour m'avoir ouvert sa porte dans un cadre de travail idéal, les Docteurs Haile Desmae, Tapsoba, Samuel Partey, John, Robert, Mathieu et Hyppolite pour vos précieux temps consacrés à la lecture de mon document et pour vos conseils précieux, Dr Birhanu pour m'avoir consacré le fonds nécessaire pour la finalisation de mes travaux, Monsieur Sibiry Traore et Dr Benoit Clerget pour la mise à disposition des données de culture et de climat.

Mes sincères remerciements vont à l'Administration de l'ICRISAT particulièrement à Mr Bila, merci pour l'écoute et l'appui, aux services IT particulièrement Mohamed Diakite, Finances, RH, Voyage, Achats, Garage, Ferme, Infirmerie, Standard, et Nettoyage sans lesquels je n'en serais pas là. J'exprime ma profonde reconnaissance à mes amis du champ et de la serre (Koné, Drissa, Barrou, Tangara, Yoro, Madou Diarra, etc.).

Je remercie Dr Michel Waksman du CIRAD Mali pour avoir pris tout son temps pour m'expliquer des paramètres de modélisation qui n'étaient pas encore clair pour moi.

Merci au joyeux club des étudiants de l'ICRISAT Mali, j'espère pouvoir continuer à vous fréquenter malgré nos parcours diversifiés.

Je remercie le Dr Chiaka Diallo de l'IPR/IFRA de Katibougou pour son aide et son appui et le Dr Laya Kansaye de la même structure pour ses corrections, son assistance et son précieux temps.

Enfin, merci à ma famille pour son appui, sa patience et ses encouragements surtout pendant mes périodes d'absence.

Liste des sigles et abréviations

ABA :	Acide abscissique
ANOVA :	Analysis of variance (Analyse de variance)
APSIM :	Agricultural Production Systems SIMulator
BCNAM :	Backcross Nested Association Mapping
CGIAR:	Consultative Group on International Agricultural Research
CIRAD :	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
°Cj :	Degré jours (Temps thermique)
°Cd:	Degree-days (degrés-jours)
°Cd.h⁻¹:	Degree-days per hour (degrés-jours par heure)
CRE :	Capacité de rétention en eau du sol
CSM :	Collection des sorghos du Mali
D :	Densité de semis
DAP :	Di-ammonium Phosphate (Phosphate diammonique)
DNA :	Direction Nationale de l'Agriculture du Mali
DS:	Date de semis
DSSAT:	Decision Support System for Agro technology Transfer
ENSO:	<i>El Niño</i> -Southern Oscillation
FAO :	Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)
FTSW :	Fraction d'eau du sol utilisable par la plante
G x E x M :	Génotype x Environnement x Management
ICRISAT :	International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (Institut International de Recherche sur les Cultures des Zones Tropicales Semi-arides)
IER :	Institut d'Economie Rurale
ILA :	Surface foliaire individuelle (Individual leaf area approach)
IP :	Initiation paniculaire
IPR/IFRA :	Institut Polytechnique Rural de Formation et de Recherche Appliquée
JAS :	Jours après semis
LAI :	Leaf Area Index (indice de surface foliaire)
Max LNo :	Maximum leaf number (Nombre total de feuilles)

N :	Azote
PAM :	Programme Alimentaire Mondial
Pcrit 1 :	Photopériode critique 1
Pcrit 2 :	Photopériode critique 2
PIB :	Produit Intérieur Brut
PIRT :	Projet Inventaire des Ressources Terrestres au Mali
Pp :	Photopériode
Ppslope :	Photoperiod slope (la pente de la photopériode)
RMSE :	Root mean square error (erreur quadratique moyenne)
TE :	Efficiencce de la transpiration
TPLA :	Surface foliaire totale
Tr :	Taux de transpiration
USAID:	United States Agency for International Development
USDA:	United States Department of Agriculture
VPD :	Vapor Pressure Deficit (Déficit de pression de vapeur)
Wise :	World Inventory of Soil Emission Potentials (Inventaire mondial des émissions potentielles du sol)
WS:	Water Stress
WW:	Well-Watered

Liste des Figures

Figure 1 : Localisation des sites d'étude à travers les grandes zones bioclimatiques	20
Figure 2 : Relation entre la longueur du jour et le temps thermique cumulé de la fin de la phase juvénile à l'initiation paniculaire.....	26
Figure 3: Estimation de la taille et de la position de la plus grande feuille.....	28
Figure 4 : Plan de masse de l'essai de validation du modèle	37
Figure 5 : Image des opérations de repiquage	38
Figure 6 : Marquage de feuille pour mesure (a) échelle utilisée pour la mesure de hauteur des plants (b).....	39
Figure 7 : Appareil de mesure de la surface foliaire (planimètre LI-1300, LICOR, Lincoln, NE)	40
Figure 8 : Technique de mesure de la surface foliaire.....	40
Figure 9 : Plan d'échantillonnage du sol	41
Figure 10 : Etapes de mise en place des essais en pot et lysimètre	49
Figure 11 : Comparaison des données simulées et observées pour les deux variétés de sorgho.....	54
Figure 12 : Évaluation de la performance du modèle.....	57
Figure 13 : Scénarios de stress hydrique identifiés pour chaque année simulée sur les 22 sites d'étude pour les variétés CSM63E et CSM335.....	58
Figure 14 : Principaux types de stress hydrique identifiés pour les deux variétés	59
Figure 15 : Dynamique de chaque scénario de stress hydrique identifié à travers cinq isohyètes au Mali	62
Figure 16 : Fréquence d'occurrence des 3 types de stress hydrique pour CSM63E et CSM335 sur le sol à faible et forte capacité de rétention d'eau (CRE).	64
Figure 17 : Distribution des rendements en grains simulés à travers les scénarios de stress hydrique .	65
Figure 18 : Rendement moyen en grains, simulé à travers les isohyètes	67
Figure 19 : Principaux scénarios de stress hydrique identifiés sous les 3 dates de semis	71
Figure 20 : Rendements moyens de trois séries de dates de semis présentés par type de stress hydrique, par type de sol (Faible CRE et Forte CRE) et pour chaque isohyète	73
Figure 21 : Fréquence d'occurrence des 3 scénarios de stress hydrique sous les 4 doses d'application d'engrais.....	75
Figure 22 : Fréquence d'occurrence des 3 scénarios de stress hydrique par dose d'engrais étudiés.....	77
Figure 23 : Probabilité cumulative du rendement en grains de CSM335 par dose d'engrais et pour les 3 scénarios de stress hydrique	79
Figure 24 : Comparaison de l'occurrence des 3 scénarios de stress hydrique par site d'étude, pour chaque niveau d'engrais et pour les 3 densités de semis étudiées	82

Figure 25 : Réponse du rendement en grains à différentes densités simulées par niveau d'engrais, par isohyète et scenario de stress hydrique. Les lignes représentent la quantité d'eau utilisée par les plantes pendant la saison	84
Figure 26 : Rendements en grains (A) et en biomasse (B) des 3 variétés semées à 3 dates de semis...	86
Figure 27 : Rendements grains (a) et biomasse (b) obtenus par type de fertilisation pour les trois variétés	87
Figure 28 : Rendements en grains (A) et en biomasse (B) obtenus par densité de semis pour les trois variétés testées	87
Figure 29 : Transpiration de trois différents génotypes en réponse à différentes conditions de VPD ..	94
Figure 30 : Transpiration de Lata3 évaluée en Inde et au Mali en réponse à l'abaissement de l'humidité du sol	95
Figure 31: Somme totale des valeurs de l'efficiéce de la transpiration de 32 lignées parentales de sorgho (A : Essai conduit pendant la saison pluvieuse en 2016; B : Essai conduit en contre-saison en 2017	97

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Données sur les sites d'étude.....	21
Tableau 2 : Données sur les types de sol.....	22
Tableau 3: Données sur les variétés de sorgho testées de 2000-2008	23
Tableau 4 : Dates de semis définies par des experts ou observées dans les champs paysans	33
Tableau 5 : Données générales sur les différents essais de VPD et de la baisse d'humidité du sol au Mali et en Inde.....	42
Tableau 6 : Coefficients calculés pour le paramétrage.....	52
Tableau 7 : Fréquence d'occurrence (en pourcentage) des 3 scénarios de stress hydrique.....	60
Tableau 8 : Comparaison des trois dates de semis étudiées par isohyète.....	69
Tableau 9 : Comparaison de l'occurrence des types de stress hydrique (%) par dose d'engrais et par densité de semis.....	81
Tableau 10: Intersection, les 2 pentes / segments et le R2 des 12 géotypes dont la transpiration est adaptée à la régression segmentée.....	90
Tableau 11 : Résultats des deux essais d'abaissement d'humidité du sol montrant le seuil de FTSW auquel le taux de transpiration a commencé à baisser.....	96

Liste des annexes

Annexe 1: Experiment data set used for traits parameterization. SD: sowing dates; Dens: sowing density.	xvi
Annexe 2 : Frequency of occurrence of the 3 stress scenarios (and grain yield kg ha-1) across isohyets for CSM335 and CSM63E. WSD 1: Water supply and demand ratio 1 (“no stress”); WSD 2: early pre-flowering terminal stress; WSD 3: at-flowering stress.....	xviii
Annexe 3: L’approche ILA n’arrivant pas à prédire la surface foliaire des variétés produisant plus de 27 feuilles	xix
Annexe 4: Analyse de variance des effets combinés des pratiques culturales sur les rendements en grains de CSM335	xx

Résumé

Dans la zone soudano-sahélienne du Mali, les rendements actuels du sorgho restent inférieurs aux rendements potentiels malgré les progrès réalisés par les sélectionneurs dans cette zone. Une des causes supposées de ce faible rendement est le stress hydrique. Cette étude a été entreprise pour mieux comprendre les facteurs environnementaux qui influencent la performance des variétés. Elle a pour objectif de contribuer à l'amélioration des techniques de sélection pour une meilleure production et une meilleure adaptation des variétés de sorgho aux conditions climatiques du Mali. La méthodologie utilisée a porté sur la recherche documentaire, la simulation du modèle de culture « Agricultural Production Systems SIMulator » (APSIM), l'évaluation du modèle APSIM, la conduite d'essais en milieu naturel au champ, dans les pots et dans les lysimètres et en milieu contrôlé. Cette étude a porté sur la détermination du type et de la fréquence des principaux scénarios de stress hydrique utilisant le modèle de culture APSIM, la détermination de l'impact des pratiques culturales (la date de semis, le dose et la période d'application de la fertilisation et la densité de semis) sur les scénarios de stress hydrique identifiés et les rendements obtenus et sur l'identification des lignées de sorgho qui possèdent un caractère de limitation d'eau par transpiration lorsque la demande atmosphérique augmente et que le contenu en eau du sol diminue. Les résultats ont révélé trois scénarios distincts sur les sites testés pour CSM-335 (TIÉBLÉ) et CSM-63E (JAKUMBE) : (i) Pas ou peu de stress hydrique (83 % et 73 % respectivement pour JAKUMBE et TIÉBLÉ), (ii) Stress hydrique précoce pendant la préfloraison (9 % - 19 % respectivement pour JAKUMBE et TIÉBLÉ) et Stress hydrique se produisant pendant la floraison (9 % et 7 % respectivement pour JAKUMBE et TIÉBLÉ). Des rendements relativement faibles ont été simulés même avec le scénario « Pas ou peu de stress hydrique », particulièrement dans les principales zones de production des 2 variétés (zone sahéenne pour CSM-63E : rendement en grains de 1469 kg.ha⁻¹, zone soudanienne pour CSM-335 : rendement en grains de 817 kg.ha⁻¹) et cela suggérait que d'autres facteurs limitants (densité de semis, date de semis et application de N) pourraient être la cause de la faible productivité du sorgho au Mali. Les résultats ont aussi montré que les rendements plus élevés sont obtenus avec les semis précoces. Il a également été observé que la plus grande quantité de fertilisation (qui est la fertilisation recommandée 100 kg.ha⁻¹ de DAP au semis et 50 kg.ha⁻¹ d'urée 45 jours après le semis) a donné le meilleur rendement en grains sur tous les sites et sur toutes les années observées mais a également provoqué la plus grande fréquence d'occurrence du stress

hydrique précoce pendant la préfloraison. Les résultats d'évaluation ont montré que le modèle avait prédit de manière satisfaisante l'effet de la date de semis et de la fertilisation sur le rendement mais que sa prédiction de l'effet de la densité de semis était différente des résultats observés au champ. Douze des trente-huit variétés étudiées ont montré une limitation dans leur transpiration lorsque le VPD augmentait. De plus, une grande variabilité a été observée entre la perte d'eau des variétés par transpiration en réponse à la baisse d'humidité du sol. Ces résultats indiquent que certains génotypes de sorgho malien sont capables de limiter leur transpiration, qui est une stratégie d'économie de l'eau du sol pour une utilisation ultérieure pendant la saison.

Mots clés : APSIM, sorgho, stress hydrique, scénarios, rendement grains, phénotypage, pratiques culturales, modélisation

Abstract

In the Sudano-Sahelian zone of Mali, the actual yield of sorghum remains below the potential despite the progress made by sorghum breeders in this region, and one hypothetical reason of this low yield is water stress. This study was undertaken to better understand the environmental factors that influence the performance of sorghum varieties. The study aimed at contributing to the improvement of breeding techniques for better production and better adaptation of sorghum varieties to the climatic conditions of Mali. The methodology used was essentially focused on literature review, "Agricultural Productions Systems Simulator" (APSIM) model simulation, the evaluation of the APSIM model and field, lysimeters and pots trials conducted in natural and controlled environments. This study focused mainly on determining, using APSIM cropping model, the type and frequency of occurrence of the main water stress scenarios prevailing in the sorghum production region of Mali and that could affect the growth of two genotypes CSM335 (TIÉBLÉ) and CSM63E (JAKUNBE). It also intended to determine the impact of selected cultural practices (sowing time, fertilization rate and application period and sowing density) on the main water stress scenarios identified and, on the yield, obtained and identify sorghum lines that have the ability of limiting water lose by transpiration when atmospheric demand increases or when the soil water content decreases. Results revealed three distinct water stress scenarios in all sites and for CSM335 (TIÉBLÉ) and CSM63E (JAKUNBE) notably the (i) No stress scenario (83 % and 73 % respectively for JAKUMBE and TIÉBLÉ), (ii) Early pre-flowering stress scenario (9 % - 19 % respectively for JAKUMBE and TIÉBLÉ) and a stress scenario that occurred during flowering time (9 % and 7 % respectively pour JAKUMBE and TIÉBLÉ). Yet, the still relatively low yield realized in these regions suggested that other limiting factors (e.g., plant density, sowing date, fertilizer input) could elevate sorghum productivity. Results also showed highest yields with the sowing done early. Moreover, the greatest amount of fertilization (which is the recommended fertilization 100 kg.ha⁻¹ of DAP at sowing and 50 kg.ha⁻¹ of urea 45 days after sowing) gave the best grain yield in all sites and across all years, however, it also increased the frequency of the early pre-flowering stress scenario. The model evaluation results showed that the model predicted the sowing date and fertilization effect on yield satisfactorily; nevertheless, its prediction of the effect of sowing density was different from the results observed in the field. Twelve of the thirty-eight varieties studied showed a limitation in their water lose by transpiration when the VPD increased. In addition, a high

variability was observed among genotypes water lose by transpiration as response to the decrease of soil water content. These results indicate that certain Malian sorghum genotypes are capable of limiting their water lose by transpiration, which is a strategy of saving soil water for later use during the cropping season.

Key words: APSIM, sorghum, water stress, scenarios, grain yield, phenotyping, cultural practices, modeling

INTRODUCTION

L'Afrique a une économie qui se repose essentiellement sur le secteur primaire. Ce secteur occupe près de 80 % des produits d'exportation Africains (Economie de l'Afrique, 2019). Le secteur primaire est constitué en grande partie du secteur agricole qui occupe plus de deux-tiers de la population active de la majorité des pays Africains (FAO, 1995). En Afrique de l'Ouest, plus de 60 % de la main-d'œuvre, dont la majorité est féminine, vit et travaille dans les zones rurales et tire l'essentiel de leurs moyens de subsistance du secteur agricole (Namara et Sally, 2014). L'agriculture dans cette partie de l'Afrique représente en moyenne 35 % du PIB mais cela varie largement d'un pays à un autre. Au Mali, l'agriculture représente plus de 35 % du PIB et occupe plus de 80 % de la population active (FAO, 2017). Le secteur agricole est caractérisé par les cultures de rente (coton, arachide, etc.) et les cultures céréalières (riz, mil sorgho, maïs, etc.) qui constituent les principales cultures vivrières (FAO, 2017). Les céréales telles que le sorgho constituent un aliment de base non seulement au Mali mais aussi dans plusieurs pays en voie de développement d'Asie et d'Afrique. Au Mali, le sorgho est consommé sous plusieurs formes (le tô, la bouillie, le couscous, le dolo, le dégué et autres) entraînant l'augmentation de sa production. Cette augmentation a nécessité des efforts de recherche accrus pour développer des cultivars stables à haut rendement, résistants aux maladies et aux ravageurs importants, et résistants aux stress abiotiques comme la sécheresse. La sécheresse est un facteur important de stress hydrique et une contrainte majeure pour l'agriculture dans les régions semi-arides. La variabilité fortement incertaine de son occurrence dans l'espace et dans le temps peut causer une instabilité des rendements et des risques pour la production (Sultan et al, 2014). Ainsi il est indispensable de déterminer les principaux types de stress hydrique qui prévalent dans la zone de production du sorgho au Mali et qui affectent la croissance et le développement des variétés. En plus, l'évaluation des paramètres morpho-agronomiques de ces variétés s'avère essentiel pour une meilleure appréciation de l'adaptation au climat du Mali. Néanmoins, déterminer ces types de stress hydrique dans toute la bande de production du sorgho au Mali à travers les essais multi-locaux et sur plusieurs années peut être difficile à réaliser. Les modèles de croissance des cultures peuvent servir à caractériser l'environnement de production d'une culture donnée et ainsi identifier les principaux types de stress hydrique affectant la culture du sorgho.

Plusieurs études ont été menées sur la caractérisation de l'environnement de production du sorgho à travers le monde. Chapman *et al.* (2000 c) ont utilisé un modèle de simulation des

cultures pour caractériser les types de stress hydrique qui se produisent dans la zone de production du sorgho des zones semi-arides d'Australie. Ils ont identifié trois principaux types de stress hydrique : un stress hydrique de faible intensité qui se produit 33 % du temps, un stress hydrique de forte intensité qui se produit 38 % du temps et un stress hydrique d'une intensité intermédiaire qui se produit 29 % du temps. Une approche similaire a été utilisée par Kholová *et al.* (2013) dans la zone de production du sorgho en Inde utilisant le modèle de culture « Agricultural Production Systems SIMulator (APSIM) » avec la variété de sorgho locale M35-1. Ils ont identifié cinq principaux types de stress hydrique pouvant intervenir dans la période de croissance de M35-1. Au Mali, Vaksman *et al.* (1996) ont utilisé un modèle de bilan hydrique pour caler les caractéristiques variétales de quatre variétés locales (CSM 63E ou JAKUMBÉ, CSM 219 ou NTOKO, CSM388 ou JIGISÉMÉ et Bibitif Dialan) de sorgho en fonction de la période de semis et de la date moyenne de fin des pluies. Cela leur a permis de déterminer les zones optimales de culture pour chaque variété et de mesurer les risques agro-climatiques. De même, Kouressy *et al.* (2002) ont caractérisé la saison pluvieuse sur 110 stations pluviométriques au Mali en fonction du cycle des sorghos et ont trouvé que plus on se déplace vers le sud plus la saison démarre précocement et se termine tardivement. Cependant, ces études restent limitées en ce sens qu'elles n'ont pas pris en compte les relations sol-plante-atmosphère.

Les plantes comme le sorgho utilisent différentes stratégies d'adaptations morphologiques et physiologiques pour survivre à la sécheresse intermittente ou continue qui peut se produire pendant la durée de leur cycle. Une stratégie d'adaptation employée par le sorgho est la limitation de la perte d'eau par transpiration lorsque la demande atmosphérique augmente (Vadez *et al.*, 2011). Plusieurs mécanismes (par exemple : fermeture des stomates, réduction de la surface foliaire) expliquant l'expression de ce caractère et son impact positif sur le rendement ont été précédemment rapporté par plusieurs études (Kholová *et al.*, 2010 ; Choudhary *et al.*, 2013 ; Vadez et Ratnakumar, 2016 ; Sinclair *et al.*, 2017). Choudhary *et al.*, (2013) ont conduit quatre types d'essais pour évaluer l'impact de la conductance hydraulique des feuilles (Kleaf) sur les caractéristiques d'utilisation de l'eau de deux variétés de sorgho de l'Inde. Ils ont trouvé que la conductance des feuilles de la variété 1 (SC15) était inférieure à celle de la variété 2 (SC1205). Ils ont expliqué que cette faible conductance des feuilles de SC15 était associée à une limitation de la perte d'eau par la transpiration due à une baisse du niveau d'eau du sol. Ils ont également trouvé que SC15 pouvait limiter sa transpiration sous une demande atmosphérique élevée, supérieure à 2,1 kPa, contrairement au SC1205. Ainsi, une fois les principaux scénarios de stress hydrique identifiés, les caractéristiques des plantes

qui s'adaptent mieux à ces scénarios peuvent être déterminées. De ce fait, des variétés de sorgho ayant différentes caractéristiques seront évaluées sous différents types de stress hydrique dans des environnements contrôlés et naturels pour déterminer celles qui possèdent des stratégies de résistance à ces stress imposés. De telles recherches sont encore rares à notre connaissance, au Mali. C'est dans ce contexte que se situe la présente étude.

Dans cette étude, nous nous proposons dans un premier temps d'utiliser un indice de stress hydrique, qui est une variable de sortie du modèle APSIM, pour identifier les principaux scénarios de stress hydrique pouvant affecter des variétés sélectionnées de sorgho tout au long du cycle cultural. Cet indice est le ratio entre la demande en eau de la plante, dépendant du climat et du statut de la plante et l'eau disponible pour les racines au temps t . Cette caractérisation de l'environnement peut aider les agriculteurs dans le choix des variétés et les sélectionneurs dans la diffusion de nouvelles variétés.

Objectifs de recherche

L'objectif général :

Contribuer à l'amélioration des techniques de sélection par l'utilisation du modèle « Agricultural Production Systems SIMulator (APSIM) » combinée à des méthodes de phénotypage, pour une meilleure production du sorgho dans les conditions climatiques du Mali.

Les objectifs spécifiques :

1. Caractériser les scénarios de stress hydrique qui affectent deux variétés de sorgho (CSM63E ou JAKUMBÉ et CSM335 ou TIÉBLÉ) en utilisant le modèle APSIM et le phénotypage ;
2. Evaluer la fréquence d'occurrence des scénarios de stress hydrique ainsi que leurs effets sur les rendements en grains en utilisant le modèle APSIM et le phénotypage ;
3. Déterminer les effets des pratiques agricoles paysannes sur les types de scénarios de stress hydrique, leur intensité et leur fréquence d'occurrence et sur les rendements en grains du sorgho ;
4. Identifier des variétés de sorgho qui possèdent des caractères d'adaptation à la sécheresse à l'aide des types de stress comme le « Vapor pressure deficit » (VPD) et le « drydown »

Questions de recherche

Question principale de recherche :

L'Amélioration des techniques de sélection est-elle réalisable avec le modèle APSIM combiné à des méthodes de phénotypage ?

Questions spécifiques de recherche :

1. Quels sont les types de scénarios de stress hydrique qui affectent deux variétés de sorgho (CSM63E ou JAKUMBÉ et CSM335 ou TIÉBLÉ) à travers l'utilisation le modèle APSIM et le phénotypage
2. Comment les méthodes de phénotypage et de modélisation peuvent-elles contribuer à l'identification de la fréquence d'occurrence des scénarios de stress hydrique ainsi que leurs effets sur les rendements en grains des variétés de sorgho dans la zone soudano-sahélienne du Mali ?
3. Le modèle APSIM peut-il aider à tester l'impact des pratiques culturales sur les scénarios de stress hydriques identifiés et les rendements du sorgho ?

4. Quelle méthode de phénotypage peut aider à identifier les variétés de sorgho qui possèdent des caractères de conservation d'eau pour une meilleure utilisation ultérieure ?

Hypothèse de recherche

Hypothèse principale :

Le modèle APSIM combiné à des méthodes de phénotypage peut contribuer à améliorer les techniques de sélection pour des variétés de sorgho adaptées aux conditions climatiques du Mali.

Hypothèses secondaires :

1. Plusieurs types de stress hydrique affectent les deux variétés de sorgho (CSM63E ou JAKUMBÉ et CSM335 ou TIÉBLÉ)
2. L'indice de stress hydrique, qui est une variable du modèle APSIM, peut être utilisé comme un indicateur de stress hydrique car il nous renseigne sur l'état hydrique de la plante ;
3. Les modèles de culture permettent de quantifier l'impact des pratiques culturales sur l'intensité et la fréquence d'occurrence des scénarios de stress hydrique et sur les rendements en grains de CSM335 ;
4. Le « Vapor pressure deficit » (déficit de pression de vapeur ou VPD) et le « drydown » sont des types de stress qui permettent d'identifier les variétés résistantes aux conditions de déficit hydrique.

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Généralités sur le sorgho

1.1.1 Origine et dispersion géographique

Le sorgho (*Sorghum bicolor* (L) Moench) est une graminée utilisée depuis des siècles dans la consommation humaine. Il fait partie des espèces primitivement cultivées par l'homme. Le sorgho serait originaire du Nord-Est de l'Afrique tropicale où il a probablement été domestiqué. Cependant, si l'origine africaine du sorgho fait consensus, sa période de domestication fait objet de discussion. Selon l'agence canadienne (2017), la découverte des vestiges archéologiques non loin de la frontière entre l'Égypte et le Soudan indiquerait que la culture du « *Sorghum bicolor* » a commencé 8500 à 4000 ans au début de l'Holocène. D'autres chercheurs ont rapporté que la domestication du sorgho a pris place il y a 5000 à 8000 ans (Mann *et al.*, 1983 ; Hariprasanna et Patil, 2015). Murdock (1959) a suggéré que le sorgho aurait pu être domestiqué par les peuples du Mandé qui vivaient le long du fleuve Niger. De Wet et Huckabay (1967) ont identifié sur la base d'une corrélation entre les données morphologiques et la distribution de trois centres de domestication du sorgho en Afrique : l'Afrique de l'Ouest où est cultivée la race guinea, la région Bantu où l'on trouve la race khafir et la région Arabe où l'on trouve les races bicolor et durra. En toute hypothèse, sa culture s'est répandue à d'autres régions d'Afrique et de l'Inde le long des voies terrestres et maritimes à travers le commerce.

Elle s'est ensuite répandue par le transport, depuis l'Éthiopie jusqu'au Moyen-Orient, en Inde, en Chine et en Asie du Sud-Est. Il a été introduit pour la première fois aux États-Unis en 1857 et a été largement employé au début des années 1900 pour la fabrication de sirop (Doggett 1965a ; House, 1987).

1.1.2 Morphologie du sorgho

Les caractéristiques morphologiques du sorgho varient selon les variétés et les conditions environnementales (Prasad et Staggenborg, 2009). Cette variation est plus accentuée chez l'espèce *S. bicolor*, ce qui a entraîné sa subdivision par Snowden (1936, 1954) en vingt-huit espèces cultivées (28) et vingt-quatre sauvages (24). Cependant, l'absence de barrières

observées entre ces espèces laisse à croire qu'elles appartiennent à un même genre (De Wet et Huckabay, 1967).

•*La tige*

Le plant de sorgho est érigé et comporte une tige principale issue du développement de l'embryon de la graine. Cette tige est robuste, de forme ronde et peut mesurer jusqu'à 5 m (Comm. pers.) de hauteur et 5 cm (Agence canadienne, 2017) de diamètre vers la partie basale. Elle est constituée d'un enchaînement de nœuds alternant avec des entre-nœuds. Ces nœuds qui sont comme des anneaux à la base de la gaine foliaire servent de point d'attache des feuilles à la tige et cela jusqu'à la base de la panicule. Un bourgeon se forme successivement à chaque nœud, sauf au nœud se trouvant à la base de la panicule. Ces bourgeons se trouvent en alternance d'un côté à l'autre de la tige et se développent parfois en talles axillaires. A la périphérie et au centre des tiges se trouvent des faisceaux vasculaires. Les faisceaux du centre qui sont les plus gros se ramifient dans les nervures médianes des feuilles, alors que ceux de la périphérie se ramifient pour former les plus petites veines dans le limbe foliaire (House, 1987). La tige présente un tissu interne, la moelle, qui peut être sèche ou juteuse. Cette moelle s'enrichit progressivement à partir de la montaison en sucres simples. Cet enrichissement est bien marqué chez les sorghos sucrés dont la moelle à maturité doit être juteuse pour permettre l'extraction du sucre (Chanterreau *et al.*, 2013).

•*Les talles*

Le sorgho peut faire pousser des plants secondaires en plus du plant principal. Ces plants secondaires sont appelés des talles et sont formés à partir des bourgeons axillaires des nœuds à la base du plant principal. Le tallage commence environ deux semaines après le semis chez le sorgho. Les talles émises secondent le plant principal ou le remplacent en cas de cassure de ce dernier.

La capacité du sorgho à émettre des talles et l'importance du tallage varient selon les variétés. Ainsi, les variétés guinea produisent comparativement plus de talles. Cependant l'importance du tallage du sorgho peut être influencée par plusieurs facteurs notamment la densité de semis, la température, la période de semis, l'alimentation hydrique, etc.

•*Les feuilles*

Les feuilles s'insèrent au niveau des nœuds de la tige à raison d'une par entre-nœud. Elles présentent un angle à peu près constant entre feuilles successives d'une même tige. Chaque feuille est constituée d'une gaine enserrant la tige sur une longueur d'environ 20 à 25 cm, puis d'un limbe plat, linéaire à lancéolé, largement arrondi à la base, avec, à leur jonction, une ligule. La taille finale des feuilles de sorgho croît linéairement en fonction de leur ordre

d'apparition sur la tige jusqu'à une plus grande feuille puis diminue progressivement jusqu'à la feuille terminale. La taille des feuilles peut varier d'une variété à l'autre et selon les conditions de culture. Les dimensions des feuilles peuvent varier de 30 à 135 cm de long et de 1,5 à 13 cm de large. Le nombre de feuilles produit par tige principale varie largement selon les variétés et dépend de la longueur de la phase végétative. Il peut varier de 15 feuilles pour les variétés précoces jusqu'à 40 feuilles pour les variétés tardives. Les feuilles ont une forme dressée à leur apparition et prennent une forme incurvée formant un arc après leur développement complet.

•*Les racines*

Le sorgho possède un système racinaire bien développé. Ses racines peuvent atteindre une profondeur de 180 cm et une distance latérale d'environ 90 cm (Miller, 1916). Cependant, il a été établi que la plus grande activité et concentration des racines se trouvent dans les 30 cm supérieurs du sol (Blum *et al.*, 1977). Le système racinaire est constitué de racines primaires qui apparaissent au moment de la germination et qui produisent de nombreuses ramifications secondaires tout en pénétrant le sol. Par la suite, les racines nodales sont successivement produites par le premier nœud embryonnaire souterrain et par des nœuds suivants, tous souterrains et ces derniers présentent un nombre croissant de racines nodales. A la longue la racine primaire est remplacée par ces racines nodales et finit par disparaître. Subséquemment, les racines nodales émises par les nœuds aériens assurent l'ancrage de la plante. Chaque racine nodale est composée d'un axe primaire et des ramifications secondaires. L'allongement de ces racines en profondeur et dans les 30 cm supérieurs du sol permet une optimisation pour l'exploration et l'extraction de l'eau du sol (Chantereau *et al.*, 2013).

•*La panicule*

L'inflorescence du sorgho est une panicule qui peut être courte et compacte ou lâche et ouverte. Ainsi, la forme et la couleur de la panicule varient selon les cultivars. La panicule a un rachis central, qui est la partie terminale de la tige et sur lequel sont insérées des branches primaires. Ces branches primaires présentent des branches secondaires et parfois tertiaires courtes ou longues qui portent des racèmes. Chaque racème regroupe une ou plusieurs paires d'épillets d'une ou deux fleurs bisexuées. Un épillet est toujours sessile fertile et l'autre pédicellé stérile à l'exception de l'épillet terminal qui est sessile fertile et flanqué de deux épillets pédicellés stériles.

La longueur et la proximité des branches primaires déterminent la forme de la panicule qui varie de coniques ou ovales densément tassés à étalés et relâchés.

•*La graine*

La graine a une forme plus ou moins circulaire. Elle est constituée de trois parties principales qui sont le péricarpe, l'albumen et le germe. Le péricarpe constitue l'enveloppe externe de la graine. L'albumen est le tissu de réserve de la graine. Le germe se trouve à la base de la graine. Il est en grande partie enchâssé dans l'albumen et comprend l'embryon et le scutellum.

1.1.3 Croissance et développement du sorgho

Le cycle de production du sorgho varie entre 80 (pour les variétés précoces) et plus de 150 jours (pour les variétés tardives). Selon Chantereau *et al.* (2013), le cycle du sorgho peut être divisé en trois stades phénologiques : le stade végétatif, le stade reproductif et le stade de remplissage et de maturation des graines. La durée de ces stades varie selon les variétés, les conditions climatiques, la date de semis pour les variétés photopériodiques et la température.

➤*La phase végétative allant de la germination à l'initiation de la panicule*

Cette phase débute lorsque les graines de sorgho cultivées dans le sol commencent à absorber de l'eau, à se gonfler et à germer. Cette germination se produit en général 3 à 5 jours après semis dépendant des conditions de température et d'humidité du sol (Prasad et Staggenborg, 2009). Elle est plus rapide dans les sols qui ont des températures supérieures à 20 °C (House, 1987). Cette étape de germination est suivie par la levée ou l'émergence des plantules qui dure 5 à 10 jours. La germination se produit avec la brisure du tégument et l'apparition d'un coléoptile mince ainsi que de la racine primaire. Le coléoptile émerge et des racines primaires se forment suivie de l'apparition de la première feuille. Très rapidement sont successivement émises les feuilles suivantes. Le mésocotyle croît pendant cette période et un premier nœud embryonnaire est formé à la base du coléoptile juste en dessous du niveau du sol. Dans les conditions du Mali, ce premier nœud émet une à deux racines nodales adventives vers le 10^e jour après la levée (Chantereau *et al.*, 2013). L'apparition de ces racines nodales est suivie par la disparition du mésocotyle et le développement d'un système racinaire plus important. Le tallage basal ou l'émission des tiges secondaires par le jeune plant commence alors au moment de la croissance de la 4^e feuille. La phase végétative continue ainsi jusqu'à l'initiation florale qui marque sa fin. Cette dernière se produit 30 - 110 jours après l'émergence suivant la date de semis et le degré de photopériodisme de la variété.

➤ *La phase reproductive allant de l'initiation paniculaire à la floraison*

Le temps requis pour la transformation du primordium végétatif au primordium de reproduction est en grande partie influencé par le génotype et l'environnement. Ainsi, la phase de reproduction débute par l'initiation paniculaire et se termine par la floraison. Elle est aussi caractérisée par l'émission des nœuds et entre-nœuds par la tige, la différenciation et le grossissement des inflorescences (épis ou panicules) qui montent dans les gaines foliaires. Cependant, chez les variétés photopériodiques la montaison peut commencer avant l'initiation paniculaire. La feuille dite drapeau de la tige principale apparaît, enroulée autour de la panicule. L'épiaison se produit donc par l'émergence de la panicule hors de la gaine de la feuille drapeau. Le pédoncule, c'est-à-dire la partie de la tige comprise entre la feuille étendard et la panicule commence alors à s'allonger. Les épis sortis commencent ainsi à fleurir. La floraison se produit progressivement de haut en bas de la panicule à peu près une semaine après le début de l'épiaison. La phase de floraison est suivie par une phase de pollinisation qui nécessite l'ouverture des glumes et qui se fait surtout par autopollinisation chez le sorgho qui est à dominante autogame mais avec un pourcentage de cross-pollinisation pouvant atteindre 20%.

➤ *La phase de remplissage et de maturation des graines allant de la floraison à la maturité physiologique*

Cette phase commence immédiatement après la floraison. Elle peut être subdivisée en trois stades : le stade laiteux, le stade pâteux et le stade dur qui correspond à la maturité physiologique. Pendant le stade laiteux, les nutriments sont mobilisés vers les graines au détriment des feuilles et de la tige. Pendant le stade pâteux les graines atteignent 75 % de leur poids maximum. L'absorption des nutriments prend fin et les feuilles basales s'assèchent. Durant le stade dur, un point noir apparaît à la base des graines qui atteignent leur poids maximum.

1.1.4 Besoins en eau du sorgho

Les besoins en eau d'une culture correspondent à la consommation maximale apparente d'eau de cette culture et sont définis par l'évapotranspiration maximale (Amadou, 1994). Ces besoins dépendent de la demande évaporative du milieu, de la nature de la plante (espèce et variété) et du stade de développement. Même si le sorgho est décrit comme une plante particulièrement adaptée à la sécheresse, la détermination de ses besoins en eau reste essentielle en ce sens que le sorgho est très sensible au déficit hydrique pendant la période

épiaison-floraison. Les besoins en eau sont proportionnels à la longueur du cycle. Au Mali, le sorgho est cultivé entre les zones à pluviométrie comprise entre 300 et plus de 1000 mm. Selon une étude conduite par Chantereau *et al.* (2013) 400 mm de pluie suffisent pour qu'une variété de 90 jours produise (CSM63E) et 600 mm de pluie suffisent pour qu'une variété de 110 à 120 jours produise (CSM335). Les besoins en eau varient surtout en fonction du degré et de la rapidité de couverture du sol nu au départ de la culture. Ainsi, des variétés très précoces ou semées à de fortes densités, couvrent plus rapidement le sol et expriment des besoins hydriques plus importants.

- Mécanismes de résistance du sorgho au stress hydrique

Le climat au Mali est tropical, caractérisé par une longue saison sèche (une saison sèche et froide de novembre à février et une saison sèche et chaude de mars à mai) et une saison des pluies (de juin à octobre) durant laquelle les cultures sont produites. Cette période de pluie est caractérisée, particulièrement dans les zones situées vers le nord, par des pauses pluviométriques dont la durée varie considérablement et qui peuvent se produire à différents moments de la période de croissance. Ces absences de pluie peuvent avoir un profond impact sur la croissance et le rendement des cultures surtout lorsqu'elles surviennent pendant les périodes préfloraison, pendant floraison et post-floraison. Cependant, posséder des mécanismes d'adaptation à ces périodes de sécheresse est crucial pour la productivité des cultures. L'adaptation est définie comme le moyen grâce auquel les plantes survivent à des périodes de déficit hydrique. La notion d'adaptation se noue avec les notions de résistance et de tolérance aux stress. Ainsi, les espèces céréalières comme le sorgho ont développé un certain nombre de mécanismes de résistance à la sécheresse. La résistance à la sécheresse est la capacité qu'a une plante de maintenir un équilibre hydrique favorable et une turgescence même en conditions de sécheresse en évitant le stress et ses conséquences (Verma et al, 2018). Selon Breteaud et Traore (1991), la résistance à la sécheresse correspond à l'équilibre entre les différents paramètres physiologiques pouvant assurer une meilleure efficacité de l'eau utilisée par la plante.

Ces mécanismes de résistance ont donné lieu à de nombreuses études, dont la plus complète et la plus connue est celle de Levitt, qui a été revue par plusieurs autres auteurs (Vartanian et Lemée, 1984, Chantereau et Nicou, 1991, Breteaud et al, 1994). Selon Levitt (1980) il existe 2 possibilités de résistance au stress hydrique: l'évitement de la contrainte et la tolérance de la contrainte (Vartanian et Lemée, 1984). Il est difficile de dissocier ces deux possibilités de résistance. A ceux-là s'ajoutent les mécanismes d'évasion et de recouvrement

après sécheresse. Ces différents mécanismes utilisent des processus physiologiques, morphologiques et phénologiques pour s'adapter au stress hydrique.

- L'évasion :

C'est la capacité qu'à la plante de réaliser sa période complète de croissance avant que les stress hydriques importants ne se manifestent (Bretaudière et al, 1990). Cette adaptation n'est pas un mécanisme de résistance, mais plutôt une capacité à assurer la reproduction dans des conditions de croissance appropriées en l'absence de stress (Levitt, 1980).

En condition de stress hydrique, l'esquive est l'adaptation la plus efficace en termes de rendement (Renard, 1983). Les variétés précoces arrivent à compléter leur croissance en cas de sécheresse de fin de cycle car leur précocité réduit leur durée réelle d'exposition au déficit hydrique (Verma et al, 2018). Clavel et al. (2005) ont rapporté que l'esquive permet à la plante de réduire ou d'annuler les effets de la contrainte hydrique par une bonne adéquation de son cycle de culture à la longueur de la saison des pluies. Une relation positive a été établie entre la précocité de la floraison et le rendement en condition de stress hydrique (Renard, 1983). Selon Annerose (1990) la précocité serait accompagnée d'une baisse du potentiel de productivité par diminution des stades de remplissage des grains. Cependant, les plantes à maturation tardive offrent une production potentielle plus importante et en cas de stress hydrique, survenant en milieu de cycle, auront l'avantage de pouvoir récupérer. Toutefois, l'efficacité de ce mécanisme dépend fortement du caractère erratique de la pluviométrie particulièrement dans les tropiques semi-arides.

- Le recouvrement après sécheresse :

Selon Annerose et Cornaire (1994), la tolérance à la déshydratation reste un terme général recouvrant à la fois la résistance mécanique des tissus au déficit hydrique ainsi que la résistance biochimique des enzymes et des protéines à la dénaturation.

C'est la capacité qu'a une culture de continuer sa croissance et son développement après avoir été exposée au stress hydrique qui cause une pression de turgescence et une déshydratation des feuilles. La recherche de variétés possédant ce caractère est impérative dans nos régions sujettes à des pluies erratiques et à des stress hydriques saisonniers.

- L'évitement

C'est la capacité qu'a une plante de contrôler ses pertes d'eau ou de retarder la déshydratation de ses tissus en condition de déficit hydrique. L'évitement du stress permet à une plante de réguler ses pertes en eau par une réduction de la surface foliaire fonctionnelle et un enroulement des feuilles, la fermeture partielle ou totale des stomates, l'osmo-régulation et la senescence des feuilles et le maintien de l'absorption de l'eau par un système racinaire mieux adapté (Tshiabukole, 2018). Cette régulation permet à la plante de maintenir ses tissus à un potentiel hydrique élevé lors d'un stress hydrique.

L'enroulement des feuilles est un mécanisme couramment observé chez les plants de sorgho en condition de stress hydrique. Il résulte de la turgescence des cellules bulbiformes et provoque un enroulement longitudinal du limbe (Renard, 1983). La fermeture des stomates permet de maintenir un potentiel foliaire élevé. Breteaudau et al, (1994) ont évalué la performance de 3 variétés de sorgho au Mali, dans un essai de dispositif en split plot avec l'irrigation comme facteur principal. Ils ont étudié les facteurs physiologiques (teneur en eau des feuilles, du sol, conductance stomatique, enroulement des feuilles et les systèmes racinaires) de chacune des 3 variétés. Ils ont trouvé que la variété ICSV 1063 qui possédait un système racinaire moins profond, arrivait à fermer ses stomates en condition de stress hydrique. Les auteurs ont qualifié ce mécanisme de mécanisme d'évitement de la déshydratation. L'osmo-régulation et la senescence des feuilles plutôt que la fermeture des stomates ont été rapportées par Stout et al., (1978), comme étant les principaux mécanismes d'évitement. Ils ont aussi rapporté que la fermeture des stomates est une stratégie d'évitement importante sous des stress hydriques très sévères. Cependant, les études sur le sorgho (Blum, 1974a ; Blum, 1982) indiquent qu'une grande proportion des géotypes évitant la déshydratation ne ferment pas leurs stomates, peut-être en raison de l'ajustement osmotique des stomates sous stress hydrique. Cependant, des variations génétiques existent dans la relation entre ces deux mécanismes (Blum, 1982).

Le stress hydrique stimule également l'augmentation de la concentration d'acide abscissique. L'augmentation de l'acide abscissique (ABA) a été corrélée avec des augmentations de l'éthylène (Sexton et al., 1985), qui a été associé à la sénescence (Pell et Dann, 1991). L'acide abscissique est une hormone de stress naturelle des plantes qui contrôle les réponses au stress, la croissance et la reproduction des plantes cultivées. L'ABA est généralement synthétisé dans les racines et transporté vers les parties supérieures de la plante via les tissus vasculaires. La senescence et la chute des feuilles sont définies par Renard (1983) comme des moyens

drastiques pour limiter la transpiration en cas de stress hydrique aigu ; elles retardent considérablement la croissance et le développement. La sénescence et la chute des feuilles constituent un mécanisme important particulièrement lorsqu'elles s'associent à une capacité de recouvrement élevée pendant la période végétative (Renard, 1983). La résistance cuticulaire est aussi décrite comme un mécanisme d'évitement de la sécheresse. La réduction de la surface foliaire tend à minimiser les pertes en eau en réduisant la transpiration (Zouina, 2014). La surface foliaire affecte l'évapotranspiration totale jusqu'au stade de couverture totale du sol. La réduction de la croissance des feuilles lorsque le stress hydrique se développe est un facteur majeur par lequel les plantes réduisent leurs besoins en eau. Les feuilles étroites diminuent la surface foliaire totale par plante. Le stay-green est un trait intégré d'adaptation à la sécheresse du sorgho. La sénescence retardée des feuilles pendant le remplissage des grains est une conséquence émergente de la dynamique survenue plus tôt dans la croissance des cultures et est en grande partie due à un meilleur équilibre entre l'offre et la demande d'eau, ainsi que l'efficacité avec laquelle la culture convertit l'eau en biomasse et en rendement céréalier (Borrell et al., 2009; Jordan et al., 2012, Verma et al., 2018). Les résultats de Bretaudeau et al., (1994) sur l'étude comparée sur le système racinaire des 3 variétés de sorgho au Mali ont révélé que la variété MIG-SOR 86.30.3 possédait le système racinaire le plus profond et présentait la plus grande quantité de racines fonctionnelles de la 1^{ère} à la 3^{ème} semaine du stress. Ils ont défini ce système racinaire comme le meilleur particulièrement pour nos régions qui se caractérisent par une fréquente occurrence de la sécheresse pendant la période florale et par des types de sol relativement profonds. Cependant, ils ont observé que malgré ces potentiels, MIG-SOR 86.30.3 ne possédait qu'une faible résistance stomatique et cuticulaire, en d'autres termes, qu'elle est incapable de fermer ses stomates en condition de stress. Ils ont aussi constaté qu'en condition de stress, la variété MIG-SOR 86.30.3 donnait le meilleur rendement lorsqu'elle était cultivée dans des fûts. Ces mécanismes ont été définis par les auteurs comme un mécanisme de tolérance de la déshydratation caractérisé par un système racinaire profond et une ouverture des stomates même en présence de teneur relative en eau faible des feuilles. Le système racinaire joue un rôle essentiel en réponse au stress hydrique (Verma et al., 2018). Il est naturellement considéré comme un organe essentiel pour l'amélioration de l'adaptation des cultures au stress hydrique (Vadez et al., 2014).

- La tolérance :

C'est la capacité qu'a une plante d'atteindre, en condition de déficit hydrique, l'équilibre thermodynamique, sans subir de dommage (Levitt, 1980). La plante tolérante au stress est capable de prévenir, de diminuer ou de réparer toute modification physique ou chimique induite par le stress hydrique (Levitt, 1980). La tolérance est donc un mécanisme d'acclimatation qui permet à la plante d'allouer du carbone pour former des agents osmotiques qui aident les tissus à supporter un faible niveau d'eau et à maintenir la turgescence (Mooney et al, 1991). Les principaux mécanismes de tolérance à la sécheresse sont: le maintien du potentiel de turgescence, malgré l'abaissement du potentiel hydrique cellulaire (Vartanian et Lemée, 1984) et la tolérance à la dessiccation (Bretaudeau et al, 1990).

- ✓Le maintien du potentiel de turgescence :

L'ajustement osmotique, l'augmentation de l'élasticité membranaire et la diminution de la taille des cellules ont été citées par Jaafari et al (1993) comme des mécanismes de maintien de la turgescence.

L'ajustement osmotique est un processus majeur permettant à la cellule de maintenir sa turgescence sous contrainte hydrique grâce à l'accumulation active de molécules particulières: alcools, polyols, sels de potassium et sucres solubles (Jaafari et al, 1993). La régulation osmotique joue un rôle de prolongation de la durée de vie des tissus actifs entre des pluies éphémères afin que l'activité physiologique et la croissance puissent reprendre rapidement en cas de pluie et un rôle de prolongation de la période de préparation des tissus pour le stress hydrique si les averses échouent (McNaughton, 1991). L'abaissement du potentiel du soluté par ajustement osmotique a été proposé par Girma et Krieg, (1992a) sur le sorgho pour permettre le maintien du potentiel de turgescence foliaire, de la conductance stomatique et de la photosynthèse à faible potentiel hydrique foliaire. Ils ont semé un seul hybride de sorgho (cv AT × 623 × RT × 430) dans quatre sources d'eau différentes. Ils ont mesuré le potentiel hydrique, le potentiel en soluté, l'ajustement osmotique, la conductance stomatique et la photosynthèse chaque jour et chaque midi pendant les périodes de préfloraison et de remplissage des grains. Ils ont aussi évalué deux génotypes de sorgho (BT × 623 et BT × 378) en serre. Ils ont comparé la capacité d'ajustement osmotique des plantes en condition de déficit hydrique imposé du début de l'initiation de la panicule à la période florale. Dans les conditions de champ et de serre, la conductance stomatique et la photosynthèse ont rapidement diminué avec l'augmentation du stress hydrique malgré la présence de

l'ajustement osmotique. En serre, sous condition de stress hydrique, BT × 623 a maintenu sa conductance stomatique et sa photosynthèse significativement plus élevées que BT × 378. Cependant, aucune différence significative n'existait entre la conductance stomatique, la photosynthèse et le maintien du potentiel de turgescence foliaire des deux génotypes, indiquant que l'ajustement osmotique n'était pas associé aux différences observées dans la conductance stomatique et la photosynthèse entre ces génotypes. Ils ont conclu que la réponse de la conductance stomatique et de la photosynthèse au stress hydrique n'était pas directement associée à l'ajustement osmotique et n'était certainement pas maintenue par l'ajustement osmotique.

La réduction de la taille des cellules due au stress hydrique a été directement attribuée au manque de pression de turgescence adéquate (Krieg, 1993). Do et al (1989) ont étudié les mécanismes de résistance de 4 cultivars de mil (dont 1 sauvage) à un stress hydrique terminal au Niger. Ils ont réalisé des mesures de conductance sur les 3 dernières feuilles du brin principal. Ils ont réhydraté ces feuilles toute la nuit et ont établi une relation entre le potentiel hydrique et la teneur relative en eau. Ils ont observé que lors de la déshydratation, le potentiel de turgescence pouvait être maintenu selon deux mécanismes : l'ajustement osmotique, qui se traduit par une augmentation des potentiels osmotiques précités, et l'augmentation de l'élasticité membranaire qui se traduit par une baisse du module d'élasticité.

✓La tolérance à la dessiccation :

La tolérance à la déshydratation est la capacité qu'ont les membranes cellulaires, les protéines membranaires et cytoplasmiques d'une plante de résister à la dénaturation (Benkhellef, 2016). Le stress hydrique devient sévère ou que sa durée se prolonge et que les autres mécanismes d'adaptation déployés par la plante s'avèrent insuffisants, l'habilité des tissus à résister à la déshydratation devient importante (Turner, 1982). En condition de stress hydrique, cette résistance à la déshydratation peut survenir à chaque étape de la croissance de la plante. Cependant, l'évaluation de la résistance à la déshydratation doit se faire au niveau des tissus (Blum, 1982). Cette évaluation du potentiel hydrique tissulaire permet d'avoir une bonne estimation de la réponse intégrée du système. Sullivan (1972, cité par Blum, 1982) a développé une méthode assez rapide pour évaluer le taux de lésions des membranes cellulaires du sorgho par déshydratation grâce à la mesure in vitro des fuites d'électrolyte des disques foliaires stressés par l'eau. Selon Turner, (1982), la tolérance à la déshydratation en fonction de l'intensité du stress hydrique. Plus le stress hydrique se produit lentement plus la

tolérance à la déshydratation s'améliore, probablement en raison de l'accumulation de solutés tels que les sucres et la proline qui protègent les protéines et aident à la récupération

1.2 Généralités sur les modèles

Un modèle est une représentation simplifiée d'un système. Un système est une partie d'un milieu qui est défini par ses limites et qui contient des éléments en interactions (Affholder et al. 2012). Un modèle de simulation des cultures est une représentation simple d'une culture. Il est utilisé pour étudier la croissance des cultures et pour calculer les réponses de cette croissance à l'environnement (Penning de Vries et al., 1989). Selon Passioura et al., (1996), les modèles de simulation des cultures peuvent être divisés en deux groupes: ceux qui aspirent à améliorer notre compréhension de la physiologie et des interactions environnementales des cultures (science), et ceux qui aspirent à fournir de bons conseils aux agriculteurs sur la gestion ou de bonnes prévisions aux décideurs (ingénierie).

Le premier groupe est constitué de modèles mécanistiques et le deuxième groupe est constitué de modèles basés sur des relations empiriques robustes entre le comportement des plantes et les principales variables environnementales (Passioura et al., 1996). Ces deux groupes appartiennent à deux principales philosophies de simulation correspondant à des approches alternatives de représentation algorithmique des processus physiques, chimiques et biologiques qui se déroulent dans les écosystèmes agricoles réels.

Les modèles mécanistiques sont aussi appelés théoriques, biophysiques, ou explicatifs et les modèles empiriques sont souvent appelés les modèles fonctionnels ou heuristiques ou encore descriptifs. Un modèle descriptif définit le comportement d'un système de manière simple. Il reflète peu ou aucun des mécanismes qui sont à l'origine du comportement du système. Et un modèle explicatif consiste en une description quantitative des mécanismes et processus qui provoquent le comportement d'un système. Ces descriptions sont des déclarations explicites de la théorie et des hypothèses scientifiques. Un modèle explicatif de croissance des cultures contient des descriptions de processus distincts tels que la photosynthèse, l'expansion de la surface foliaire et l'induction des talles. La croissance des cultures est une conséquence de ces processus sous-jacents. Chaque processus doit être quantifié par rapport à des facteurs environnementaux, tels que le rayonnement et la température; et en fonction de l'état de la culture, y compris la surface foliaire, le stade de développement et la quantité d'azote absorbée par une culture. Les taux de croissance peuvent ensuite être calculés pour n'importe quel stade de croissance, en fonction de l'état réel de la culture, du sol et de la météo actuelle.

Tous les facteurs importants peuvent être pris en compte de cette manière, à condition qu'il y ait suffisamment de théories et de données pour les quantifier. Le modèle Agricultural Productions Systems Simulator (APSIM) est de type explicatif (Penning de Vries, 1989). D'autres modèles de culture existent tels que DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer), AquaCrop, Samara qui sont, tout comme APSIM, largement utilisés dans le domaine agricole. Ce sont des outils d'aide à la décision dans la planification et l'analyse des scénarios au cours des saisons et à travers différents endroits. Tous ces modèles prédisent la croissance et la production de la plante de façon dynamique. Ils utilisent tous des données sol, des données climatiques, des données sur les pratiques agronomiques et des données de cultures. Ils décrivent les rendements grains sur la base de l'absorption et de l'utilisation journalière des ressources environnementales notamment l'eau, les nutriments et la radiation solaire. Les réponses de ces facteurs environnementaux (stimuli), sont exprimées en différentes phases phénologiques pendant la durée du cycle de la plante.

Le modèle APSIM est un modèle de simulation des systèmes de culture, qui intègre un modèle de culture générique (Wang et al., 2002), utilisant plusieurs modules pour simuler les processus de croissance et de développement des cultures (Hammer et al., 2010). Le modèle APSIM engendre le phénotype d'une culture en conséquence aux processus physiologiques sous-jacents, en utilisant le concept d'équilibre entre l'offre et la demande pour la lumière, le carbone, l'eau et l'azote (Hammer et al., 2001). La demande de ressources est définie par la croissance potentielle des organes et l'offre potentielle est définie par la capture des ressources. Le module sorgho du modèle APSIM, simule la croissance d'une culture de sorgho au pas de temps journalier. La croissance du sorgho dans ce modèle répond au climat (température, précipitations et rayonnement solaire), à l'approvisionnement en eau du sol (à partir du module sol) et à l'azote du sol (à partir du module sol). Une description plus détaillée du modèle APSIM est donnée dans (Keating *et al.*, 2003).

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

2.1 Caractérisation des scénarios de stress hydrique et leurs effets sur la production du sorgho au Mali utilisant une approche de modélisation

2.1.1 Sites d'étude

Les zones propices aux cultures au Mali ont été préalablement divisées en quatre grandes zones bioclimatiques : la zone Saharienne (< 200 mm – sorgho de décrue) ; la zone Sahélienne (200-600 mm) ; la zone Soudanienne (600-1100 mm) ; et la zone Pré-guinéenne (> 1100 mm) (Soumaré *et al.*, 2004). Ces limites ont été utilisées dans cette étude comme prérequis pour définir 3 zones principales : la zone Sahélienne située entre les isohyètes < 600 mm, la zone Soudanienne située entre les isohyètes 600-1000 mm et la zone Guinéenne située entre les isohyètes > 1000 mm (Figure 1). La zone saharienne n'a pas été prise en compte à cause du fait que le sorgho est seulement produit dans cette zone en culture de décrue. Vingt-deux sites d'études (Tableau 1) répartis entre la zone Sahélienne, Soudanienne et la zone Guinéenne ont donc été sélectionnés pour cette étude. Le sorgho est cultivé dans toutes ces régions bioclimatiques du pays, de la frontière saharienne où les précipitations sont trop faibles (≤ 300 mm) à la frontière de la zone agroécologique guinéenne où les précipitations annuelles sont supérieures à 1200 mm (figure 1) (Smale *et al.*, 2016). Le climat dans cette région est caractérisé par une longue saison sèche et une saison des pluies dont la durée augmente suivant un gradient Nord-Sud (Lys, 2010). En général, la saison des pluies s'étend de juin à octobre et les plus fortes pluies sont reçues entre juillet et août. Pendant cette période, les températures maximale et minimale annuelle moyenne varient respectivement entre 30,6 ° C et 37 ° C et entre 18,6 ° C et 22,7 ° C.

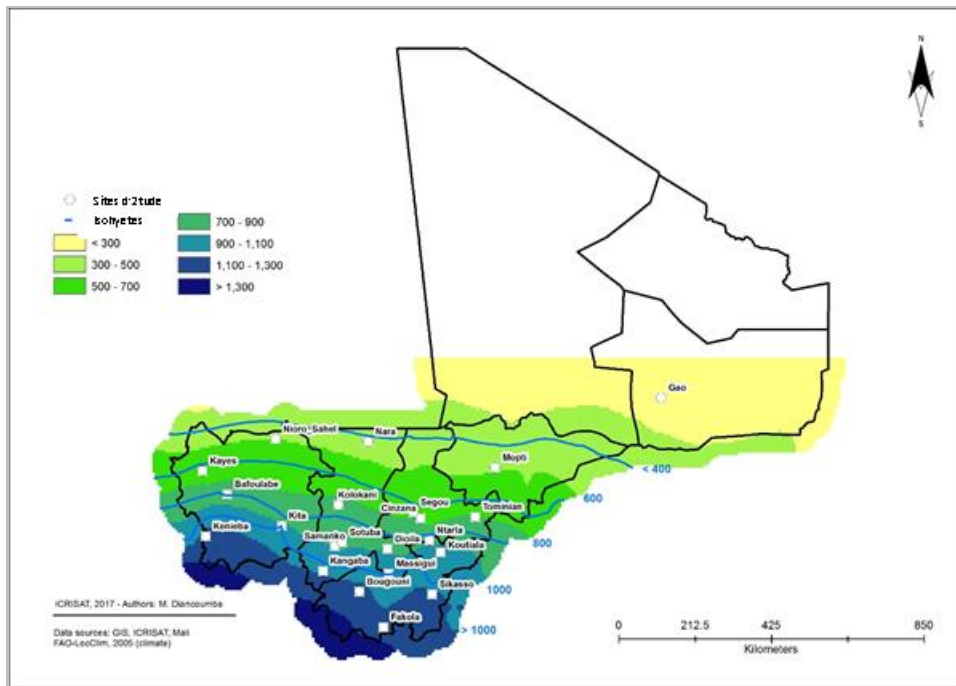


Figure 1 : Localisation des sites d'étude à travers les grandes zones bioclimatiques

2.1.2 Données utilisées

2.1.2.1 Données climatiques

Les données météorologiques journalières, nécessaires pour une simulation dans le modèle APSIM-sorgho sont la pluviométrie, les températures maximales et minimales et le rayonnement solaire. Ces données ont été obtenues auprès de Mali-météo. Elles ont été choisies pour 22 stations (synopsis et pluviométrie) situées dans la zone de production du sorgho au Mali entre les isohyètes < 400 mm et > 1000 mm. Les stations ont été sélectionnées d'une part à cause de la disponibilité des données de qualité et, d'autre part, pour couvrir l'ensemble des trois zones bioclimatiques au Mali. Ces trois zones bioclimatiques ont été divisées en cinq isohyètes sur la base des moyennes pluviométriques annuelles (Tableau 1). Dans le cas des stations pluviométriques où les autres paramètres climatiques n'étaient pas disponibles, les données de NewLocClim (Grieser *et al.*, 2006) ont été utilisées. NewLocClim permet de générer des données à partir des stations avoisinantes. Le nombre d'années observées couvrait la période 1935 - 2015 et variait d'un site à un autre entre 10 et 72 ans (Tableau 1).

Tableau 1 : Données sur les sites d'étude

Zones Agroécologiques	Isohyètes	Sites	Longitude (° O)	Latitude (° N)	Début	Fin	Nombre d'années	Pluviométrie moyenne (mm)
Zone Sahélienne	< 400	Gao	0,05	16,27	1950	1980	30	243
	400-600	Nara	7,28	15,17	1950	2003	53	426
		Mopti	4,10	14,52	1950	2005	55	492
		Nioro	9,60	15,23	1950	1980	30	567
Zone Soudanienne	600-800	Kayes	11,43	14,43	1950	2004	54	651
		Ségou	6,15	13,40	1950	2008	58	661
		Cinzano	5,95	13,25	1961	2010	49	697
		Hominien	4,60	13,28	1950	1990	40	715
		Bafoulabe	10,83	13,80	1971	1980	9	734
		Kolokani	8,03	13,58	1935	2006	71	753
	800-1000	Ntarla	5,75	12,70	1967	1983	16	846
		Dioila	6,80	12,48	1939	2008	69	860
		Samanko	8,07	12,53	1968	2015	47	920
		Koutiala	5,47	12,40	1950	2008	58	922
		Sotuba	7,93	12,66	1951	2015	64	942
		Massigui	6,77	11,87	1960	1990	30	943
		Kita	9,45	13,07	1938	2008	70	986
Zone Guinéenne	> 1000	Kangaba	8,42	11,93	1940	2006	66	1040
		Fakola	6,90	10,53	1966	1992	26	1054
		Kéniéba	11,35	13,10	1950	1997	47	1159
		Bougouni	7,50	11,42	1950	2007	57	1161
		Sikasso	5,68	11,35	1950	2010	60	1170

Long : longitude

Lat : latitude

Nb. : Nombre

2.1.2.2 Données sur les sols

Les données sur les sols du « *Projet Inventaire des Ressources Terrestres au Mali* » (PIRT, 1986) combinées avec la base de données sur les sols de « *The World Inventory of Soil Emission Potentials* » (Wise) (Batjes 1995 ; 2002) ont été utilisées. Les sols dominants sur lesquels chaque site est localisé géographiquement, ont été identifiés et classifiés en deux principaux types de sol sur la base de la capacité de rétention en eau de chacun des sols (CRE) (Loffler *et al.*, 2005 ; Chapman *et al.*, 2000). Le premier type de sol a une faible CRE (62 mm) et le deuxième a une forte CRE (156 mm). Ainsi, le contenu en eau du sol qui a la plus faible CRE est 40 % plus faible que celle qui a la plus forte CRE. Ces deux sols sont principalement caractérisés par une faible teneur en carbone organique (0,2 % pour le sol à faible CRE et 0,37 % pour le sol à forte CRE) (Tableau 2).

Tableau 2 : Données sur les types de sol

Type de sol	Profondeur (cm)	Argile	limon	sable	C%	N%	C/N	pH _{H2O}	pH _{KC}	MO, %	P total, ppm	P assimilable, ppm
Sol à forte capacité de rétention d'eau	0-20	7,8	33,1	59,5	0,2	3	6,6	5,2	4,4	0,39		
	20-70	23,6	39,9	37,5	0,1	3	5,1	5,3	3,8	0,31		
	70-120	29,7	42,7	27,6	0,1	3	3	5,1	3,7	0,2		
Sol à faible capacité de rétention d'eau	0-10	28	28	44	0,3	2	15	6,4	5,1		270	3,2
	10-20	55	23	22	0,7	4	5	6,1	4,6		325	9,5
	20-30	67	16	7	0,7	4	5	5,5	4,5		320	2,5
	30-40	70	15	15	0,5	2	5	6,6	4,6		270	1,6
	40-50	72	13	15	0,3	2	15	5,8	4,6		230	9,14
	50-60	68	13	19	0,2	3	6,6	5,7	4,6		260	1,3
	60-70	70	7	23				5,6	4,2			
	70-80	46	11	43				5,6	4,1			
	80-90	45	11	44				5,7	4,3			
	90-100	42	8	50				5,9	6			
100-110	45	9	46				4,2	4,5				

2.1.2.3 Matériel végétal

Les données de culture utilisées dans cette étude ont été fournies par le programme sorgho de l'ICRISAT Mali sur des essais conduits sur 8 années successives à la station de recherche de l'ICRISAT à Samanko (12°32 N, 8°04 O), à la station de recherche de l'IER à Cinzana (13°15 N, 5°57 O) et à la station de recherche de Bambey (14°42 N, 16°28 O). La description complète de ces essais est disponible dans les rapports 2000-2008 (disponible sur demande sur *dataverse*) du programme sorgho de l'ICRISAT. Les données de rendements en grains et en biomasse (kg.ha⁻¹), les dates de semis, le nombre total de feuilles, la surface et le poids des feuilles, le poids des tiges, la longueur des entre-nœuds, la hauteur des plants et des panicules ont été extraits de ces rapports sur une vingtaine de variétés évaluées. Ces données ont été compilées dans un fichier Excel structuré et utilisées pour le paramétrage du modèle.

Tableau 3: Données sur les variétés de sorgho testées de 2000-2008

Site d'essai	Culture	Cultivar
Samanko	Sorgho	CSM 335
Samanko	Sorgho	Sariaso 10
Samanko	Sorgho	IRAT 174
Samanko	Sorgho	CGM19/9-1-1
Samanko	Sorgho	CSM338
Samanko	Sorgho	Nazongala
Samanko	Sorgho	IS15401
Samanko	Sorgho	ICHS89002
Bambey	Sorgho	Saraiso10
Bambey	Sorgho	IRAT174
Samanko	Sorgho	IRAT 204
Samanko	Sorgho	Argence
Samanko	Sorgho	Sariaso 11
Samanko, Cinzana	Sorgho	CSM 63E
Samanko	Sorgho	IS 15401
Samanko	Sorgho	Lata3 (Bala Berthe)
Samanko	Sorgho	IS9331
Samanko	Sorgho	IS9303
Samanko	Sorgho	IS19466
Samanko	Sorgho	IS2814

Pour cette étude nous avons sélectionné deux des 20 variétés évaluées (Tableau 3) : CSM63E et CSM335. Ces deux (2) variétés sont locales, de type guinea et sont d'origine malienne. Elles ont été choisies dans cette étude à cause de leurs caractéristiques phénologiques différentes, leurs réponses contrastées à la photopériode et leur adaptation à différentes zones agroécologiques. La variété CSM63E aussi appelée « JAKUNBE » (ce qui signifie arrive à

maturité avant l'installation (arrivée) de la sécheresse en langue Bambara) est une variété locale épurée (Témé *et al.*, 2017), à maturation précoce peu ou pas sensible à la photopériode (Pp), identifiée pour être bien adaptée à la région sahélienne et originaire du village de Chegué dans le cercle de Nara, région de Koulikoro (15.18 °N, -6.95°O). La variété CSM335 également appelée « TIÉBLÉ » (homme rouge en langue Bambara) est une variété semi-tardive, sensible à la Pp et connue pour être adaptée à la zone soudano-sahélienne et originaire du village de Toba dans le cercle de Bougouni, région de Sikasso (11.85°N, -7.45°O).

Les données d'une dizaine d'essais agronomiques, extraites du fichier Excel mentionné ci-dessus, ont été utilisées pour le paramétrage de CSM63E et CSM335 dans le modèle APSIM-sorgho. Un autre jeu de données distinctes, collectées à partir d'essais conduits à Samanko, l'ICRISAT Mali en 2013 et 2014 (données disponibles dans Akinseye *et al.*, (2017)), a été utilisé pour la validation du modèle. Un dispositif en blocs complets randomisés à quatre répétitions a été utilisé dans ces essais. Les graines ont été semées le 14 juin, le 9 juillet et le 5 août à 67 000 plants / ha en 2013 et le 23 juin et 22 juillet en 2014 à la même densité. Une description plus détaillée de ces essais est faite par Akinseye *et al.*, (2017).

2.1.3 Description du modèle APSIM

APSIM est un modèle de croissance et de développement des cultures combinant des modules individuels (de cultures, de sols, d'azote et de carbone) pour simuler des processus biophysiques dans un contexte de système de cultures. Le module Sorgho développé dans le modèle de simulation des cultures APSIM fonctionne à pas de temps journalier.

Les différents stades de croissance et de développement (de l'émergence à la phase florale, de la phase florale à la phase de maturation) de la plante sont estimés par le modèle à travers le module de phénologie utilisant une approche de degré-jour. Le degré-jour est une mesure empirique qui permet d'estimer les stades de croissance d'une plante. La durée de chaque stade de croissance est estimée en cumulant le degré-jour journalier du début à la fin de chacun de ces stades phénologiques. Le degré-jour est calculé comme la différence entre la température moyenne journalière et la température de base (Hammer *et al.*, 1993) :

$$DTT = DT_{\text{mean}} - T_b \quad (1)$$

Où:

- T_b est la température de base ;
- DT_{mean} la température moyenne journalière
- DTT : degré-jour

La valeur utilisée dans cette étude pour la température de base était la valeur par défaut existante dans le modèle d'APSIM-sorgho : T_b (11 °C). Il a été démontré que la durée de la floraison à la maturité, est relativement constante pour de nombreuses cultures céréalières, y compris le sorgho. Le temps écoulé entre l'émergence et la floraison est influencé par deux facteurs principaux : la température et la photopériode et peut être divisé en trois phases : de l'émergence à la fin de la phase juvénile, de la fin de la phase juvénile à l'initiation de la panicule (IP) et de l'initiation paniculaire à la floraison. La durée de la fin de la phase juvénile à la phase IP est contrôlée par la sensibilité de la variété à la photopériode et dépend de l'écart positif entre la longueur du jour et une valeur de longueur de jour critique (P_{pcrit1}) (Abamu et Wopereis, 2001). La P_p journalière est fonction de la latitude, du jour dans l'année et de l'heure de l'aube et du crépuscule, c'est-à-dire lorsque le soleil se trouve à $2,2^\circ$ en dessous de l'horizon (Keating *et al.*, 2003).

Les données disponibles sur la phénologie ont permis de calculer les coefficients déterminant la durée de chaque stade de croissance (« *endjuv_to_init* et *flower_to_maturity* » ou « de la fin de la phase juvénile à l'initiation paniculaire et de la floraison à la maturité ») et les coefficients de la fin de la phase juvénile à la phase IP qui dépendent de la photopériode. La durée de la phase d'initiation à la floraison (*init to flower*) a été ajustée. La réponse journalière des cultures à la P_p a été estimée à partir d'une triple fonction de réponse linéaire qui définit la réponse à la photopériode en termes de photopériode minimale (P_{pcrit1}) et maximale (P_{pcrit2}), en-dessous et au-dessus de laquelle l'augmentation de la photopériode retarde respectivement la floraison et la pente entre ces valeurs définit la sensibilité des plantes à la photopériode (P_{pslope}) (Roberts et Summerfield, 1987 ; Hammer *et al.*, 1993 ; cités par Craufurd *et al.*, 1999). Les valeurs par défaut de la photopériode minimale et maximale (P_{pcrit1} et 2), existantes dans le modèle : 11,5 et 13,5 heures (Figure 2) ont été utilisées dans cette étude (Ravi Kumar *et al.*, 2009). La longueur de P_{pslope} ainsi que le degré-jour de la fin de la phase juvénile à l'initiation paniculaire (PI) ont été calculés en utilisant une relation linéaire entre la fin de la phase juvénile et l'initiation de la panicule (fin-juv à IP) et la P_p moyenne pour cette période (van Oosterom *et al.*, 2001) (Figure 2).

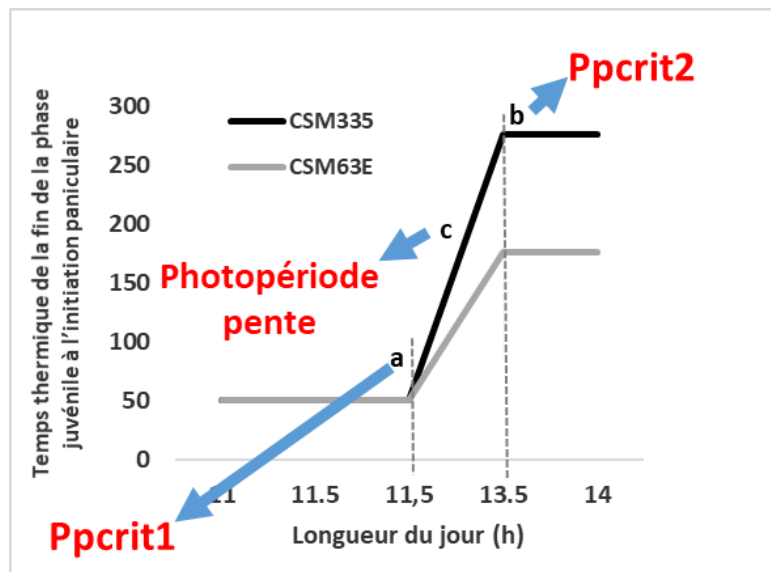


Figure 2 : Relation entre la longueur du jour et le temps thermique cumulé de la fin de la phase juvénile à l'initiation paniculaire.

C'est après estimation des phases phénologiques que nous avons paramétré le développement du couvert végétal (canopée). Le modèle APSIM-sorgho simule le développement de la surface foliaire utilisant l'approche de « surface foliaire totale » (TPLA) (Hammer *et al.*, 1993).

- L'approche de TPLA :

Le TPLA (Surface foliaire totale) est une approche qui estime la surface foliaire totale de la plante en combinant le nombre de feuilles entièrement déployées, la taille individuelle des feuilles et le nombre de talles. Elle ajoute à ces variables un paramètre d'ajustement de la partie des feuilles en expansion (Hammer *et al.*, 1993). Les paramètres nécessaires pour le paramétrage de la canopée d'une plante utilisant l'approche TPLA sont :

- *TPLAmax*,
- *TPLAinflection ratio*,
- *TPLAproduction cf*,

Ici *TPLAmax* définit la surface foliaire maximum totale de la plante

$$\text{TPLAMax} = (\text{pow}(\text{FTN} + 1.0, \text{tillerCoef}) * \text{pow}(\text{finalLeafNo}, \text{mainStemCoef})) * \text{scm2smm}$$

(2)

Où :

- TillerCoef = 0.66 (est généralement considéré comme une constante);
- FTN est le nombre de talles fertiles,
- On optimise le mainStemCoef (utilisant l'outil *solver* dans Excel).

Cette approche s'est révélée inefficace pour la reproduction des changements de la canopée résultant de la variation de la durée des phases phénologiques.

De ce fait, nous avons utilisé l'approche de la surface foliaire individuelle (ILA) (Carberry *et al.*, 1993 ; Birch *et al.*, 1998 ; Van Oosterom *et al.*, 2001).

• L'approche de l'ILA :

L'ILA (surface foliaire individuelle) est une approche qui relie mécaniquement les changements de la taille de la canopée à la durée variable des phases végétatives (Birch *et al.*, 1998). Cette approche prend en compte la disposition de chaque feuille sur la tige principale en fonction de leur taille. Il permet donc de calculer la taille de la canopée sur la base de la position et de la taille de la plus grande feuille (Birch *et al.*, 1998) à l'aide de la fonction :

$$Y = Y0 * \exp(a * (X - X0)^2 + b * (X - X0)^3) \quad (3)$$

Où :

- Y est la taille de la canopée
- X0 est la position de la plus grande feuille,
- Y0 la surface (taille) de la plus grande feuille,
- X la position de chaque feuille individuelle,
- 'a' est une constante empirique déterminant la largeur de la courbe en forme de cloche,
- 'b' est une constante empirique qui détermine l'asymétrie de la courbe en forme de cloche.

L'approche ILA permet également de paramétrer la taille des feuilles sur la base du nombre total de feuilles produites sur la tige principale et sur la base de la relation entre la taille de la plus grande feuille et le nombre de feuilles totales (Figure 3) utilisant la fonction :

$$Y0 = \text{MaxLNo} * a\text{MaxSlope} + a\text{MaxIntercept} \quad (4)$$

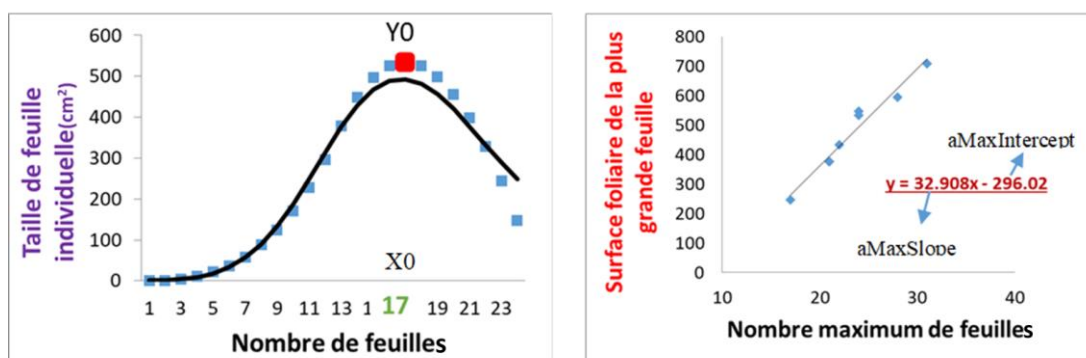


Figure 3: Estimation de la taille et de la position de la plus grande feuille

Où :

- Y0 est la surface de la plus grande feuille,
- aMaxSlope est le facteur de la plus large surface de feuille,
- aMaxIntercept est l'interception pour le calcul de la plus grande feuille.
- MaxLNo est le nombre total de feuilles

Chacun des paramètres X0, Y0, a et b, utilisés pour le paramétrage de ILA, est fonction du nombre total de feuilles.

$$X0 = aXo * \text{MaxLNo} \quad (5)$$

$$a = a0 - \exp(a1 * \text{MaxLNo}), \text{ (Birch, 1988)} \quad (6)$$

$$b = b0 - \exp(b1 * \text{MaxLNo}), \text{ (Birch, 1988)} \quad (7)$$

Où :

$a0 = -0,009$; $a1 = -0,2$; $b0 = 0,0006$; $b1 = -0,43$ sont des constantes empiriques (Birch *et al.*, 1998).

2.1.4 Méthodologie

2.1.4.1 Paramétrage du modèle

Les données de dix essais agronomiques ont été utilisées pour le paramétrage des deux génotypes dans le modèle APSIM-sorgho. Après avoir introduit les informations mentionnées ci-dessus, le modèle a été étalonné, puis on a vérifié si les résultats étaient en accord avec les données observées. L'approche utilisée pour estimer les paramètres du modèle, qui diffèrent

d'un génotype à l'autre et auxquels le modèle est sensible, consistait à dériver des estimations lorsque des données mesurées expérimentalement étaient disponibles, suivi d'un ajustement manuel des paramètres, afin de minimiser l'écart entre les variables mesurées et simulées. La relation entre les variables observées simulées par le modèle a été étudiée par régression. Le processus de paramétrage a été divisé en deux étapes : le paramétrage de la phénologie et de la sensibilité à la photopériode, et le paramétrage de l'expansion de la canopée et du développement de la plante. L'équation (1), a été utilisée pour estimer les paramètres de phénologie, la Figure 2 pour estimer la sensibilité à la photopériode et les équations de (3) à (7) pour estimer le développement de la canopée.

$$DTT = DT_{mean} - T_b \quad (1)$$

Où :

- T_b est la température de base ;
- DT_{mean} la température moyenne journalière
- DTT : degré-jour

$$Y = Y_0 \cdot \exp(a \cdot (X - X_0)^2 + b \cdot (X - X_0)^3) \quad (3)$$

Où :

- Y est la taille de la canopée
- X_0 est la position de la plus grande feuille,
- Y_0 la surface (taille) de la plus grande feuille,
- X la position de chaque feuille individuelle,
- ' a ' est une constante empirique déterminant la largeur de la courbe en forme de cloche,
- ' b ' est une constante empirique qui détermine l'asymétrie de la courbe en forme de cloche.

$$Y_0 = \text{MaxLNo} \cdot a_{\text{MaxSlope}} + a_{\text{MaxIntercept}} \quad (4)$$

Où :

- Y_0 est la surface de la plus grande feuille,
- a_{MaxSlope} est le facteur de la plus large surface de feuille,
- $a_{\text{MaxIntercept}}$ est l'interception pour le calcul de la plus grande feuille.

$$X_0 = aX_0 \cdot \text{MaxLNo} \quad (5)$$

$$a = a_0 - \exp(a_1 \cdot \text{MaxLNo}), \text{ (Birch, 1988)} \quad (6)$$

$$b = b_0 - \exp(b_1 \cdot \text{MaxLNo}), \text{ (Birch, 1988)} \quad (7)$$

➤Où :

$a_0 = -0,009$; $a_1 = -0,2$; $b_0 = 0,0006$; $b_1 = -0,43$ sont des constantes empiriques (Birch *et al.*, 1998).

2.1.4.2 Validation du modèle

Pour valider les coefficients calculés, des données expérimentales indépendantes ont été utilisées (mentionnées ci-dessus). La validation du modèle a consisté à utiliser l'analyse de corrélation entre les valeurs observées et simulées de phénologie, de l'indice de surface foliaire, du nombre de feuilles, du rendement en grains et en biomasse. Les critères de validation des paramètres comprenaient le coefficient de détermination R^2 , la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (« Root Mean Square Error », RMSE) et la proximité de la « ligne 1 : 1 ». Le coefficient de détermination est un indice d'agrément variant entre 0 et 1 et se calcule par le ratio entre l'Erreur quadratique moyenne (*MSE*) et l'Erreur potentielle (*PE*) (Zouina, 2014). De plus, des lignes de divergence ont également été utilisées comme critères d'évaluation. Ces lignes de divergence sont calculées sur la base du coefficient de variation des données observées et selon Soltani et Sinclair (2012), dans une configuration de modèle raisonnablement bonne, environ 80 % des prévisions devraient être situées entre ces lignes de divergence.

2.1.4.3 Procédure de caractérisation des types de stress hydrique

Après évaluation, le modèle APSIM-sorgho a été utilisé pour caractériser les différents scénarios de stress hydriques affectant les deux variétés étudiées sur les 22 sites utilisant l'approche proposée par Chapman *et al.* (2000b) ; Chenu *et al.* (2011) ; Kholova *et al.* (2013). L'indice de stress hydrique est une variable de sortie du modèle APSIM-sorgho. En plus de l'indice de stress hydrique, le modèle a plusieurs autres variables de sortie notamment les rendements en grains et la biomasse, les stades de croissance, la photopériode et les degrés-jours.

Les simulations ont été exécutées par site pour toutes les années observées, pour les deux variétés et sur les deux principaux types de sols. Pour représenter la réalité en milieu paysan dans les zones d'étude, l'humidité du sol a été fixée à 20 % de la fraction d'eau disponible dans le sol (Chenu *et al.*, 2013 ; Chauhan *et al.*, 2014) au début de chaque saison de croissance. Cette condition initiale a été définie au début de chaque année de simulation afin d'homogénéiser les modalités de culture dans chacune des zones.

Une fenêtre de semis (du 1^{er} juin au 15 juillet) identique pour tous les sites et toutes les saisons a été définie. Dans cette fenêtre, le modèle devait commencer le semis dès que 20 mm de précipitations auraient été accumulées en sept jours successifs et que l'humidité du sol aurait atteint au moins 10 mm. Ce dernier critère a été fixé à 10 mm afin d'imiter le « profil vide du sol » en début de saison des pluies dans ces zones après une longue période de sécheresse (Akinseye *et al.*, 2015). Le semis devait quand même se produire le dernier jour de la fenêtre, c'est-à-dire le 15 juillet, même si les critères définis n'étaient pas remplis. Tous les autres paramètres, y compris la densité de semis (5,7 plants.m⁻²) et l'écartement entre les lignes (86 cm) ont été maintenus constants tout au long des simulations. Les valeurs de densité de semis et de l'écartement entre les lignes ont été obtenues à partir de données recueillies dans les champs des agriculteurs (données non publiées). De plus, les modalités de fertilisation ont été appliquées conformément à la recommandation faite par la recherche (100 kg.ha⁻¹ de DAP au semis, 50 kg.ha⁻¹ d'urée 45 jours après le semis) et ont également été maintenues constantes pour toutes les simulations.

2.1.4.4 Identification des types et de la fréquence des types de stress hydrique

Le modèle APSIM-sorgho, comme plusieurs modèles de culture, détermine l'effet de la contrainte hydrique via un indice de stress hydrique. Cet indice est le rapport entre la demande en évapotranspiration de la plante ou évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR), autorisée par les conditions hydriques du sol (Riou, 1997 ; Barbottin *et al.*, 2005). Cet indice qui permet d'évaluer l'état hydrique de la culture correspond à un facteur compris entre 0 et 1. Les valeurs proches de 0 indiquent que la culture a souffert du stress hydrique et celles proches de 1 indiquent qu'elle n'a pas ou a peu souffert du manque d'eau. Le rapport journalier entre l'évapotranspiration potentielle et réelle de la culture est simulé par le modèle au cours de la période de croissance.

Ainsi, pour déterminer l'état hydrique de la culture sur une année observée, la moyenne de l'indice de stress hydrique est calculée sur chaque 100 degrés-jours (°Cj) de 400 °Cj avant floraison à 400 °Cj après floraison et centré à zéro à la floraison. Des informations supplémentaires sur cette approche peuvent être trouvées dans Chapman *et al.*, (2000b), Chenu *et al.*, (2011) et Kholova *et al.*, (2013).

Les principaux scénarios de stress hydrique ont ensuite été déterminés en groupant tous les stress hydriques identifiés sur toutes les saisons et sur tous les sites et en les classifiant à l'aide des fonctions de partitionnement K-means (« Partitioning Around Means ») et PAM (« Partitioning Around Medoids ») du logiciel R (R Development Core team, 2008). Les deux

méthodes consistent à déterminer une partition d'un ensemble de n objets en k classes, k étant fixé à priori. Dans le premier cas, K-means, les objets sont répartis en k classes de façon à minimiser la fonction objective. Dans le second cas, PAM, on définit k objets représentatifs des classes, appelés médoïdes, situés au centre des classes. Le médoïde est l'objet pour lequel la dissimilarité moyenne par rapport aux autres objets de la classe est la plus faible.

Afin de permettre la comparaison des scénarios de stress hydrique similaires affectant différentes variétés dans une localité ou entre deux localités, les résultats de classification pour CSM63E et CSM335 ont d'abord été combinés et ensuite désagrégés par variété. Cette désagrégation consistait à déterminer des différences potentielles entre les deux variétés.

De plus, l'impact de chacun des stress hydriques sur le rendement a été évalué.

2.2 Modélisation de l'interaction GxExM pour l'identification des meilleures pratiques culturales pour la variété de sorgho CSM335 (TIÉBLÉ) au Mali

2.2.1 Choix de la variété et de données sur les pratiques culturales

Dans cette activité, seulement la variété CSM335 a été utilisée comme test particulièrement parce que c'est une variété qui est le plus souvent employée par le programme de sélection sorgho de l'ICRISAT en tant que variété témoin. Les données sur les pratiques culturales observées chez les agriculteurs ont été utilisées dans cette étude. Ces données ont été collectées lors d'essais conduits par des organisations paysannes en collaboration avec l'ICRISAT Mali (Tableau 4). Les essais ont été conduits dans 4119 champs paysans sur six sites d'étude de 1935 à 2015 (données non publiées). Ces jeux de données contiennent des informations sur les dates de semis, les dates et les doses d'application des engrais. Ces sites d'enquête ont été cartographiés sur nos 22 sites d'étude sur la base d'information climatique et aussi sur la base de leurs emplacements respectifs (Figure 1). Les informations sur le semis n'étaient pas disponibles pour la plupart des sites localisés au Sud du Mali ; par conséquent, les fenêtres de semis y ont été définies en fonction des connaissances des experts (Tableau 4).

Tableau 4 : Dates de semis définies par des experts ou observées dans les champs paysans

Isohyètes	Sites d'étude	Sites d'enquête	Nombre d'enquête	Min-moyenne-max dates de semis
< 400	Gao			1Juil - 25Juil
400-600	Mopti, Nara, Nioro, Niono	Mopti	15	1Juil - 25Juil
600-800	Ségou, Cinzana, Tominian, Kayes	Tominian	90	11Juil - 19Juil - 3Août
	Kolokani, Bafoulabé	San	10	1Juin - 30Juin
800-1000	Koutiala	Koutiala	461	14Juin - 28Juin - 31Juil
	Samanko, Kita	Kita	144	30Juin - 13Juil - 27Juil
	Ntarla, Dioila, Sotuba	Dioila	1217	7Mai - 10Juil - 21 Août
> 1000	Bougouni, Sikasso, Fakola, Kangaba, Keniéba, Massigui			30Mai - 21 Août

2.2.2 Mise en place de simulations

Deux étapes ont été suivies pour identifier les dates de semis optimales sur chaque site et évaluer l'impact des pratiques culturales sur les scénarios de stress hydrique et les rendements en grains de CSM335.

2.2.2.1 Identification des dates de semis

Les dates de semis ont été identifiées en définissant tout d'abord une large fenêtre de semis (du 1^{er} mai au 30 septembre) basée sur les dates de semis observées dans la zone de production du sorgho au Mali. Ensuite, cette large fenêtre de semis a été divisée en 13 petites fenêtres de 10 jours chacune, dans lesquelles le modèle a été autorisé à sélectionner automatiquement une date de semis optimale pour chaque année et chaque site. Treize simulations correspondant aux 13 fenêtres de semis ont ensuite été mises en place pour les 22 sites sélectionnés et sur les deux principaux types de sol. À l'exception de ces fenêtres de semis, tous les autres paramètres, y compris la fertilisation et la densité de semis, ont été maintenues constantes pour toutes les simulations. La fertilisation utilisée a alors été celle recommandée par la recherche à raison de 100 kg.ha⁻¹ de DAP au semis et 50 kg.ha⁻¹ d'urée

45 jours après semis. La densité de semis utilisée était de 5,7 plants.m⁻². Le critère de semis utilisé précédemment a aussi été maintenu inchangé. Ainsi, les semis devaient avoir lieu lorsque 20 mm de précipitations avaient été accumulées en sept jours successifs et que l'humidité du sol avait atteint au moins 10 mm. Lorsque les critères de semis n'étaient pas remplis, le modèle était autorisé à prendre le dernier jour de la fenêtre de semis comme date de semis.

Au total, 572 simulations (1 niveau d'engrais × 2 types de sols principaux × 1 type de culture × 13 fenêtres de semis × 22 sites) ont été initialement définies. Ensuite, la moyenne des dates de semis quotidiennes produites par le modèle a été calculée pour chaque saison et dans chaque station. Au total, deux dates de semis (une pour le sol à faible CRE et une autre pour le sol à forte CRE) fournissant le rendement simulé le plus élevé indépendamment des saisons ont été sélectionnées. Ces dates ont été comparées par site aux dates de semis sélectionnées par le modèle dans l'activité précédente (2.1. Caractérisation des scénarios de stress hydrique et leurs effets sur la production du sorgho au Mali utilisant une approche de modélisation) sur les mêmes sites et qu'on a nommé SD1 et avec les dates de semis observées dans les champs paysans ou définies par des experts (SD2). Ces différentes dates ont été comparées pour voir la ressemblance entre elles.

2.2.2.2 Pratiques de gestion des cultures

Des simulations ont été effectuées pour tous les sites (22 sites) et toutes les années (1080 x 2 types de sol) testés afin d'évaluer l'impact de trois pratiques de gestion sur les scénarios de stress hydrique identifiés dans l'activité précédente (2.1.) utilisant l'indice de stress hydrique S / D ratio (défini ci-dessus).

• **Dates de semis :**

Une fois les trois séries de dates de semis comparées, leurs effets ont été évalués sur le rendement en grains et sur les scénarios saisonniers de stress hydrique identifiés dans l'activité précédente (2.1.). Les simulations ont été exécutées par site pour toutes les années observées utilisant les modalités de fertilisation recommandée par la recherche et la densité de semis 5,7 plants.m⁻².

• **Dose et période d'application de l'engrais :**

En termes d'application d'engrais, trois niveaux ont été comparés à la dose recommandée :

- ✓ 0 kg.ha⁻¹ d'engrais (F1) : ce traitement est la réalité sur le terrain dans de nombreuses zones rurales ;

- ✓ 0 kg.ha⁻¹ au semis et 50 kg.ha⁻¹ d'urée 45 jours après le semis (F2) : ce traitement est utilisé par ceux qui peuvent se permettre d'acheter des intrants ou d'y avoir accès ;
- ✓ 50 kg.ha⁻¹ de DAP au semis et 25 kg.ha⁻¹ d'urée 45 jours après le semis (F3) : soit 50 % du taux recommandé ;
- ✓ 100 kg.ha⁻¹ de DAP au semis et 50 kg.ha⁻¹ d'urée 45 jours après le semis (F4) : qui est la référence dans cette étude, c'est-à-dire le taux recommandé.

Les simulations ont été exécutées pour chaque dose d'engrais en utilisant les dates de semis observées dans les champs des agriculteurs ou définies selon les connaissances expertes sur chacun des 22 sites, avec une densité de semis constante (5,7 plants.m⁻²). L'effet de ces différentes pratiques d'engrais sur le rendement en grains et les scénarios saisonniers de stress hydrique a aussi été évalué.

• **Densité de semis :**

La densité de semis standard de 5,7 plants.m⁻² utilisée dans cette étude a été modifiée en la diminuant de 50 % afin d'imiter les pratiques des agriculteurs et en l'augmentant de 50 % afin d'évaluer l'effet d'intensification sur le rendement en grains. Ces trois scénarios de densité (2,85 plants.m⁻²; 5,7 plants.m⁻²; 8,55 plants.m⁻²) ont été testés pour chacun des quatre niveaux d'engrais mentionnés ci-dessus en utilisant les dates de semis observées dans les champs paysans ou définies selon les connaissances expertes.

2.2.2.3 Effets de la modification des pratiques culturales sur les scénarios de stress hydrique et le rendement en grains

Les principaux scénarios de stress ont été déterminés pour chaque pratique culturale en groupant tous les stress hydriques identifiés pour toutes les saisons et sur tous les sites et en les classifiant à l'aide des fonctions de partitionnement K-means (Partitioning Around Means) et PAM (Partitioning Around Medoids) du logiciel R (R Development Core team, 2008). Ce regroupement a été effectué sur la base de celui réalisé durant l'activité précédente dans laquelle trois principaux scénarios de stress hydrique ont été révélés dans la région (Pas de stress hydrique: WSD1, stress hydrique terminal précoce avant la floraison : WSD2 et stress hydrique terminal pendant la période florale : WSD3). Ces scénarios de stress hydrique ont été comparés à ceux identifiés sous chacune des pratiques culturales étudiées. La fréquence d'occurrence des scénarios de stress hydrique identifiés a été déterminée et analysée pour évaluer l'effet des pratiques de gestion sur les scénarios de stress hydrique et sur les rendements.

2.3 Evaluation des résultats de simulations des effets combinés de différentes pratiques culturales sur le sorgho par le modèle APSIM au Mali

2.3.1 Matériel végétal

Trois variétés locales contrastées fournies par le programme de sélection de l'ICRISAT ont été utilisées dans cette étude : CSM63E, CSM335 et IS15401. Ces variétés ont déjà été décrites plus haut dans ce document. En gros, elles sont différentes en termes de longueur de cycle et surtout de sensibilité à la photopériode. Elles ont été préalablement utilisées pour représenter les trois grandes zones agro-climatiques du Mali : CSM63E représentant la zone Sahélienne au Nord, CSM335 la zone Soudanienne au Centre et IS15401 la zone Guinéenne au Sud. CSM63E et CSM335 sont des écotypes issus de la Collection de Sorgho Malienne de type guinea avec des panicules lâches et de taille haute. IS15401 est originaire du Cameroun, c'est une variété locale avec une taille haute.

2.3.2 Conduite de l'essai

L'essai a été conduit à la station de Samanko au Mali (12°32 N, 8°04 O) durant la saison pluvieuse de 2018. Le terrain a d'abord été labouré le 21 mai et le labour a été effectué dans le sens perpendiculaire à la pente. Le 22 mai, des billons de 3m de long avec un intervalle entre deux billons de 0,75 m ont été formés. Ensuite ils ont été compactés le même jour afin d'éviter l'érosion du sol par ruissellement.

2.3.2.1 Dispositif expérimental

Le dispositif était un split-split-plot à trois répétitions avec la date de semis en sous bloc qui est la parcelle principale, la fertilisation en sous-parcelle et la combinaison densité de semis x variété en sous-sous-parcelle. Les parcelles élémentaires comportaient 4 lignes de 3 m de long (Figure 4).

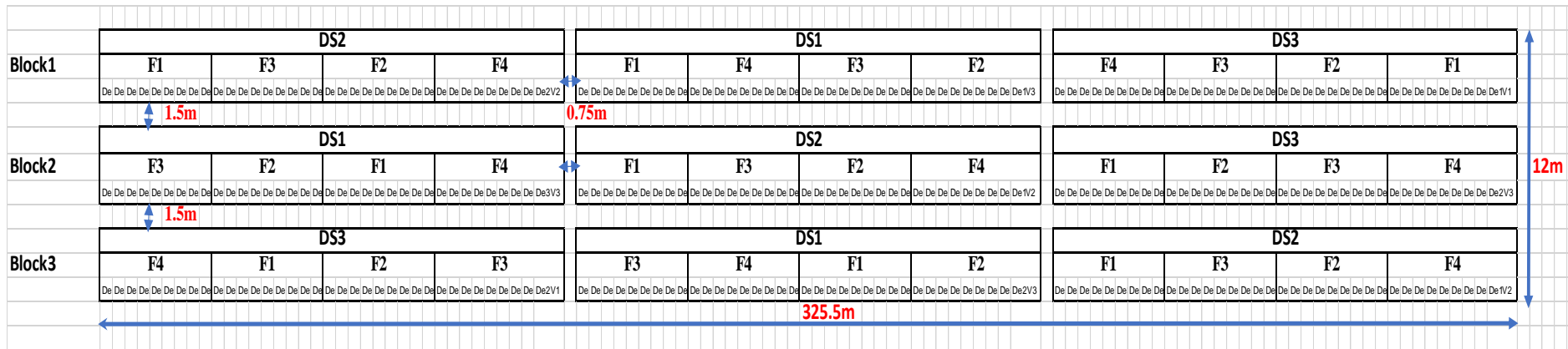


Figure 4 : Plan de masse de l'essai de validation du modèle

2.3.2.2 Semis

Les semis ont été effectués manuellement à 5 graines par poquet les 1^{er} juin, 29 juin et 27 juillet à une distance de 0,15 m ; 0,23 m et 0,46 m entre les poquets respectivement pour les densités de 85555,58 ; 57971,01 et 28985 plants.ha⁻¹. Le démariage à 1 plant par poquet ainsi que le repiquage ont été effectués deux semaines après semis dans toutes les parcelles élémentaires. Les sarclages et les apports d'engrais étaient effectués simultanément sur toutes les parcelles.



Figure 5 : Image des opérations de repiquage

2.3.2.3 Fertilisation

La fertilisation était appliquée à la dose de :

- 0 kg.ha⁻¹ de fertilisation (F1),
- 0 kg.ha⁻¹ au semis et 50 kg.ha⁻¹ d'urée 45 jours après semis (F2),
- 50 kg.ha⁻¹ de DAP au semis et 25 kg.ha⁻¹ d'urée 45 jours après semis (F3),
- 100 kg.ha⁻¹ de DAP au semis et 50 kg.ha⁻¹ d'urée 45 jours après semis (F4).

2.3.2.4 Types et fréquences des mesures

✓ Mesures non-destructives

Les mesures non-destructives ont été réalisées à pas de temps hebdomadaire. Les dates des stades feuille drapeau et floraison ont été enregistrées par parcelle. La croissance phénologique (hauteur des plants, nombre de feuilles apparues, ligulées, les feuilles sénescents et nombre de talles) a été mesurée sur 4 plantes sélectionnées dans chaque

parcelle (Figure 6). La longueur et la largeur des feuilles de ces 4 plantes sélectionnées ont été mesurées dans chacune des parcelles.



Figure 6 : Marquage de feuille pour mesure (a) échelle utilisée pour la mesure de hauteur des plants (b)

✓ Mesures destructives

Deux à trois mesures destructives ont été réalisées sur les plants des différents traitements à un intervalle de trois semaines environ. A chaque mesure, 4 plants étaient collectés par parcelle et pour chaque traitement. Les feuilles, les tiges et en fin de cycle les panicules et les graines des plants prélevés ont été séparées. La surface foliaire a été mesurée à l'aide d'un planimètre (Figure 7 ; LI-1300, LICOR, Lincoln, NE). Ensuite les poids frais et secs des feuilles et tiges ont été pesés.

A maturité, le poids total de la biomasse aérienne fraîche par parcelle a été pesé, ensuite un sous-échantillon a été prélevé, pesé en frais puis mis à sécher à l'air libre pendant 3 semaines et le poids sec de ce sous-échantillon a aussi été déterminé. Le nombre de panicules récoltées avec ou sans graines a été compté. Les panicules ont été pesées et mises dans le sac pour séchage. Après 3 semaines, les panicules ont été battues et les graines ont été récupérées et pesées.



Figure 7 : Appareil de mesure de la surface foliaire (planimètre LI-1300, LICOR, Lincoln, NE)




Figure 8 : Technique de mesure de la surface foliaire

2.3.3 Données climatiques

La pluviométrie, les températures minimale et maximale et la radiation solaire nécessaire pour faire tourner le modèle APSIM ont été enregistrées automatiquement au pas de temps horaire par la station météo automatique située sur le campus de l'ICRISAT.

2.3.4 Données sur le sol

Les 23 et 24 mai, des échantillons de sol ont été prélevés à différentes parties du champ suivant le schéma ci-dessous (Figure 9). En tout, neuf profils ont été choisis et à chacun de ces profils trois prélèvements ont été faits à trois profondeurs différentes (0-30, 30-60 et 60-90 cm) pour des analyses texturales et chimiques.

 Ces points bleus représentent les points de prélèvement d'échantillon de sol

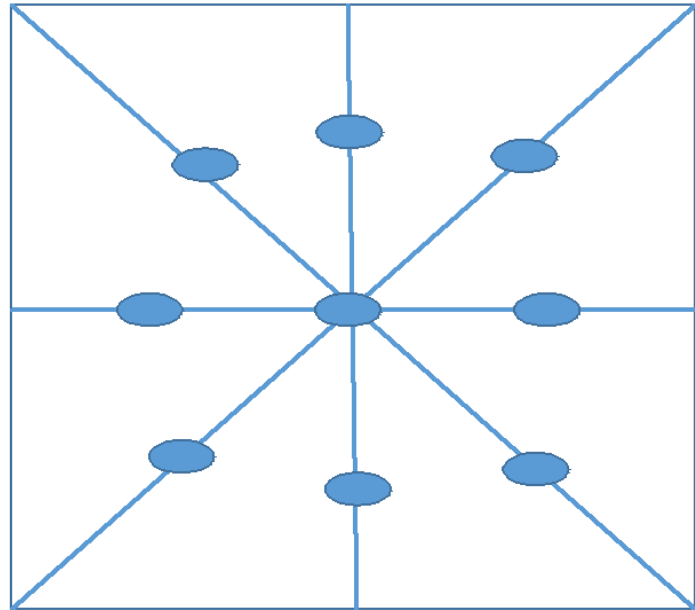


Figure 9 : Plan d'échantillonnage du sol

2.3.5 Analyse statistique

Le logiciel Genstat 12^e édition a été utilisé pour l'analyse de la variance des effets combinés de tous les facteurs étudiés sur les rendements. Le test t a aussi été utilisé pour voir la différence entre les rendements moyens de 2 traitements donnés et la valeur de p (p-value) résultante a été rapportée.

2.4 Réponse de la transpiration des lignées parentales de sorgho malien au déficit de pression de vapeur atmosphérique et au séchage du sol

2.4.1 Matériel végétal et conditions de croissance de la plante

Dans le cadre de cette activité un total de trente-huit variétés a été testé dans les différentes conditions. Ces variétés ont été sélectionnées soit, comme parents dans la création des populations multi-parentales de type Backcross Nested Association Mapping (BCNAM) ayant pour but de réaliser des analyses d'association (34 génotypes) ; soit pour avoir été testées au préalable et identifiées comme sensible ou non au VPD (4 génotypes). Les parents de la population BCNAM sont d'origine diverse (Afrique, Asie et Amérique) avec des caractéristiques importantes et spécifiques. Parmi les parents BCNAM il y avait 3 parents récurrents qui sont des variétés élites adaptées, issus des différents programmes de sélection de l'IER et l'ICRISAT-Mali et le reste des parents étaient considérés comme des parents donneurs dans création de la population BC-NAM. Elles ont été toutes fournies par

l'ICRISAT Mali et Inde. Les trente-huit variétés ont été évaluées deux fois dans quatre séries d'essais dans les stations de recherche de l'ICRISAT à Samanko, Mali (12°32' N, 8°04' O, altitude 329 m) et à Telangana, Inde (17°30' N, 78°16' E, altitude 549 m). La première série des quatre essais était implantée dans les pots, et ils ont consisté à tester la capacité de résistance des variétés à la transpiration lorsque le VPD augmente. Les quatre autres séries d'essais étaient conduites pour tester la capacité de résistance des variétés à la transpiration lorsqu'on laisse le sol se dessécher avec deux essais en pots et deux autres essais dans les lysimètres. Les pots étaient en chlorure de polyvinyle, munis d'un bouchon plat au fond. Un papier (format A4) blanc a été placé entre le bouchon plat au fond des pots et le sol utilisé pour les remplir de manière à éviter la perte de terre par les petits trous forés au fond. Ces petits trous permettent le drainage de l'excès d'eau. La taille des pots en plastique était de 20 cm de diamètre et de 19 cm de hauteur.

Dans chaque essai, le nombre d'entrées différait en fonction de la disponibilité des variétés dans les deux stations de recherche (Tableau 5). Le dispositif expérimental utilisé pour la conduite des différents essais était un bloc complètement randomisé avec 5 à 6 répétitions.

Tableau 5 : Données générales sur les différents essais de VPD et de la baisse d'humidité du sol au Mali et en Inde

Essais	Type d'essai	Date de semis	Durée de l'essai	Nom b. Geno	Température (°C)		Déficit de pression de vapeur (kPa)		Nomb. Rep.	Sites
					Min	Max	Min	Max		
Essai 1	VPD	14/05/2014	1 jour	6	33,67	44,96	2,40	5,68	6	Inde
Essai 2	VPD	21/10/2014	1 jour	5	26,09	32,93	1,04	3,95	5	Mali
Essai 3	VPD	20/05/2015	2 jours	38	30,75	43,21	1,68	5,27	5	Inde
Essai 4	VPD	26/04/2016	5 jours	33	30,04	40,25	1,51	4,50	5	Inde
Essai 5	Dessèchement du sol	14/05/2014	15 jours	6					6	Inde
Essai 6	Dessèchement du sol	20/10/2014	17 jours	20					5	Mali
Essai 7	Dessèchement du sol	22/06/2016	20 jours	38					5	Inde
Essai 8	Dessèchement du sol	28/12/2017	20 jours	38					5	Inde
Nomb. : Nombre Rep. : répétition Geno. : génotype										

2.4.2 Essais de déficit de pression de vapeur (VPD)

Les valeurs de VPD calculées pour toutes les variétés étaient comprises entre 1,28 et 5,68 kPa. Les valeurs de VPD les plus basses ont été observées dans l'essai 2 dans des conditions naturelles au Mali.

2.4.2.1 Réaction des variétés au VPD à travers la transpiration en environnement contrôlé

Dans l'essai 1, six lignées parentales [(Lata3, Keninkeni, Grinkan) parents récurrents BC-NAM, (CSM63E, Sambalma et B35) parents donneurs BC-NAM] présentant des caractéristiques différentes ont été cultivées sur le site de l'ICRISAT en Inde. Les pots étaient remplis avec 5 kg de sol noir (vertisol) collecté à la ferme de l'ICRISAT. Le semis de l'essai 1 a été effectué le 14 mai 2014 sous serre à deux graines par poquet, dans cinq poquets par pot. Les plantes étaient démariées à un plant par poquet une semaine après semis et à deux plants homogènes par pot deux semaines après le semis. La réaction des variétés à différentes valeurs de VPD à travers la transpiration a été évaluée dans une chambre de croissance 21 jours après le semis (JAS).

Les essais 3 et 4 incluaient les six lignées testées dans l'essai 1 pour une réévaluation. Le nombre total d'entrée était respectivement de 32 et 27 pour les essais 3 et 4. L'essai 3 a été semé le 20 mai 2015 tandis que les plants de l'essai 4 étaient respectivement semés les 26, 27, 28, 30 et 31 avril 2016 pour les répétitions 1, 2, 3, 4 et 5. Les pots étaient remplis avec 5 kg de sol noir (Vertisol) collecté dans la ferme de l'ICRISAT et fertilisé avec 1,35 g de DAP par pot. Pour l'essai 3, le premier démariage a été effectué neuf jours après semis (29 mai 2015) à 3 plants par pot. Le deuxième démariage a été effectué 14 jours après semis le 03 juin /2015 à 2 plants homogènes par pot. Pour l'essai 4, le premier démariage a été effectué six jours après semis (02 mai 2016) à 4 plants par pot. Dans cet essai, tous les génotypes ont germé 3 à 4 jours après le semis à l'exception de SC566-14, Framida, BISS09 et 02-SBF4TD2 qui ont eu une faible germination (SC566-14 et BISS09 n'ont pas été pris en compte dans les analyses). Le second démariage a été effectué le 15 mai 2016 à 2 plants homogènes par pot. Les plants ont été traités avec du nitrate de calcium à raison de 0,0118 g.100ml⁻¹ pour éviter une carence en calcium. Dans l'essai 3, la réaction des plants au VPD par transpiration a été évaluée dans trois différentes chambres de croissance présentant des caractéristiques et des paramètres similaires. Les mesures ont été effectuées à 21 et 22 jours après semis. Pour l'essai 4, le traitement de VPD a été appliqué aux plants 25 jours après semis en 5 jours consécutifs (1 répétition par jour).

2.4.2.2 Réaction des variétés au VPD à travers la transpiration en milieu naturel

L'essai 2 a été mis en place à l'ICRISAT, Mali, dans des conditions naturelles. Six variétés ont été évaluées dont cinq testées dans l'essai 1 et une lignée supplémentaire (CSM335) qui a remplacé Keninkeni de l'essai 1. Dans l'essai 2, B35 a eu une faible germination et n'a pas été pris en compte dans les analyses. Donc au total, quatre variétés déjà évaluées dans l'essai 1 ont été réévaluées dans cet essai. Les pots ont été remplis avec 5 kg de sol sablo-limoneux. Les sols ont été fertilisés par du phosphate de di-ammonium (DAP) à raison de 0,3 g.kg⁻¹ de sol. Les graines ont été semées le 21 octobre 2014 dans 5 poquets distincts par pot avec 2-3 graines par poquet. Les plants ont été démariés à un plant par poquet une semaine après l'émergence et à deux plants homogènes par pot deux semaines après l'émergence des plants. L'évaluation de la réaction des plants au VPD à travers la transpiration a débuté 30 jours après le semis (21 novembre 2014).

Les pots des essais de VPD ont été maintenus dans des conditions optimum.

2.4.3 Essais d'assèchement du sol

2.4.3.1 Réaction des variétés à l'assèchement progressif du sol à travers la transpiration en milieu contrôlé en Inde (dans les pots)

En Inde, l'essai 5 a été conduit sous serre afin de mesurer le seuil de la fraction d'eau transpirable du sol (FTSW) auquel la perte d'eau par transpiration baisse avec l'assèchement progressif du sol pour les mêmes six variétés (Lata3, Keninkeni, Grinkan, CSM63E, Sambalma et B35) utilisées dans l'essai 1 (qui est le premier essai de VPD). Les graines ont été semées le 14 mai 2014 dans des pots en plastique de 20 cm de diamètre et 19 cm de hauteur. Les pots ont été remplis par du sol noir (5 kg). Au total, cinq pots répétés ont été établis pour chaque lignée parentale. Les plants étaient régulièrement arrosés pendant environ 20 jours après le semis pour éviter le risque de stress hydrique.

2.4.3.2 Réaction des variétés à l'assèchement progressif du sol à travers la transpiration en milieu contrôlé au Mali (dans les pots)

Au niveau de l'essai 6, vingt des 38 lignées parentales (utilisées dans l'essai 3) ont été utilisées pour mesurer le seuil de la fraction d'eau transpirable du sol (FTSW) auquel la perte d'eau par transpiration baisse avec l'assèchement progressif du sol au Mali. Le semis a été effectué le 20 octobre 2014 à 2 graines par poquet et 5 poquets par pot. Un premier démariage

à 3 plants par pot a été réalisé le 28 octobre 2014 et un second démariage a été effectué le 11 novembre 2014 à raison de 2 plants homogènes par pot. Un insecticide a été appliqué le 31 octobre 2014 à la dose de 20 ml.20 l⁻¹ de K-optimal (Lamda Cyhalothrine (15g/l), Acetamipride (20g/l)) pour prévenir le cœur mort.

2.4.3.3 Réaction des variétés à l'assèchement progressif du sol à travers la transpiration en milieu naturel en Inde (dans les lysimètres)

Dans les essais 7 et 8, trente-deux des 38 lignées ont été cultivées dans des lysimètres en saison pluvieuse (2016) et en contre-saison (2017) en Inde au siège de l'ICRISAT. Les lysimètres sont constitués de cylindres en chlorure de polyvinyle (120 cm de hauteur, 20 cm de diamètre) remplis d'un terreau sableux (Alfsol). Le sol dans chaque cylindre de l'essai de la saison des pluies (Essai 7) a été fertilisé avec du phosphate de di-ammonium et de l'urée avant le semis tandis que celui de l'essai de la contre-saison (Essai 8) a été fertilisé avec du di-ammonium et du muriate de potasse à la dose de 200 mg.kg⁻¹ de sol. Les graines pour la saison pluvieuse ont été semées le 22 juin 2016 tandis que celles pour la contre-saison ont été semées le 28 décembre 2017. Le dispositif expérimental utilisé était un bloc complet randomisé répété cinq fois. La réponse de la transpiration des plants à la baisse de l'humidité du sol a été évaluée environ 20 jours après semis dans les deux essais.

2.4.4 Protocole de mesure

La réaction de chaque plant de sorgho au VPD croissant et à la réduction progressive de l'humidité du sol à travers la transpiration a été mesurée selon les méthodes décrites sur le site Web de GEMS (<http://gems.icrisat.org/>) et par Kholová *et al.* (2010), Devi et Sinclair (2011), Zaman-allah *et al.* (2011), Belko *et al.* (2012), Choudhary *et al.* (2013) et Vadez *et al.* (2013).

2.4.4.1 Protocole d'évaluation de la réaction des variétés à différentes conditions de VPD à travers la transpiration

Le matin avant le début du traitement de VPD, tous les pots de tous les essais ont été arrosés jusqu'à saturation. Ensuite le surplus d'eau est retiré par drainage. Le même jour dans la soirée, les pots des essais 1 à 3 (Essais 1 à 3) ont été recouverts d'une feuille de plastique et d'une couche de billes de chlorure de polyvinyle alcaténiques. Par contre, les pots de l'essai 4 ont été emballés dans des sacs en plastique blanc et attachés autour de la tige de la plante. Dans les deux cas, le but était d'empêcher la perte d'eau par évaporation et de permettre la

perte d'eau uniquement par la transpiration de la plante. Par la suite, tous les plants des environnements contrôlés, afin d'assurer leur acclimatation, ont été déplacés dans des chambres de croissance. Le jour du test, les plants ont été pesés chaque heure de 8h00 à 16h00 pour l'essai 1, l'essai 3 et l'essai 4 et de 9h00 à 16h00 pour l'essai 2. Pour l'essai conduit en milieu réel (l'essai 2), les mesures ont été effectuées sous un ciel dégagé sauf qu'une pluie fine est tombée vers 14h00 cela a entraîné une baisse de température. À la fin des essais de VPD, toutes les feuilles ont été séparées des tiges et numérisées à l'aide du « Leaf area meter » (LI-1300, LICOR, Lincoln, NE) pour quantifier la surface foliaire totale. Le poids sec des feuilles et des tiges a été pesé. Deux capteurs d'humidité et de température ont été installés dans chaque environnement expérimental (serres, chambres de croissance et extérieurs), enregistrant la température de l'air et l'humidité à des intervalles de 5 minutes au cours des périodes de croissance.

La transpiration a été estimée comme étant la différence entre les poids successifs. Le taux de transpiration (T_r) des plants a été exprimé en perte d'eau par unité de surface foliaire et T_r a été calculé en divisant la transpiration par la surface foliaire totale.

2.4.4.2 Protocole d'évaluation de la réaction des plants à l'assèchement de l'eau du sol par la transpiration (dans les pots)

Les mesures de la réaction des 38 lignées parentales à l'assèchement du sol par la transpiration ont commencé 20 jours après le semis. Afin de prévenir la perte de l'eau du sol par l'évaporation, tous les pots ont été recouverts d'une feuille de plastique blanche ainsi que d'une couche de billes de chlorure de polyvinyle alcaténiques. Un jour avant le début de l'essai, tous les pots ont été complètement irrigués et l'excès d'eau a été évacué par drainage. Le matin du test de dessèchement du sol, considéré comme le premier jour de traitement, tous les pots ont été pesés vers 09h00 pour obtenir le poids initial lorsque le sol était à la capacité au champ. Ensuite, les plants ont été divisés en 2 traitements et chaque traitement était constitué d'un nombre égal de répétitions pour chaque génotype. Les plants du premier traitement ont été maintenus dans des conditions irriguées (well watered : WW) tandis que les plants du traitement de stress hydrique ont été progressivement exposés au stress hydrique (water stress : WS). Les plants irrigués ont été maintenus à environ 80 % de leur capacité au champ grâce à une compensation quotidienne des pertes en eau (Sinclair et Ludlow, 1986). Afin de maintenir une intensité de stress hydrique similaire sur tous les génotypes, les pots de WS ont subi une perte nette quotidienne maximale de 70 g d'humidité du sol et ont été arrosés si nécessaire pour compenser toute perte d'eau supérieure à 70 g (Kholová *et al.*, 2010 ; Vadez

et al., 2011 ; Zaman-allah *et al.*, 2011 ; Sinclair et Muchow, 2001). Les pots ont successivement été pesés par jour pour mesurer les pertes en eau par transpiration pendant environ 15 jours jugés suffisants pour que la transpiration des plantes de WS soit inférieure à 10 % de celle des plantes de WW.

À la fin des essais de dessèchement du sol, les poids secs des feuilles et tiges des plants de WW et WS ont été mesurés. La surface foliaire de chaque plant a été numérisée à l'aide du « Leaf Area Meter » (LI-1300, LICOR, Lincoln, NE).

La transpiration d'un jour a été calculée comme étant la différence entre le poids des pots de ce jour et le poids des pots du jour précédent (Devi *et al.*, 2011 ; Choudhary *et al.*, 2013). Pour réduire la différence significative perçue entre la taille des plants au sein et entre les génotypes, le taux de transpiration journalier d'un génotype donné a été normalisé en divisant chaque valeur de transpiration individuelle par le taux de transpiration moyen des plants de WW de ce génotype (Zaman-Allah *et al.*, 2011). Ce taux de transpiration normalisé a été appelé le ratio de transpiration (TR).

Le ratio de transpiration a ensuite été normalisé en divisant le ratio de transpiration normalisé de chaque plant par le taux moyen de transpiration normalisée évalué pour chaque plant au cours des cinq premiers jours de l'essai (Devi *et al.*, 2011). Ce calcul a été fait sur les plants stressés.

La teneur en eau de chaque traitement exprimée ici en tant que fraction d'eau du sol utilisable par la plante (FTSW) a été calculée comme suit :

$$FTSW = (ATSW_t - ASW_e) / (TTSW - ATSW_t) \quad (8)$$

Où

- ATSW_t: La quantité d'eau disponible à un instant « t » (Available Transpirable Soil Water)
- TTSW : la quantité d'eau accessible dans le sol en début de l'essai (Total Transpirable Soil Water)
- ASW_e : quantité d'eau disponible à la fin de l'essai (Available Soil Water at the end of trial)

2.4.4.3 Protocole d'évaluation de la réaction des plants à l'assèchement de l'eau du sol par la transpiration (dans les lysimètres)

Une description détaillée des essais lysimétriques peut être trouvée dans Vadez *et al.*, (2011) ; Zaman-allah *et al.*, (2011) ; Vadez et Ratnakumar, (2016). Les plants ont été complètement irrigués pendant tout le cycle de la culture et maintenu à la capacité au champ jusqu'au moment de la mise en place du stress hydrique, soit environ 20 jours après le semis pour les deux essais. Ensuite, les tubes ont été recouverts d'une couche de 2 cm de billes de polyéthylène basse densité et placés sur une feuille de plastique ronde et fendue afin de prévenir les pertes d'eau par évaporation (Vadez et Ratnakumar, 2016). Les tubes ont été pesés trois fois à cinq jours d'intervalle, puis deux fois à une semaine d'intervalle et enfin trois fois à deux semaines d'intervalle pour l'essai de la saison des pluies et cinq fois à cinq et sept jours d'intervalle, suivis de trois pesées à deux semaines d'intervalle pour l'essai mené en contre-saison. La transpiration a été calculée comme étant la différence entre les poids successifs des cylindres et les ajouts d'eau. La transpiration totale a été calculée comme la somme de toutes les données de transpiration. L'efficacité de la transpiration a été calculée en divisant le poids total de la biomasse par la transpiration totale (Vadez et Ratnakumar, 2016).



1. Pots en plastique de 20 cm de diamètre et 19 cm de hauteur



2. Papier blanc placé entre le bouchon plat au fond du pot et le sol utilisé pour remplir les pots, de manière à éviter la perte de terre par les petits trous forés au fond



3. Les pots ont été remplis avec 5 kg de sol noir (Vertisol) collecté dans la ferme de l'ICRISAT



4. Pot complètement irrigué et l'excès d'eau retiré par drainage



5. Sol recouvert de feuille en plastique et de Couche de billes de chlorure de polyvinyle alcaténique pour empêcher la perte d'eau par évaporation lors de l'évaluation de la transpiration de la plante



6. Plants de sorgho cultivés dans les lysimètres

Figure 10 : Etapes de mise en place des essais en pot et lysimètre

2.4.5 Analyse statistique

L'analyse de variance a été effectuée en utilisant le logiciel Genstat 12^e édition pour le contrôle de la qualité des données. L'analyse de régression (segmentée et linéaire) a été effectuée à l'aide du logiciel Graph-Pad-Prism pour identifier la réaction des variétés aux différents stress imposés (VPD croissant et l'assèchement progressif du sol). En d'autres termes, il s'agissait d'identifier les génotypes qui étaient capables d'exhiber une limitation de la perte d'eau par transpiration due à l'augmentation du VPD ou à la diminution de l'humidité du sol. Le logiciel était autorisé à essayer deux modèles (le modèle segmenté et le modèle linéaire) et à choisir celui qui convenait le mieux à la réponse de chacun des génotypes. La régression segmentée est une technique statistique utilisée pour mesurer l'effet d'un ou de plusieurs événements sur une série de mesures répétées dans le temps. Elle est surtout utilisée dans le cas où il n'est pas possible d'avoir un groupe de contrôle en parallèle. La variable d'intérêt doit être cependant mesurée à intervalles réguliers dans le temps (Youness et Amar, 2010). La régression segmentée ajuste alors une ligne de régression linéaire à une partie des

données étudiées (lorsque X est inférieur à une valeur X_0 = pente en dessous de l'intersection) et une deuxième ligne de régression linéaire au reste des données (lorsque X est supérieur à X_0 = pente au-dessus de l'intersection). La régression segmentée garantit que les deux segments se croisent à $X = X_0$. Une analyse de variance pour les mesures répétées a également été réalisée avec Genstat en utilisant la corrélation autorégressive pour déterminer la variance entre les séries temporelles.

CHAPITRE III : RÉSULTATS

3.1 Caractérisation des scénarios de stress hydrique et leur effet sur la production du sorgho au Mali utilisant une approche de modélisation

3.1.1 Paramétrage des variétés

Les valeurs finales des paramètres calculés pour CSM63E et CSM335 sont présentées dans le tableau 6. Le tableau 6 présente les différentes phases phénologiques en degré-jours pour les 2 variétés. Sur la Figure 11 (A à D), a été rapportée la relation entre les données simulées et mesurées obtenues. La Figure 11A illustre la qualité de l'ajustement de la période florale en réponse à la photopériode pour les deux variétés dont la réactivité à la Pp diffère. Le modèle simule la floraison avec la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (« Root Mean Square Error », RMSE) des essais 3 et 4 pour CSM63E et CSM335 respectivement. Le temps thermique accumulé paramétré de la fin de la phase juvénile à l'initiation de la panicule est de 116°Cd pour le CSM335 et de 166°Cd pour le CSM63E. La relation linéaire entre la Pp moyenne de la fin de la phase juvénile à l'initiation paniculaire et le temps thermique accumulé pendant cette période a montré une Ppslope (pente de la photopériode) de $31^{\circ}\text{Cd}\cdot\text{h}^{-1}$ et de $198^{\circ}\text{Cd}\cdot\text{h}^{-1}$ pour CSM63E et CSM335 respectivement, c'est-à-dire que CSM63E était moins sensible à la photopériode que CSM335. La Figure 11A montre également l'accord entre la durée observée et estimée de la floraison à la maturité physiologique pour le même jeu de données. Le temps thermique accumulé pour cette période était de 434°Cj pour CSM63E et de 518°Cj pour CSM335.

Tableau 6 : Coefficients calculés pour le paramétrage.

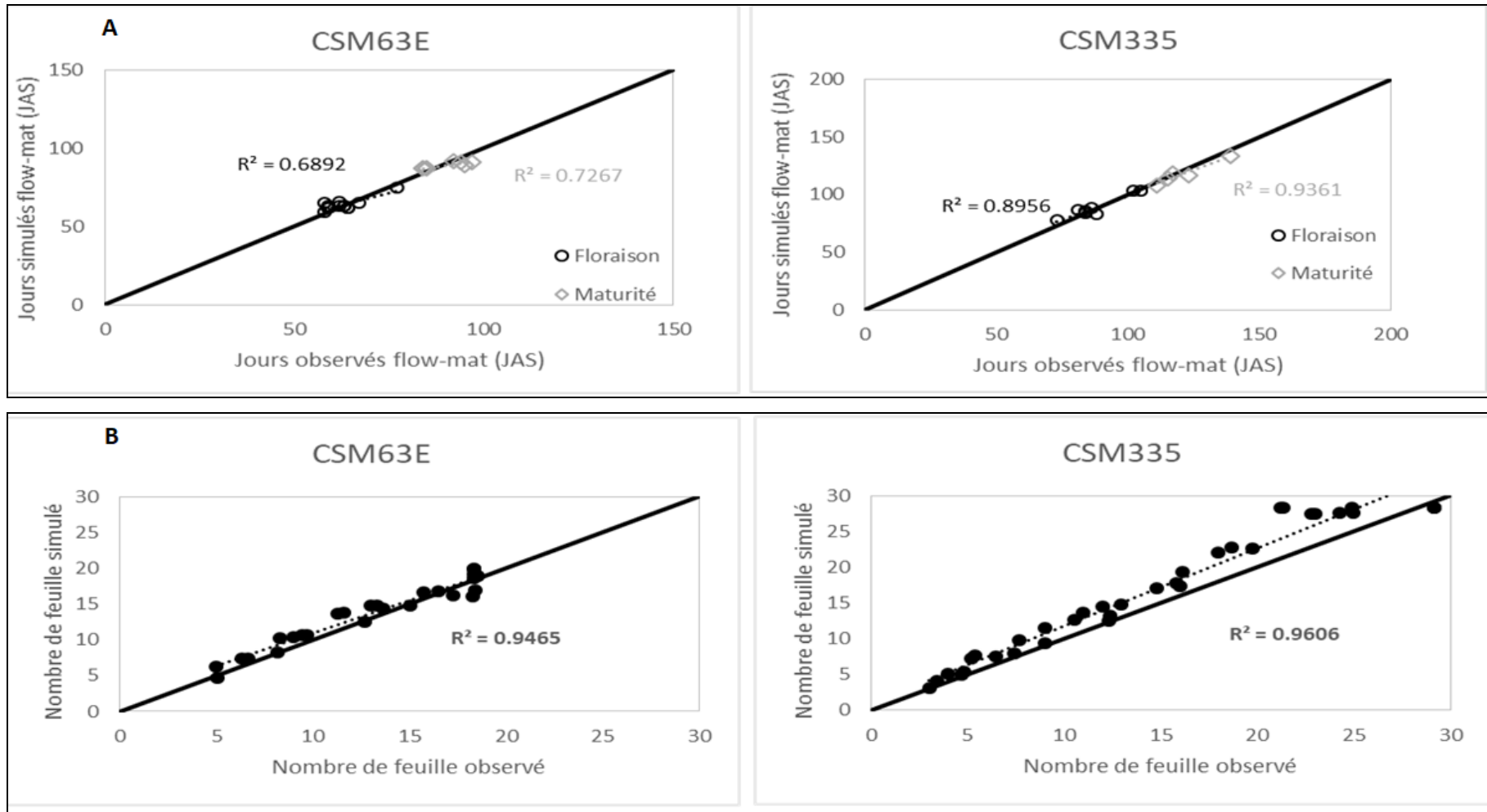
Paramètres	Unités	CSM63E	CSM335
Photopériode Minimale (Ppcrit1)	H	11,5	11,5
Photopériode maximale (Ppcrit2)	H	13,5	13,5
Pente de la Photopériode (Ppslope)	°C/H	31*	198*
<tt_fin stade juvénile – initiation paniculaire >	°Cj	166*	116*
<tt_feuille drapeau - floraison >	°Cj	170	170
<tt_floraison – formation _grain>	°Cj	80	80
<tt maturité - _to_ripe>	°Cj	1	1
<tt_floraison _- maturité>	°Cj	434*	518*
Matière sèche par graine		0,00083	0,001931
Taux de croissance maximal du grain		0,09	0,045
Plus grand multiplicateur de la feuille		0,783204*	0,65*
Plus important Facteur de surface foliaire (aMaxSlope)		17,163*	31,4*
Interception pour le calcul de la plus grande feuille (aMaxIntercept)		-71,354*	-256*

* : Paramètres calculés à partir des données observées. H : Heure ; °Cj : degré jour

La Figure 11B illustre la concordance entre le nombre de feuilles simulé et observé et la dynamique de l'indice de surface foliaire (LAI) avec un RMSE de 8 et 3,1 pour le nombre total de feuilles de CSM63E et CSM335 respectivement et de 0,3 pour le LAI de CSM335.

En général, le modèle a simulé de manière assez satisfaisante le développement de la surface foliaire totale (Figure 11C). En ce qui concerne le rendement en biomasse, le modèle a bien fonctionné dans une gamme de mesures et a démontré certaines valeurs estimées en deçà ou au-dessus de la ligne 1 : 1 respectivement pour CSM63E et CSM335. Bien que cela reflète la prédiction du nombre total de feuilles, en particulier pour CSM335, le coefficient de détermination (R^2) a dépassé 0,90 pour les deux variétés. Le RMSE pour la biomasse de CSM63E et CSM335 étaient respectivement de 2303 et 1959 kg.ha⁻¹, soit 28 % et 17 % du rendement de biomasse moyen observé sur les sites d'étude.

Dans l'ensemble, la distribution des données de rendement en grains autour de la ligne 1 : 1 indique qu'il existe un accord entre le rendement observé et le rendement simulé (Figure 11D). Le modèle prédit le rendement en grains de CSM63E et CSM335 avec un RSME de 646 et 858 kg.ha⁻¹ respectivement.



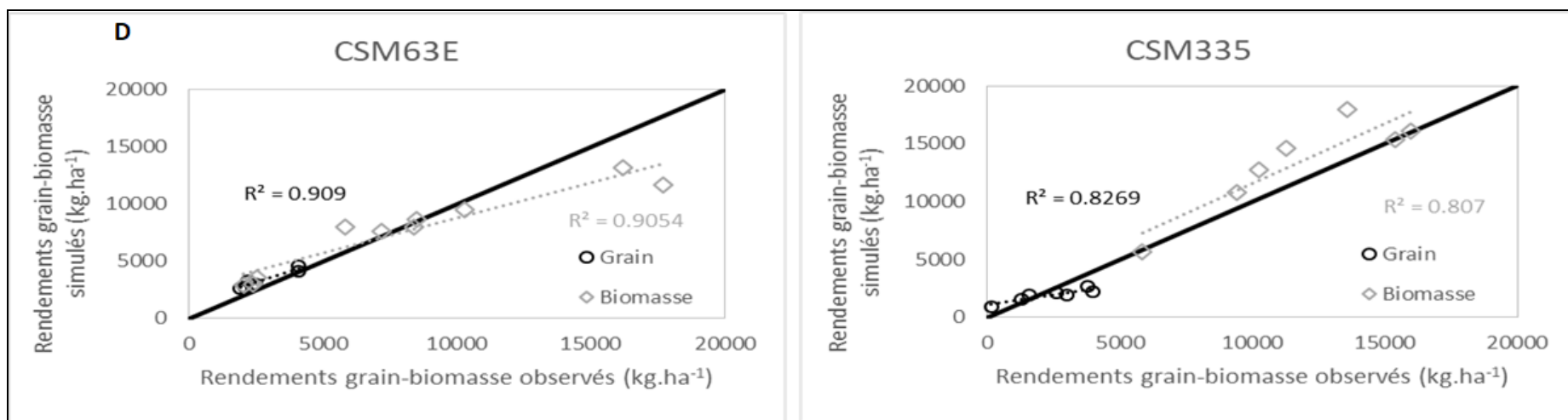
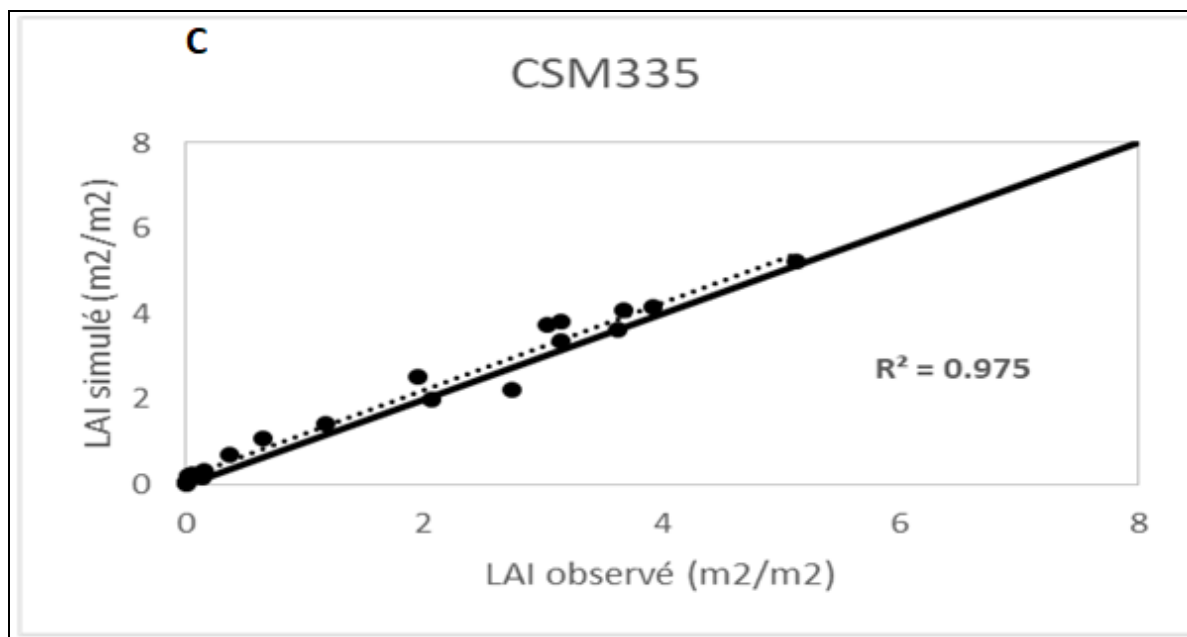
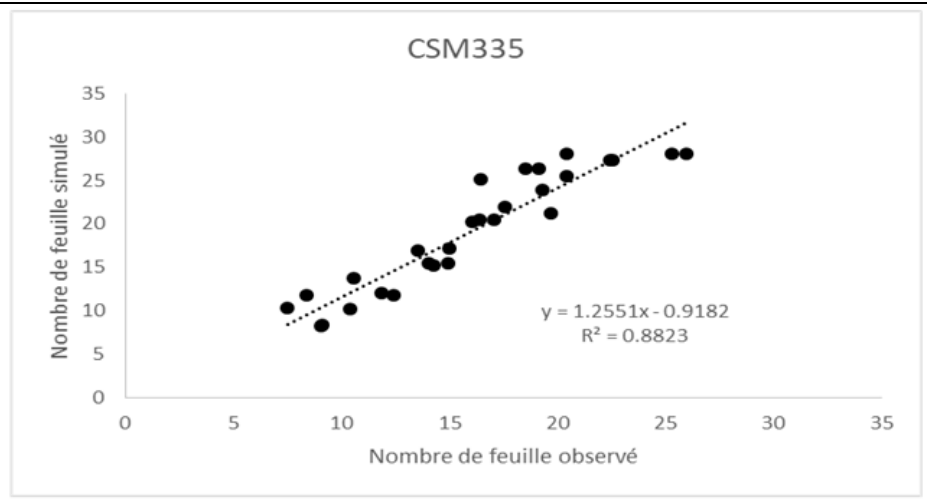
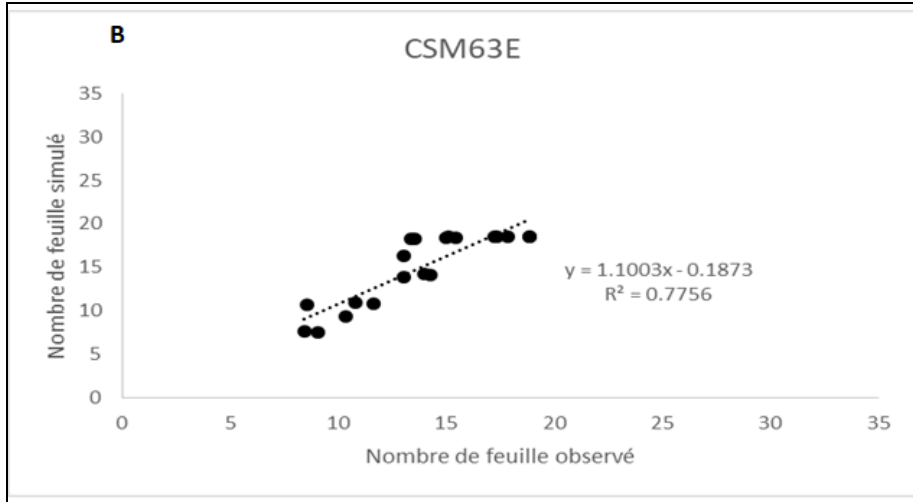
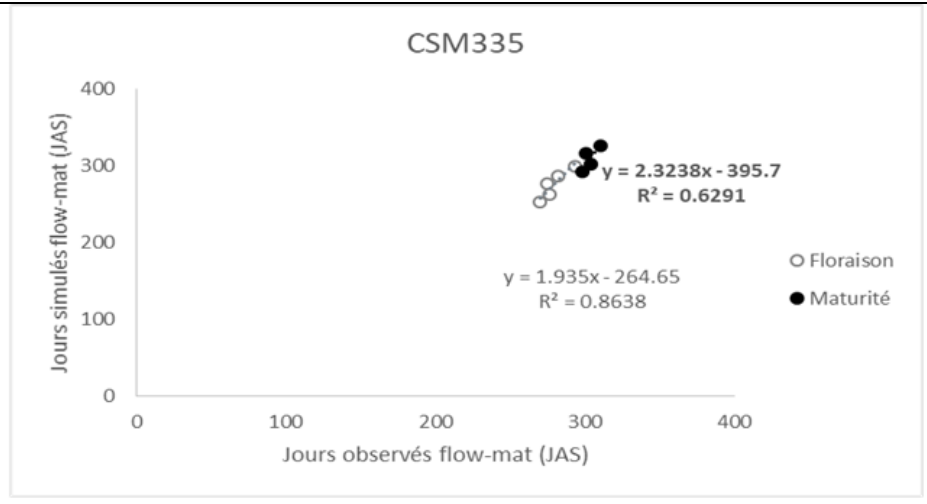
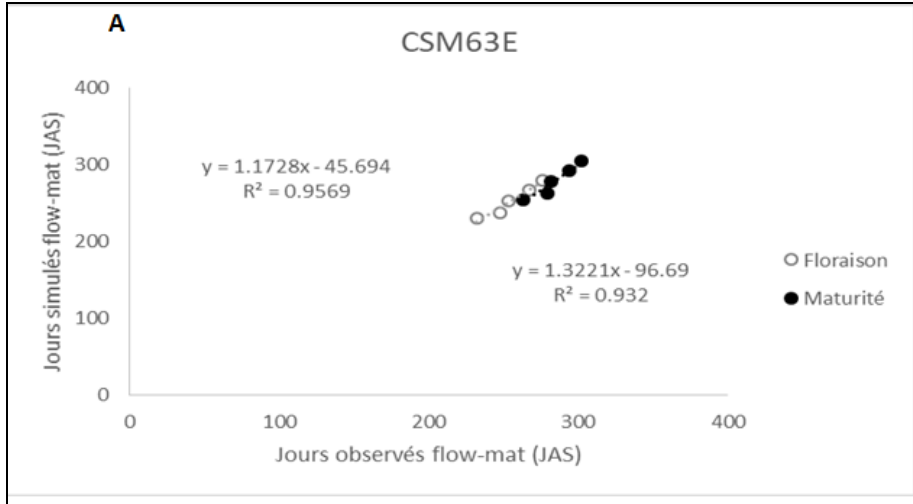


Figure 11 : Comparaison des données simulées et observées pour les deux variétés de sorgho

3.1.2 Validation du modèle

Le modèle de sorgho dans APSIM a été testé pour sa capacité à prédire de manière concluante la durée de croissance, la biomasse totale et le rendement en grains de CSM63E et CSM335, en utilisant un ensemble de données provenant de deux essais réalisés en 2013 et 2014 à l'ICRISAT Bamako, au Mali. L'essai mené en 2013 a été planté en trois dates différentes : le 14 juin, le 9 juillet et le 5 août, tandis que celui de 2014 avait été semé en deux dates différentes : le 23 juin et le 22 juillet. La Figure 12 montre une corrélation entre les jours simulés et observés du semis à la floraison (avec RMSE = 5 pour CSM63E et 10 pour CSM335), du nombre de jours du semis à la maturité (avec RMSE = 8 pour CSM63E et 11 pour CSM335) (Figure 12A), du nombre de feuilles (avec RMSE = 2 pour CSM63E et 6 pour CSM335) (Figure 12B), de l'indice de surface foliaire (avec RMSE = 0,7 pour CSM63E et 0,9 pour CSM335) (Figure 12C), du rendement en grains (avec RMSE = 2154 pour CSM63E et 2429 pour CSM335) et du rendement en biomasse (avec RMSE = 1510 pour CSM63E et 7188 pour CSM335) (Figure 12D). En général, le modèle a simulé les nombres de jours semis - floraison pour les deux variétés avec un R^2 supérieur à 0,85. La prédiction du nombre total de feuilles et du LAI par le modèle était satisfaisante avec un R^2 de 0,78 et 0,71 pour CSM63E et de 0,88 et 0,64 pour CSM335.



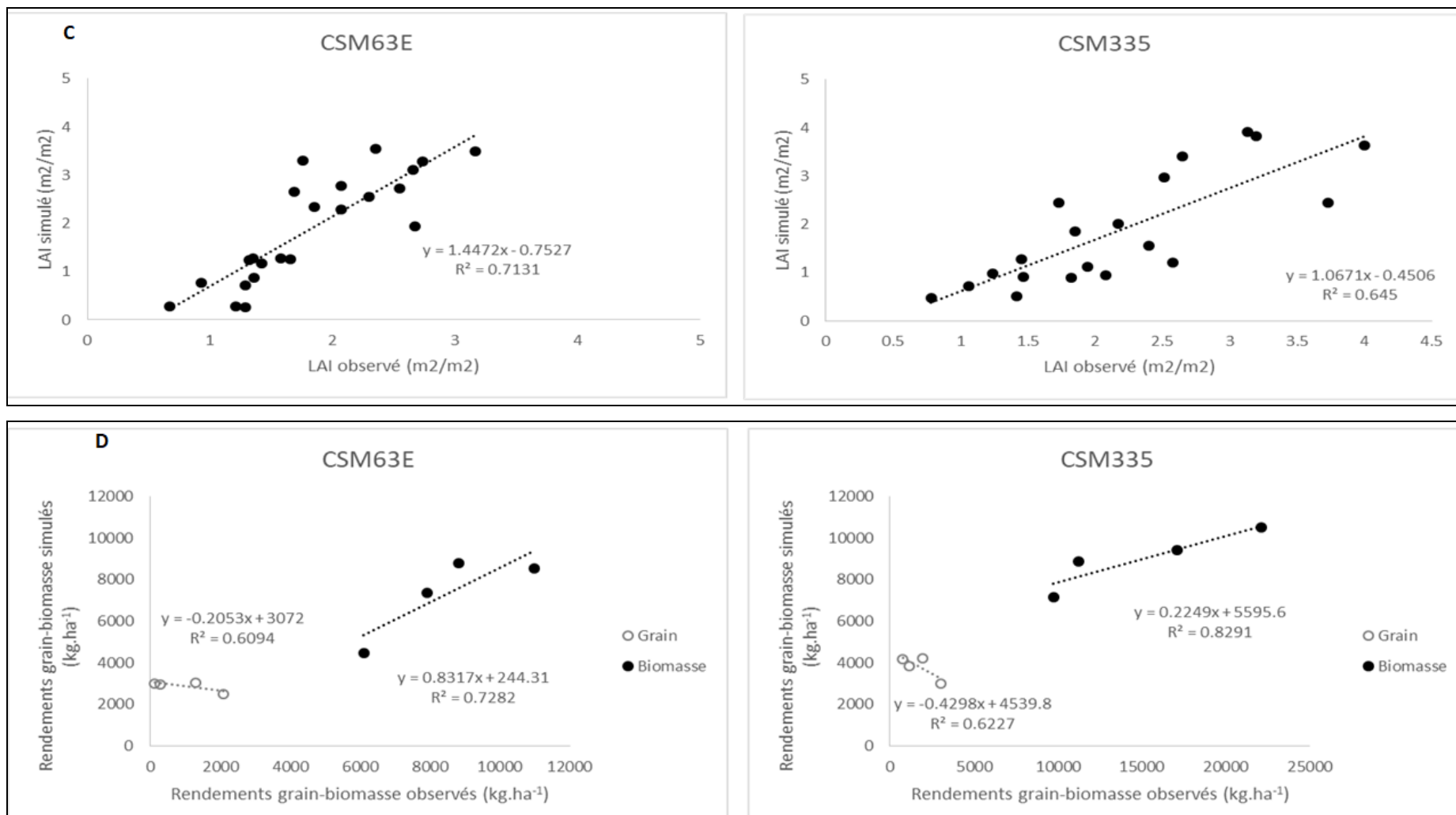


Figure 12 : Évaluation de la performance du modèle

Une bonne corrélation a également été observée entre le rendement en biomasse simulé et observé, malgré le faible nombre de points de données issus des mesures sur le terrain. En revanche, les données de rendement en grains observées et prédites ne se correspondaient pas, peut-être en raison des faibles valeurs observées rapportées en particulier pour CSM63E.

3.1.3 Types de stress hydriques identifiés

Les simulations réalisées ont révélé tous les scénarios de déficit hydrique rencontrés par les deux variétés sur les 22 sites et les 1080 années étudiés (Figure 13).

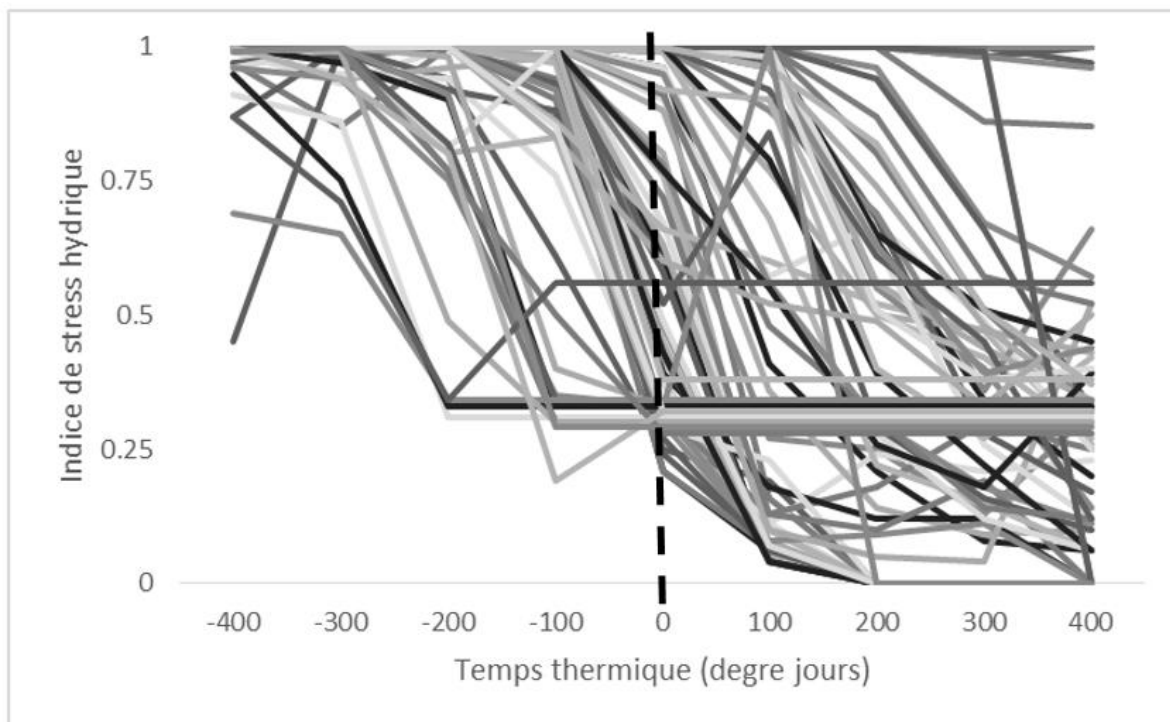


Figure 13 : Scénarios de stress hydrique identifiés pour chaque année simulée sur les 22 sites d'étude pour les variétés CSM63E et CSM335

L'analyse de groupement et de classification de tous ces scénarios de stress nous a permis d'identifier trois principaux types de stress (Figure 14) dans notre zone d'étude parmi lesquels, deux ont un caractère terminal. Le premier type de stress (Type1) dénommé « Pas de stress hydrique » pour les deux variétés pourrait être décrit comme une condition où les plantes n'ont pas ou ont connu une très courte période de stress hydrique.

Le deuxième type de stress appelé (Type2) « Stress hydrique précoce pendant la préfloraison » représente les conditions où le stress hydrique commence autour de 300°Cd avant la floraison pour CSM63E et en début de cycle pour CSM335 et continue jusqu'à la fin de la période de croissance. Le troisième type (Type3) défini comme « Stress hydrique pendant la

floraison » pour les deux variétés commence vers 0°Cd, ce qui correspond à la période de floraison et se poursuit jusqu'à la maturité physiologique.

Pour les deux variétés étudiées, le type de stress hydrique dominant était le Type1 avec une fréquence d'occurrence de 83 % et 73 % respectivement pour CSM63E et CSM335, suivi du Type2 avec une fréquence de 9 % pour CSM63E et 19 % pour CSM335 et enfin du Type3 qui est le moins dominant avec une fréquence de 8 % et 9 %, respectivement pour CSM63E et CSM335 (Figure 14).

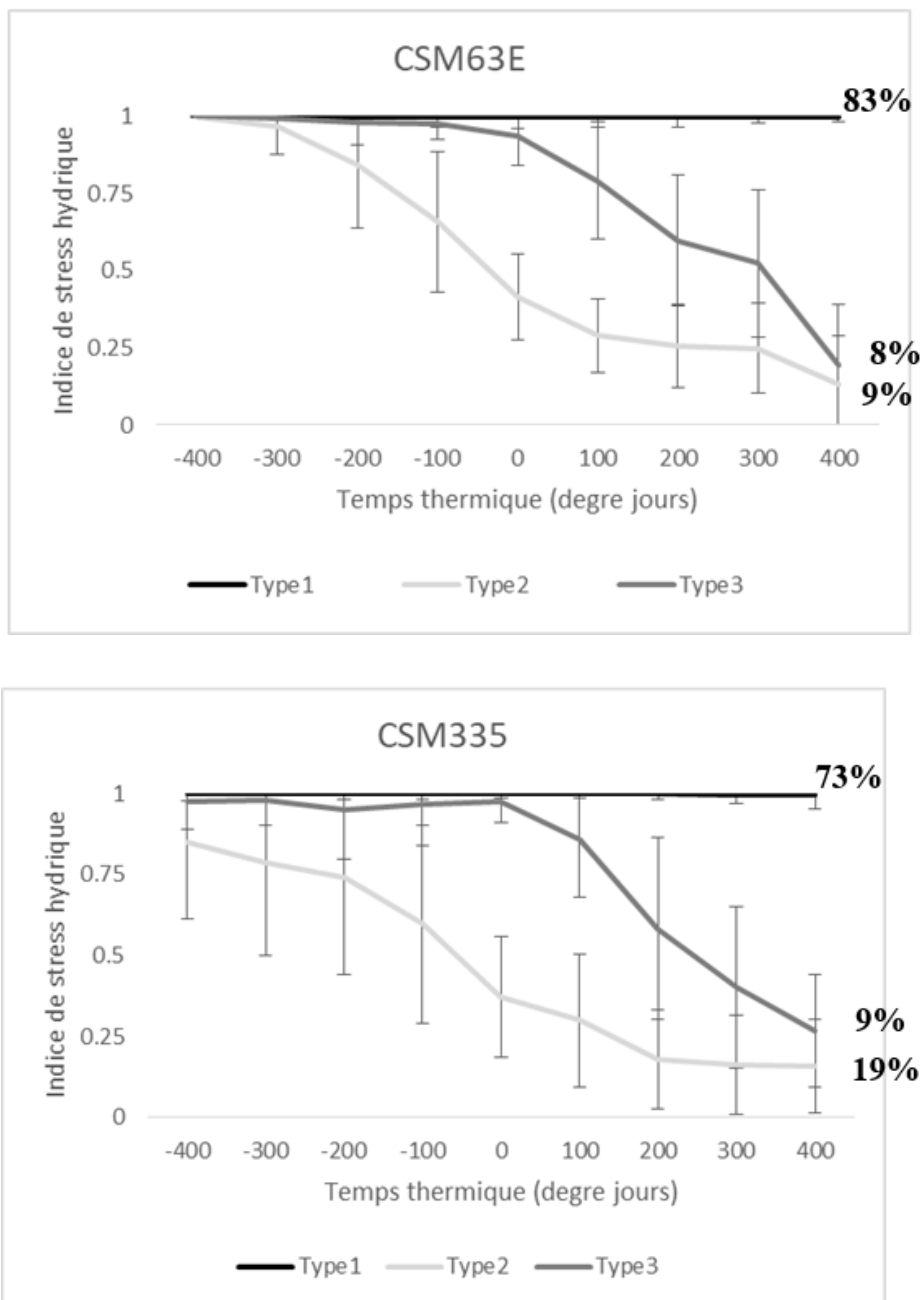


Figure 14 : Principaux types de stress hydrique identifiés pour les deux variétés

3.1.4 Fréquence d'occurrence des principaux types de stress hydrique à travers les isohyètes

La Figure 15 montre les scénarios de stress hydrique de Type1 (A), Type2 (B) et Type3 (C) par isohyète, pour CSM335 et CSM63E. Parmi les trois scénarios de stress hydrique identifiés, seul le Type1 a été observé dans les cinq isohyètes. Tous les trois scénarios ont été observés dans la région extrême Nord caractérisée par une faible pluviosité combinée à de pauvres sols sableux, peu fertiles avec une faible capacité de rétention d'eau. Dans cette région, la fréquence d'apparition du stress hydrique Type3 est plus élevée pour CMS63E 32 % par rapport à CSM335 20 %. Il y a 75 % de chance d'avoir un stress hydrique de Type2 avec CSM335 dans cette même région. Pour les deux variétés, le stress hydrique de Type3 ne s'est pas produit dans la région extrême Sud où la pluviométrie moyenne annuelle est plus élevée et le Type2 n'a pas été observé pour CSM335 mais est marginalement présent pour CSM63E (0,4 %). Avec CSM63E, le Type2 n'a pas été observé dans les régions centrales considérées comme la principale zone de production du sorgho (600 - 1000 mm) (Figure 15, Tableau 7).

Tableau 7 : Fréquence d'occurrence (en pourcentage) des 3 scénarios de stress hydrique

Variétés	Scenarios de stress hydrique	Scénarios de stress hydrique				
		< 400	400 - 600	600 - 800	800 - 1000	> 1000
CSM335	1	4,84	61,07	98,95	98,75	1
	2	74,19	18,21	0,17	0,28	
	3	20,97	20,71	0,88	0,97	
CSM63E	1	25,81	90,36	99,823	99,03	99,62
	2	41,93	3,21	0	0	0,38
	3	32,26	6,43	0,17	0,97	

On constate une variation significative de la réponse des différentes variétés d'une isohyète à l'autre (Figure 15). Cependant, pour CSM335 et CSM63E, les trois scénarios de stress hydrique sont plus sévères dans l'isohyète < 400 mm comparée aux autres. Dans l'isohyète 600 – 800 mm et avec CSM63E, le Type3 tend à être un stress hydrique de post-floraison car il a commencé à 200°Cj après la floraison. De même, avec le génotype CSM335, le Type3 a commencé à 300°Cj après floraison dans la région 800 - 1000 mm et n'a pas récupéré jusqu'à la fin de la période observée. Dans cette même région et avec CSM335, le Type2 a commencé bien plus tard à -200°Cj avant la floraison par rapport aux autres régions où il a été observé. Avec CSM63E, le Type2 s'est produit plus précocement dans la région 800 - 1000 mm par

rapport aux autres régions, mais s'est légèrement rétabli de la floraison à la maturité physiologique.

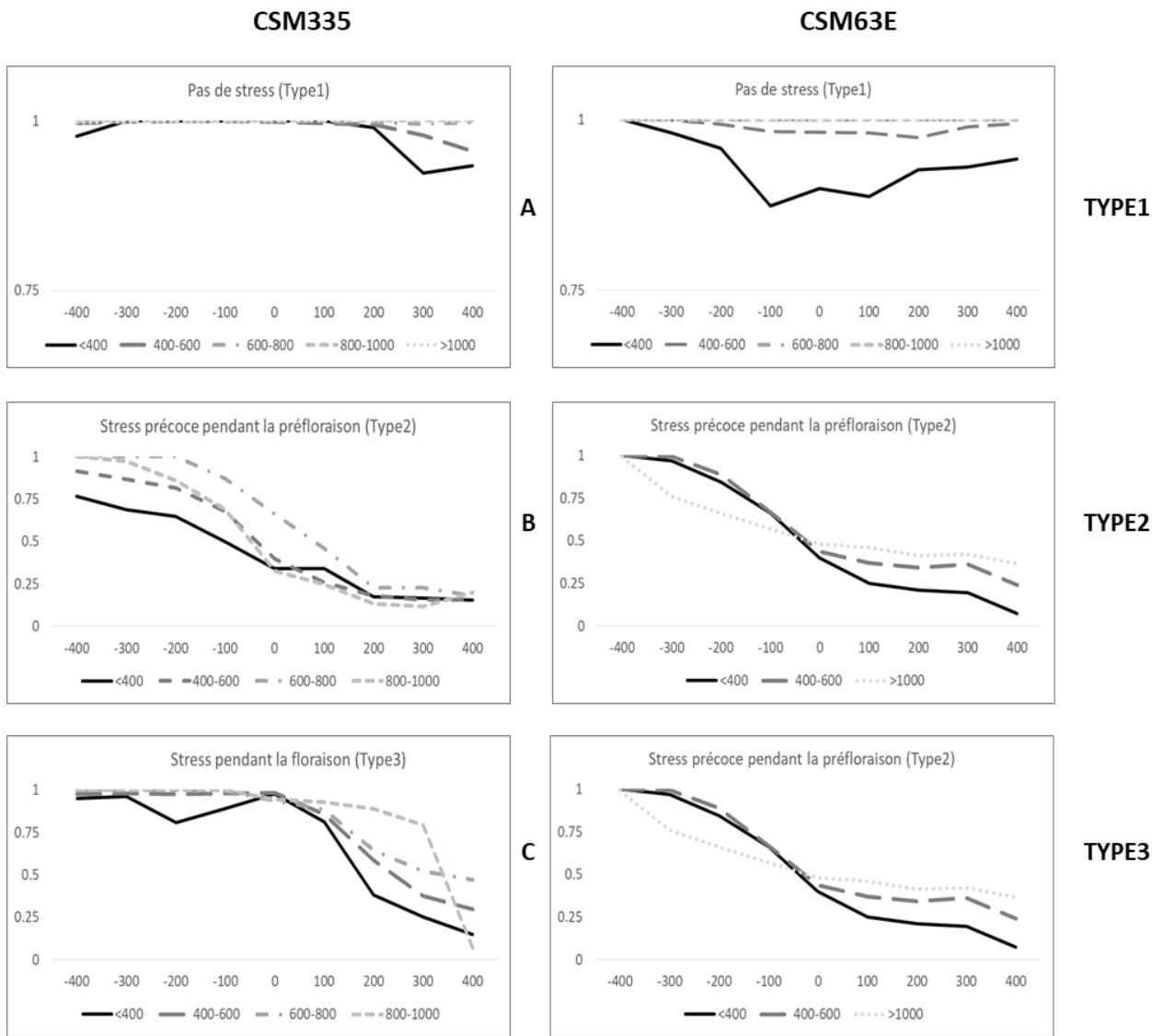


Figure 15 : Dynamique de chaque scénario de stress hydrique identifié à travers cinq isohyètes au Mali

3.1.5 Evolution des scenarios de stress hydrique à travers les saisons, sites et sols

La Figure 16 montre qu'une augmentation de 39 % de la capacité de rétention d'eau du sol (c'est-à-dire, remplacer le sol qui a une faible capacité de rétention d'eau par un sol qui a une capacité de rétention d'eau élevée) peut entraîner une disparition du stress hydrique de Type2 à Ségou, Samanko, Nioro et Mopti avec CSM335 et du stress hydrique de Type3 à Mopti, Kayes et Nioro avec CSM63E. L'augmentation de la capacité de rétention d'eau a également provoqué une réduction de la fréquence d'apparition du stress hydrique de Type2 dans l'isohyète < 400 mm au profit du Type3. La fréquence d'occurrence de ce dernier est passée de 19 % à 45 % pour CSM63E et de 3 % à 38 % pour CSM335.

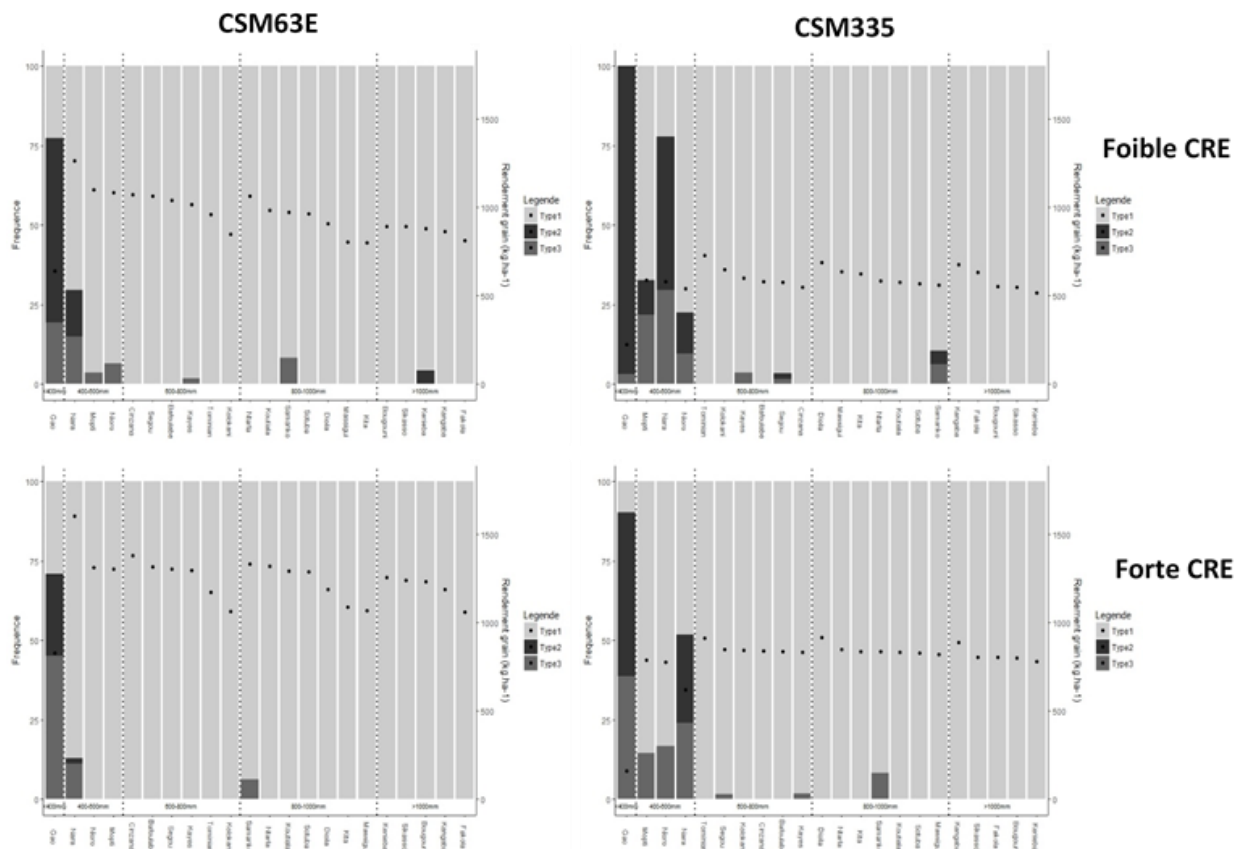


Figure 16 : Fréquence d'occurrence des 3 types de stress hydrique pour CSM63E et CSM335 sur le sol à faible et forte capacité de rétention d'eau (CRE).

*Les points représentent le rendement moyen en grain et les bars représentent la Fréquence d'occurrence des 3 types de stress hydrique. Sur l'axe des abscisses figurent les sites d'étude et les pointillés séparent les isohyètes (<400mm, 400-600mm, 600-800mm et >1000mm).

Les points représentent les rendements moyens par site pour les trois stress hydriques et les lignes en pointillés séparent les cinq isohyètes.

3.1.6 Rendement en grains

3.1.6.1 Variabilité du rendement grains par scenario de stress hydrique:

La différence de rendement moyen en grains est surtout significative entre variétés. Le rendement le plus élevé a été obtenu de loin avec CSM63E et sous tous les scénarios. Pour les deux variétés, le rendement moyen le plus élevé a été observé sous le Type1 : 1229 kg.ha⁻¹ et 806 kg.ha⁻¹ pour CSM63E et CSM335 respectivement (Figure 17). Le Type3 a montré le deuxième rendement le plus élevé pour CSM63E (1125 kg.ha⁻¹) et pour CSM335 (654 kg.ha⁻¹). Le rendement moyen le plus faible pour CSM63E (520 kg.ha⁻¹) et CSM335 (290 kg.ha⁻¹) a été observé sous le Type2. CSM335 a présenté une variabilité plus grande sous le Type2 que sous le Type3, tandis que CSM63E a présenté un comportement inverse (Figure 17).

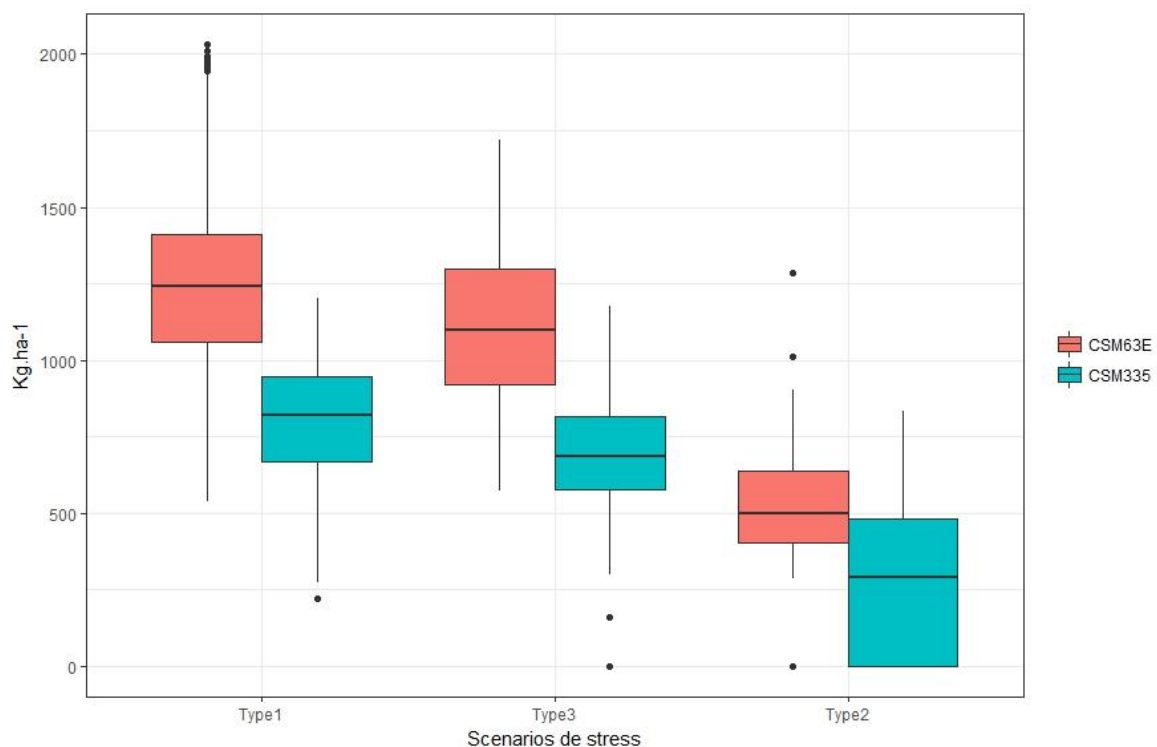
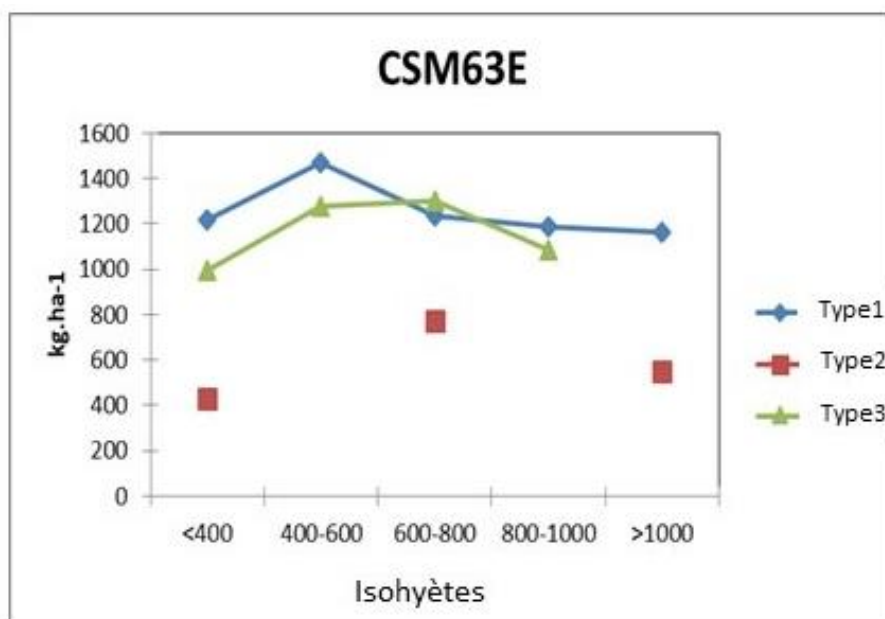


Figure 17 : Distribution des rendements en grains simulés à travers les scénarios de stress hydrique

3.1.6.2 Variabilité du rendement en grains à travers les isohyètes

L'effet du déficit hydrique sur le rendement a été observé dans toutes les isohyètes (Figure 18). Pour CSM63E et CSM335, le rendement le plus élevé a été observé sous le Type1 dans

toutes les isohyètes sauf dans l'isohyète 600-800 mm où le plus haut rendement a été observé avec CSM63E sous le Type3. Le rendement moyen le plus faible a été observé sous le Type2 dans la région extrême Nord pour CSM63E (430 kg.ha⁻¹) et dans l'isohyète Sud 800-1000 mm pour CSM335 (113 kg.ha⁻¹) (Figure 18). Même si CSM335 n'a été exposé à aucun type de stress hydrique sévère (Type 2 et 3) dans l'isohyète située à l'extrême Sud du pays (> 1000 mm), probablement en raison de l'abondance des précipitations, le rendement le plus élevé n'a pas été observé dans cette région. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le principal facteur limitant la production du sorgho n'est peut-être pas la sécheresse dans cette région. Cela pourrait aussi s'expliquer par d'autres facteurs limitants qui ne sont pas pris en compte par le modèle notamment les facteurs biotiques.



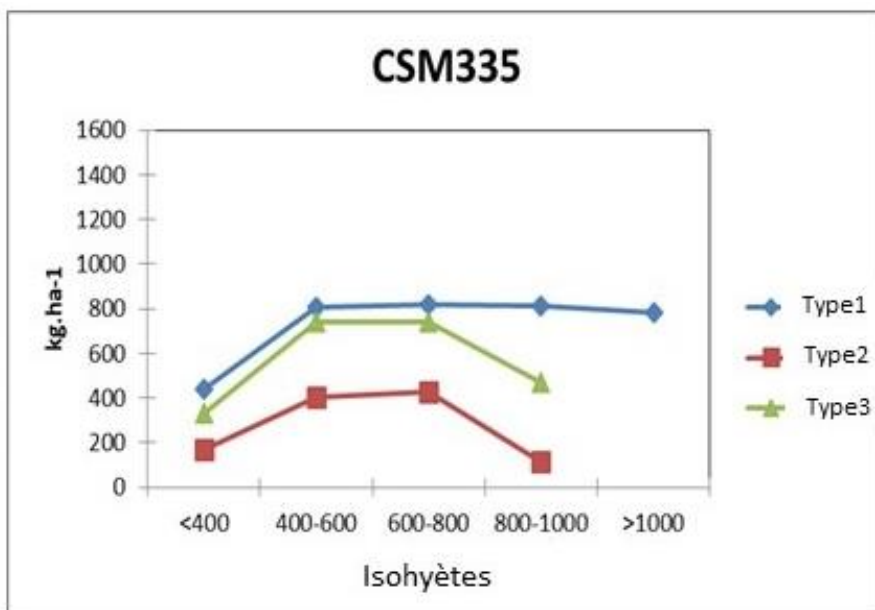


Figure 18 : Rendement moyen en grains, simulé à travers les isohyètes

3.1.6.3 Variabilité du rendement en grain à travers les sites et les sols

Une augmentation de 39 % de la capacité de rétention d'eau du sol (CRE) a entraîné une augmentation d'environ 50 % du rendement en grains (Figure 16) à Cinzana, Samanko et Kéniéba, tandis qu'elle a entraîné une perte de rendement de 29 % à Gao avec CSM335. Comparativement, l'augmentation de CRE a eu plus d'effet sur le rendement de CSM63E dans les régions du Sud que dans les régions du Nord. Par exemple, à Kéniéba, on a observé une augmentation d'environ 43 % du rendement de la variété CSM63E cultivée sur un sol à CRE plus élevée. La variabilité interzonale du rendement moyen en grains est plus élevée pour CSM63E par rapport à CSM335 même si les rendements les plus élevés ont été observés avec cette variété. Le rendement moyen de la variété CSM335 a tendance à être plus stable lorsque la variété est cultivée sur un sol à CRE plus élevée.

3.2 Modélisation de l'interaction G x E x M pour identifier les meilleures pratiques susceptibles d'avoir un impact significatif sur les scénarios de déficit hydrique et les rendements du sorgho au Mali

3.2.1 Dates de semis

Le Tableau 8 compare les fenêtres de semis simulant le rendement moyen maximum réalisable (SD3) par site avec les fenêtres de semis sélectionnées par le modèle dans l'activité précédente (SD1) et celles observées dans les champs paysans ou définies par des experts

(SD2). En règle générale, parmi les trois séries de fenêtres de semis, celles qui ont donné le rendement le plus élevé sont celles qui ont été réalisées tôt (SD3) pendant la saison de croissance, cela sur la plupart des sites. De plus, il y avait une similitude entre les fenêtres de semis observées (SD2) et simulées (SD3) à Mopti, Nioro, Bafoulabé, Ntarla, Dioila et Sotuba. Les fenêtres de semis simulées dans l'activité précédente (SD1) chevauchaient celles observées dans les champs paysans (SD1) dans la plupart des régions du Nord (Gao, Nara, Mopti, Nioro) mais également dans certaines régions du Centre du pays (Koutiala, Samanko). Les dates de semis observées dans les champs des agriculteurs couvraient une période plus large par rapport à SD1 et SD3 et cette période s'élargissait vers la région Sud où les fenêtres étaient définies selon les connaissances expertes.

Tableau 8 : Comparaison des trois dates de semis étudiées par isohyète

Zones	Isohyètes	Sites	Fenêtre de semis 1 (étude précédente)	Fenêtre de semis 2 (observation sur le terrain ou expert)	Fenêtre de semis 3 (rendement le plus élevé)	
					Faible CRE	Forte CRE
Zone Nord	<400	Gao	1Juin -15Juil	30Jun-24Jul	5Mai-15Mai	5Mai-15Mai
		Nara	1Juin -15Juil	30Jun-24Jul	5Mai-15Mai	15Mai-25Mai
	400-600	Mopti	1Juin -15Juil	30Jun-24Jul	5Mai-15Mai	24Juin-4Juil
		Nioro	1Juin -15Juil	30Jun-24Jul	25Mai-4Juin	24Juin-4Juil
Zone Centrale	600-800	Kayes	1Juin -15Juil	10Jul-2Aug	14Juin-24Juin	14Juin-24Juin
		Ségou	1Juin -15Juil	10Jul-2Aug	5Mai-15Mai	14Juin-24Juin
		Cinzana	1Juin -15Juil	10Jul-2Aug	5Mai-15Mai	24Juin-4Juil
		Tominian	1Juin -15Juil	10Jul-2Aug	5Mai-15Mai	4Juin-14Juin
		Bafoulabé	1Juin -15Juil	31Mai-29Jun	4Juin-14Juin	4Juil-14Juil
		Kolokani	1Juin -15Juil	31Mai-29Jun	5Mai-15Mai	4Juin-14Juin
	800-1000	Ntarla	1Juin-15Juil	6Mai-20Aug	15Mai-25Mai	25Mai-4Juin
		Dioila	1Juin -15Juil	6Mai-20Aug	5Mai-15Mai	15Mai-25Mai
		Samanko	1Juin -15Juil	29Jun-26-Jul	5Mai-15Mai	25Mai-4Juin
		Koutiala	1Juin -15Juil	13Jun-30Jul	5Mai-15Mai	5Mai-15Mai
		Massigui	1Juin-15Juil	29Mai-20Aug	5Mai-15Mai	15Mai-25Mai
		Sotuba	1Juin -15Juil	6Mai-20Aug	5Mai-15Mai	5Mai-15Mai
		Kita	1Juin -15Juil	29Jun-26-Jul	5Mai-15Mai	15Mai-25Mai
Zone Sud	> 1000	Kangaba	1Juin -15Juil	29Mai-20Aug	5Mai-15Mai	15Mai-25Mai
		Fakola	1Juin -15Juil	29Mai-20Aug	5Mai-15Mai	5Mai-15Mai
		Kéniéba	1Juin -15Juil	29Mai-20Aug	5Mai-15Mai	5Mai-15Mai
		Bougouni	1Juin -15Juil	29Mai-20Aug	5Mai-15Mai	5Mai-15Mai
		Sikasso	1Juin -15Juil	29Mai-20Aug	5Mai-15Mai	5Mai-15Mai

3.2.1.1 Effets des dates de semis sur les scénarios de stress hydrique

Les trois principaux scénarios de stress hydrique identifiés dans l'activité précédente avec SD1 ont été comparés à ceux obtenus dans cette étude avec SD2 et SD3 (Figure 19). Dans cette étude, le type de stress hydrique dominant était le Type1 avec une fréquence d'occurrence de 73 %, 65 % et 82 % respectivement pour SD1, SD2 et SD3. Le stress hydrique de Type3 était le moins dominant avec 8 %, 11 % et 7 %, suivi du Type2 avec 20 %, 24 % et 11 % respectivement pour SD1, SD2 et SD3. Les Type2 et Type3 n'ont pas été observés dans la zone Sud (isohyète > 1000 mm) pour les trois séries de dates de semis.

Globalement, nous avons constaté que semer tôt peut être avantageux en termes de cycle, de rendement et de scénario sans stress hydrique (Type1).

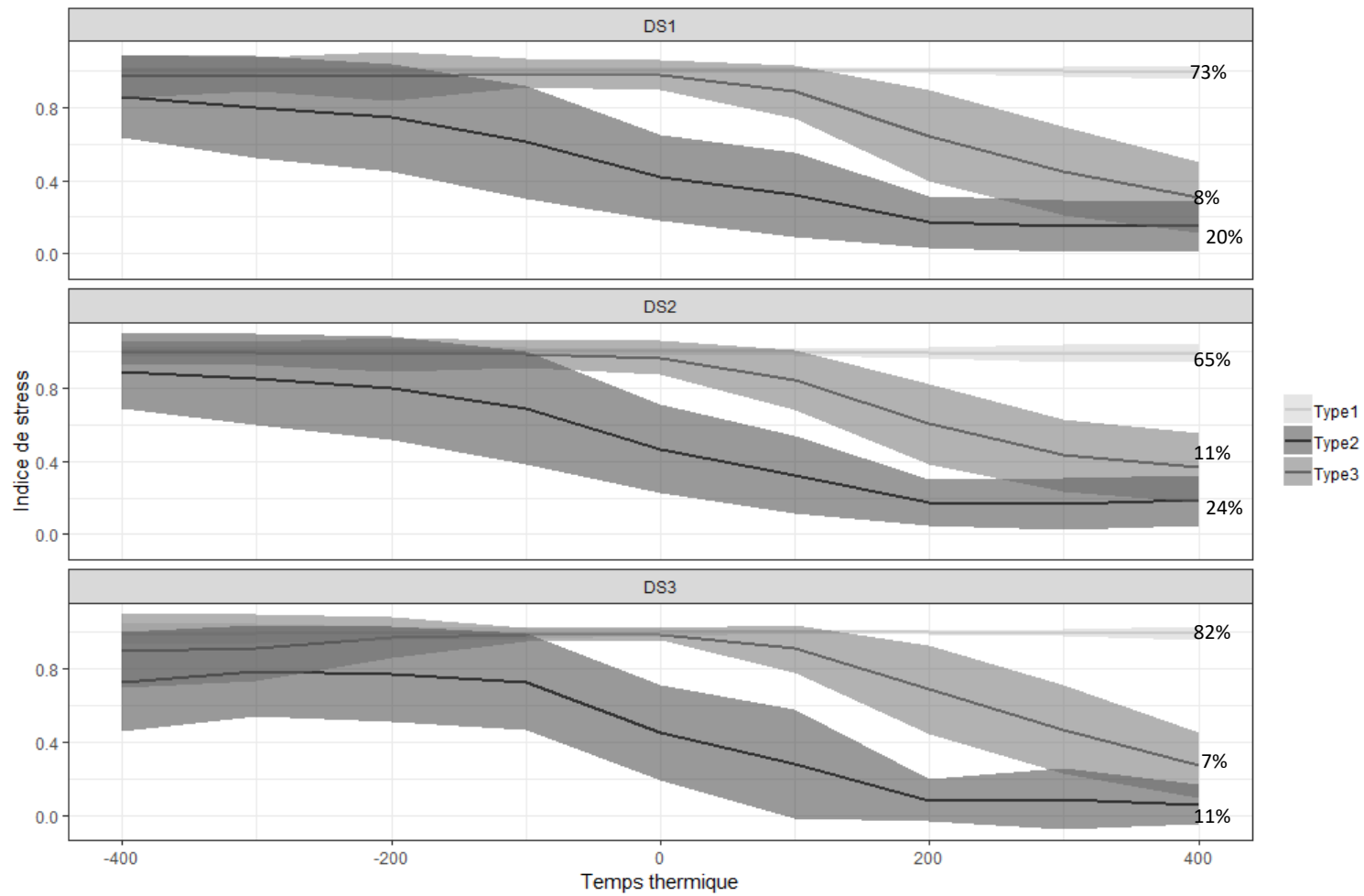


Figure 19 : Principaux scenarios de stress hydrique identifiés sous les 3 dates de semis

3.2.1.2 Effets des dates de semis sur le rendement en grains

De façon générale, le rendement moyen de SD3 était systématiquement supérieur à celui de SD1 et de SD2, sauf sous le stress hydrique de Type2 dans la zone sahélienne (isohyète < 400 mm) (Figure 20). Le stress hydrique de Type2 n'a pas été observé avec SD3 dans les isohyètes 400 -> 1000 mm. En l'absence de contrainte hydrique (Type1), le rendement en grains de CSM335 avait tendance à être stable dans les isohyètes 400 -> 1000 mm pour toutes les dates de semis (Figure 20). Le rendement moyen simulé en grains dans toutes les zones et pour toutes les années et semis s'étendaient de la perte de récolte avec SD2 dans la bande < 400 mm à 1025 kg.ha⁻¹ avec SD3 dans l'isohyète 800 - 1000 mm (ces données n'ont pas été présentées).

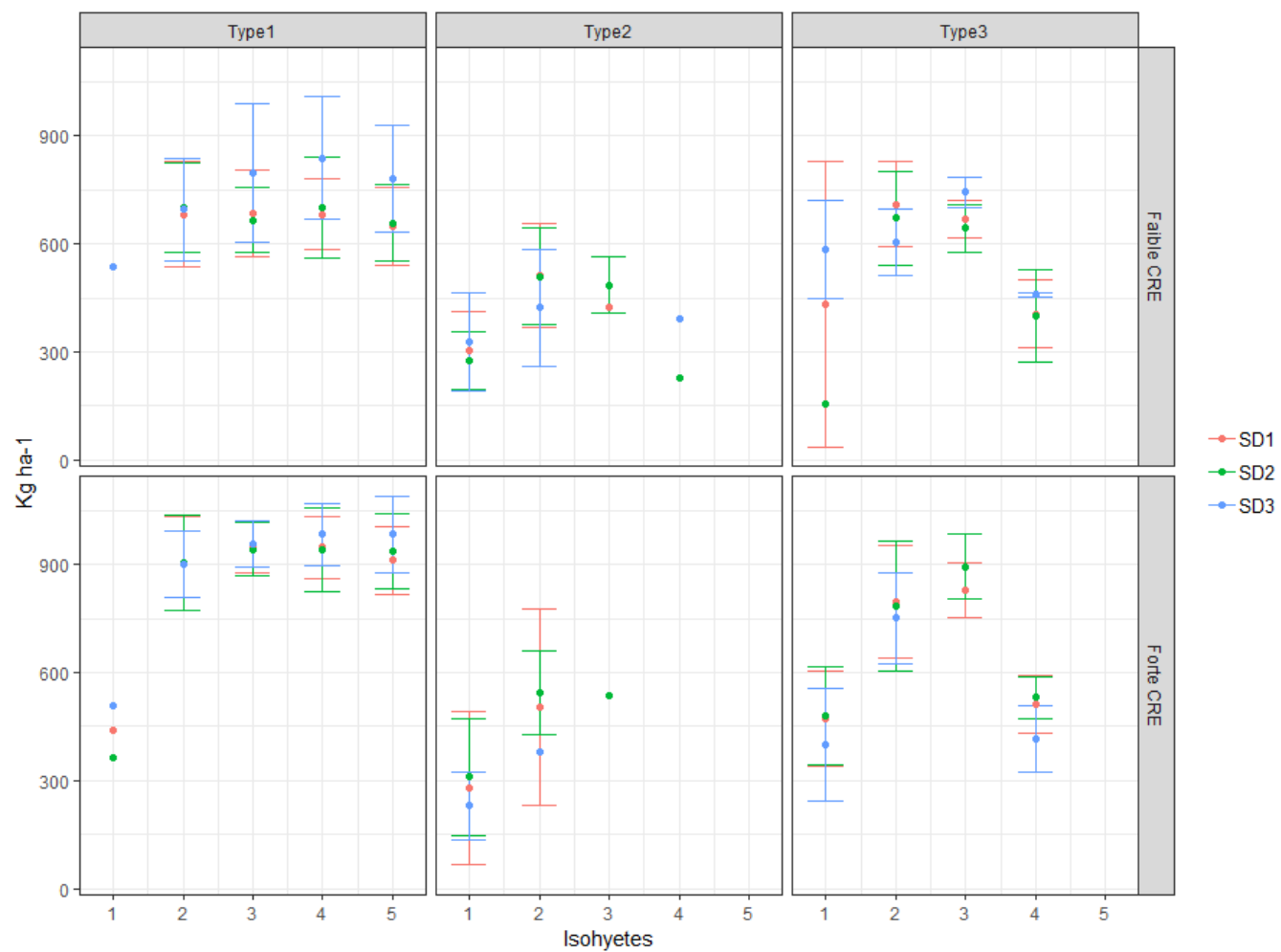


Figure 20 : Rendements moyens de trois séries de dates de semis présentés par type de stress hydrique, par type de sol (Faible CRE et Forte CRE) et pour chaque isohyète

3.2.2 Utilisation des engrais

3.2.2.1 Effets de la dose d'engrais sur les scénarios de stress hydrique

La Figure 21 montre la trajectoire du stress hydrique de Type1, Type2 et Type3 pour les niveaux de fertilisation F1 (0 et 0 kg.ha⁻¹), F2 (0 et 50 kg.ha⁻¹), F3 (50 et 25 kg.ha⁻¹) et F4 (100 et 50 kg.ha⁻¹) pour CSM335. Il est observé que le scénario Type1 se produisait plus fréquemment que les stress hydriques de Type2 et Type3 avec 88 %, 73 %, 75 % et 65 % respectivement pour F1, F2, F3 et F4. Le deuxième stress hydrique dominant était le Type2 avec 8 %, 21 %, 19 % et 26 %, suivi du Type3 avec 4 %, 7 %, 6 % et 9 % respectivement pour F1, F2, F3 et F4. Dans l'ensemble, il a été observé que F4 qui est la fertilisation recommandée par la recherche, augmentait la fréquence d'apparition des Type2 et Type3, alors qu'il diminuait l'occurrence du stress hydrique de Type1.

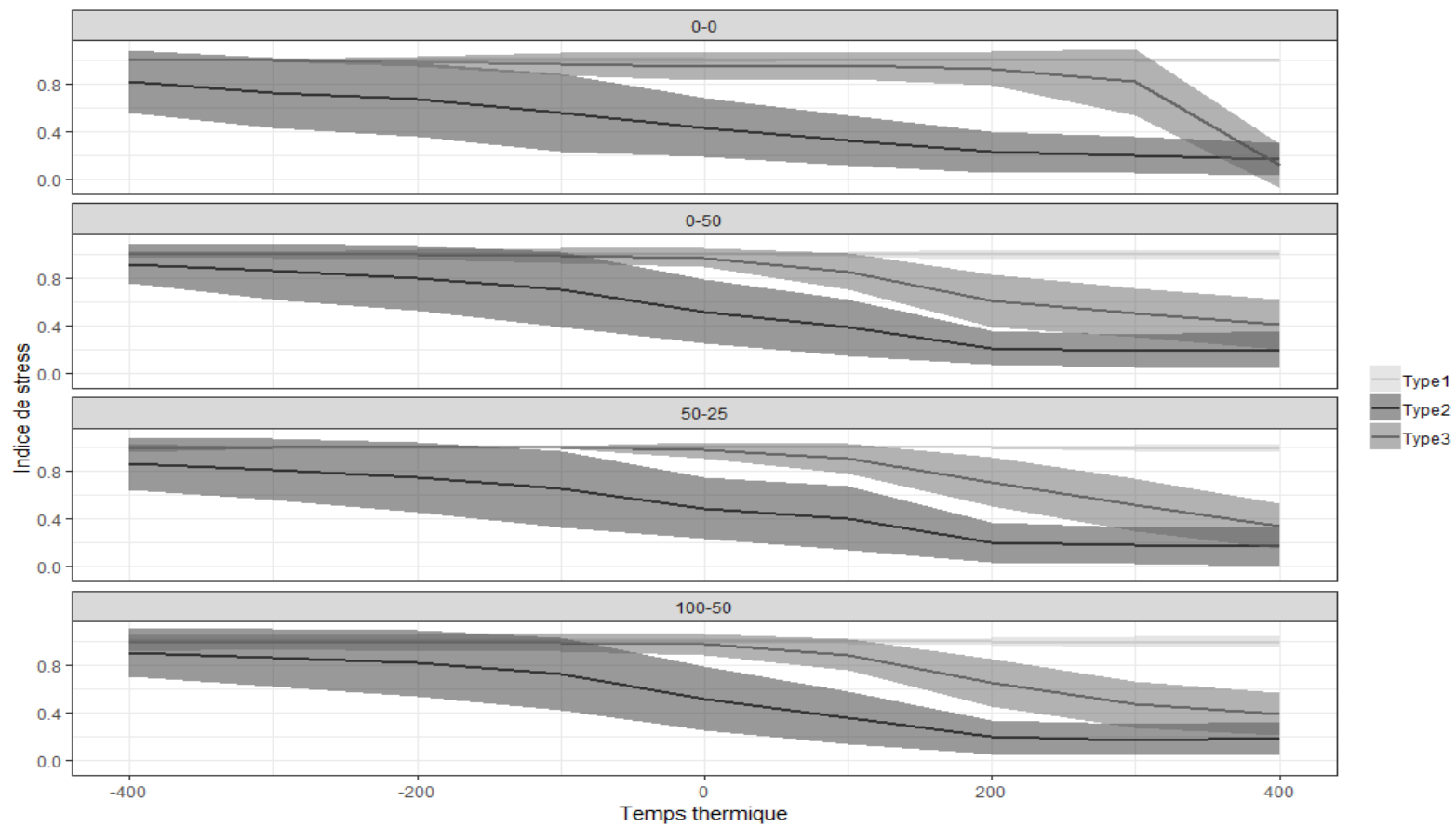


Figure 21 : Fréquence d'occurrence des 3 scénarios de stress hydrique sous les 4 doses d'application d'engrais

Il a été constaté que l'augmentation de la dose d'engrais augmentait la fréquence d'occurrence des stress hydrique de Type2 et Type3 sur presque tous les sites situés au Nord du pays (isohyètes < 400 - 600 mm), alors qu'il suscite leur disparition à Kita, Massigui et Fakola dans des isohyètes > 800 mm (Figure 22). À Nara et à Gao, dans les isohyètes < 600 mm, l'application de l'engrais recommandé (F4) a augmenté l'apparition du stress hydrique de Type2 de 75 % à 89 % par rapport au traitement sans engrais (F1- de 9 % et 37 %).

En général, l'augmentation de la quantité d'azote augmentait la fréquence des scénarios de stress hydrique, en particulier dans les isohyètes situées dans la zone Sahélienne. Dans les régions plus humides, zone Soudano-guinéenne, nous avons pu constater un effet positif de la fertilisation sur le stress hydrique.

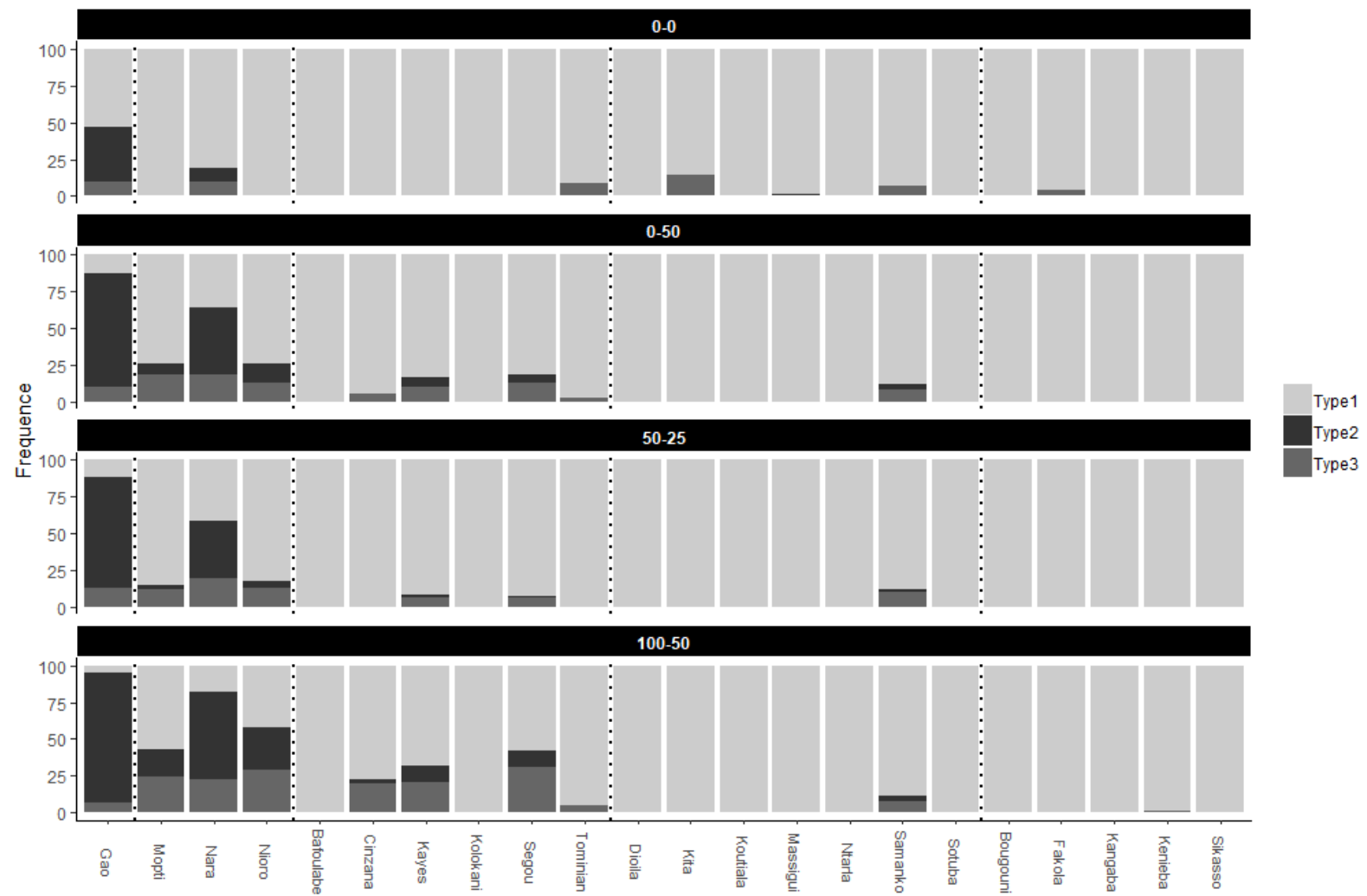


Figure 22 : Fréquence d'occurrence des 3 scénarios de stress hydrique par dose d'engrais étudiés

3.2.2.2 Effets de l'engrais sur le rendement en grains par scénario de stress hydrique

Les effets des niveaux d'engrais sur le rendement en grains ont été évalués par scénario de stress hydrique. Dans l'ensemble, l'application d'engrais a considérablement augmenté le rendement en grains du sorgho sous tous les scénarios de stress hydrique. Cependant, le rendement observé sous F2 (0 kg.ha⁻¹ et 50 kg.ha⁻¹) était systématiquement supérieur à celui observé sous F3 (50 kg.ha⁻¹ et 25 kg.ha⁻¹), qui est la moitié de la recommandation. Le rendement obtenu sous F4 (100 kg.ha⁻¹ et 50 kg.ha⁻¹) allait de la perte de récolte sous le stress hydrique de Type2 à 1211 kg.ha⁻¹ sous le stress hydrique de Type1, tandis que celui obtenu sous F1 (0 kg.ha⁻¹) allait de la perte de récolte sous le stress hydrique de Type2 à 575 kg.ha⁻¹ sous le stress hydrique de Type1. Sous le stress hydrique de Type2, les récoltes ont échoué dans environ 20 % des cas malgré l'application d'engrais. Et le double a été observé (40 %) sous F1 (0 et 0 kg.ha⁻¹) (Figure 23).

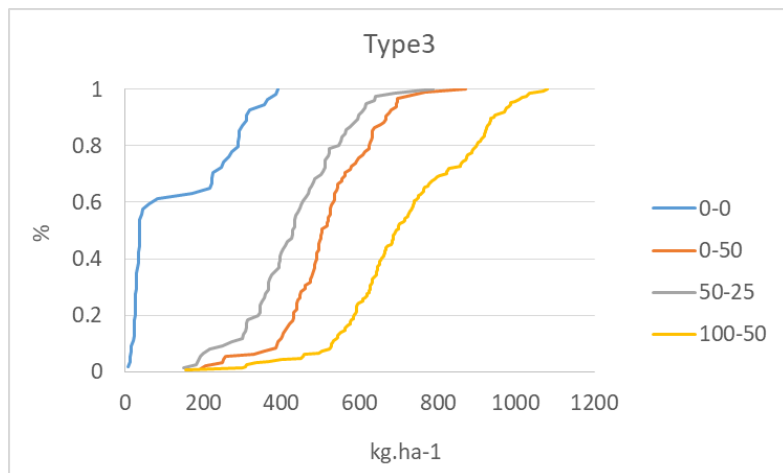
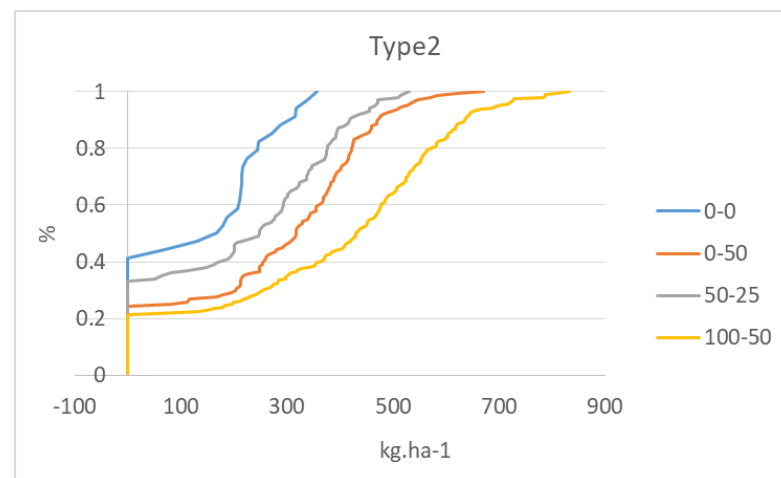
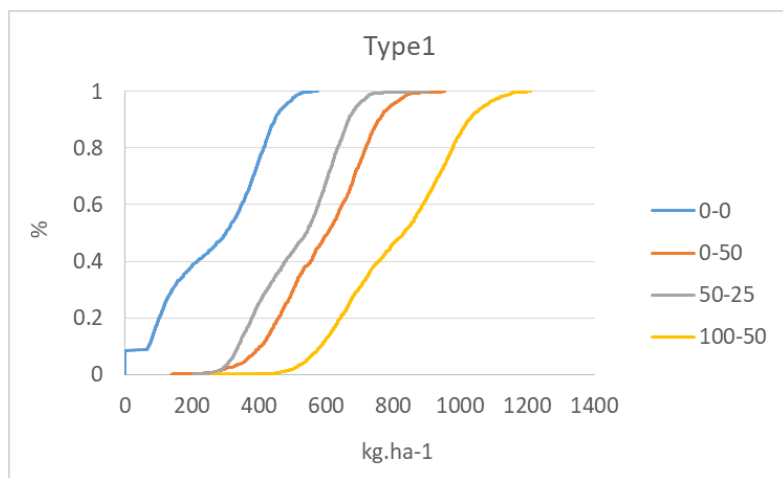


Figure 23 : Probabilité cumulative du rendement en grains de CSM335 par dose d'engrais et pour les 3 scénarios de stress hydrique

3.2.3 Densité de semis

3.2.3.1 Effets de la densité de semis sur les scénarios de stress hydrique pour chaque dose d'engrais

Une réduction de 50 % de la densité de semis initiale utilisée (5,7 plants.m⁻²) a entraîné une diminution de l'occurrence du stress hydrique de Type1 sous les niveaux d'engrais F1, F2 et F4 sur presque tous les sites et toutes les années (Tableau 9). En revanche, sous F3, la réduction de la densité de semis a entraîné une augmentation de l'incidence du stress hydrique de Type1 (de 75 % à 82 %) par rapport à la densité initiale (Tableau 9). Cela a également entraîné une diminution de l'occurrence du stress hydrique de Type2 sous tous les niveaux d'engrais excepté l'engrais recommandé (de 26 % pour la densité initiale à 31 % pour la densité minimale).

En outre, une augmentation de 50 % de la densité de semis initiale a entraîné une légère augmentation de la fréquence d'apparition du stress hydrique Type1 sous tous les niveaux d'engrais, sauf en l'absence d'engrais (F1) où elle a diminué par rapport à la densité initiale (de 88 % à 83 %). L'augmentation par 50 % de la densité de semis a également entraîné une diminution du stress hydrique de Type2 sous tous les dosages d'engrais, alors qu'il a augmenté la fréquence d'apparition du stress hydrique de Type3 sous tous les traitements (Tableau 9).

Tableau 9 : Comparaison de l'occurrence des types de stress hydrique (%) par dose d'engrais et par densité de semis

Fertilisation	Type1			Type2			Type3		
	SD1	SD2	SD3	SD1	SD2	SD3	SD1	SD2	SD3
	2,85	5,7	8,55	2,85	5,7	8,55	2,85	5,7	8,55
0 (F1)	73	88	83	7	8	4	20	4	13
0 et 50 (F2)	68	72	75	18	21	9	14	7	16
50 et 25 (F3)	82	75	78	16	19	9	2	6	13
100 et 50 (F4)	67	65	67	31	26	14	3	9	18

SD1,2, 3 = dates de semis 1,2,3.

Pour toutes les densités testées, l'application de la fertilisation recommandée a entraîné une augmentation de la fréquence d'occurrence du stress hydrique de Type2 (qui est le stress hydrique le plus sévère) dans les isohyètes < 600mm. Ceci était plus évident avec la densité minimale (-50 % de la densité initiale). Lorsque l'engrais n'était pas ou était appliqué à faible quantité (F1 et F2), la réduction de la densité de semis augmentait l'apparition du stress hydrique de Type3 dans presque toutes les isohyètes (Figure 24). A l'inverse, lorsque l'engrais était appliqué en début de saison (F3 et F4), la réduction de la densité entraînait une disparition des scénarios de stress hydrique de Type2 et Type3 et une augmentation concomitante de l'occurrence du stress hydrique de Type1 (Pas de stress hydrique) dans les isohyètes > 800 mm (Figure 24).

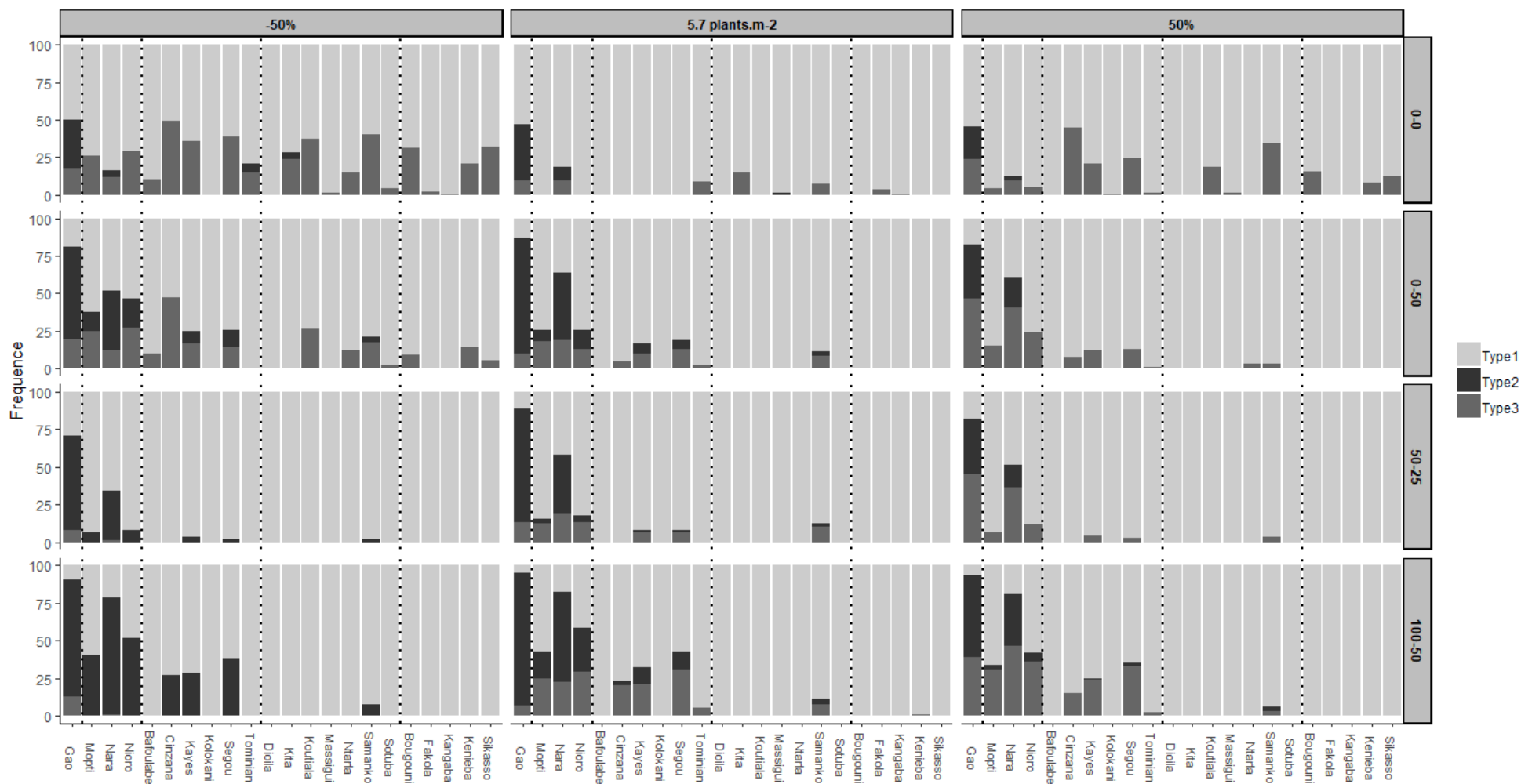


Figure 24 : Comparaison de l'occurrence des 3 scénarios de stress hydrique par site d'étude, pour chaque niveau d'engrais et pour les 3 densités de semis étudiées

L'augmentation de la densité de semis (+ 50 % de la densité initiale), entraînait une augmentation de la fréquence d'occurrence du stress hydrique de Type3 sur presque tous les sites étudiés sous le traitement F1 (0 kg.ha⁻¹) et uniquement sur les sites situés dans la zone Sahélienne (< 600 mm) sous F2, F3 et F4. À l'inverse, l'augmentation de la densité provoquait une diminution du stress hydrique de Type2 sous tous les traitements et dans toutes les isohyètes. En outre, une augmentation de la dose d'engrais et de la densité de semis entraînait une élimination de la plupart des scénarios de stress hydrique dans les isohyètes > 800 mm (Figure 24).

3.2.3.2 Effets de la densité de semis sur le rendement en grains du sorgho

Nos résultats ont également montré que le changement de la densité de semis entraînait une variation des rendements de sorgho par isohyète, par dose d'engrais et par scénario de stress hydrique (Figure 25). Le rendement en grains simulé avec la plus faible densité (2,85 plants.m⁻²) allait de la perte de récolte à 1275 kg.ha⁻¹, et cela était seulement de 64 kg.ha⁻¹ (soit 5 %) plus élevé que celui simulé avec la densité initiale (5,7 plants.m⁻²). De même, le rendement en grains simulé avec la forte densité testée 8,5 (plants.m⁻²) allait de la perte de récolte à 1307 kg.ha⁻¹, ce qui n'était que de 96 kg.ha⁻¹ (soit 7 %) supérieur au rendement de la densité initiale (données non présentées).

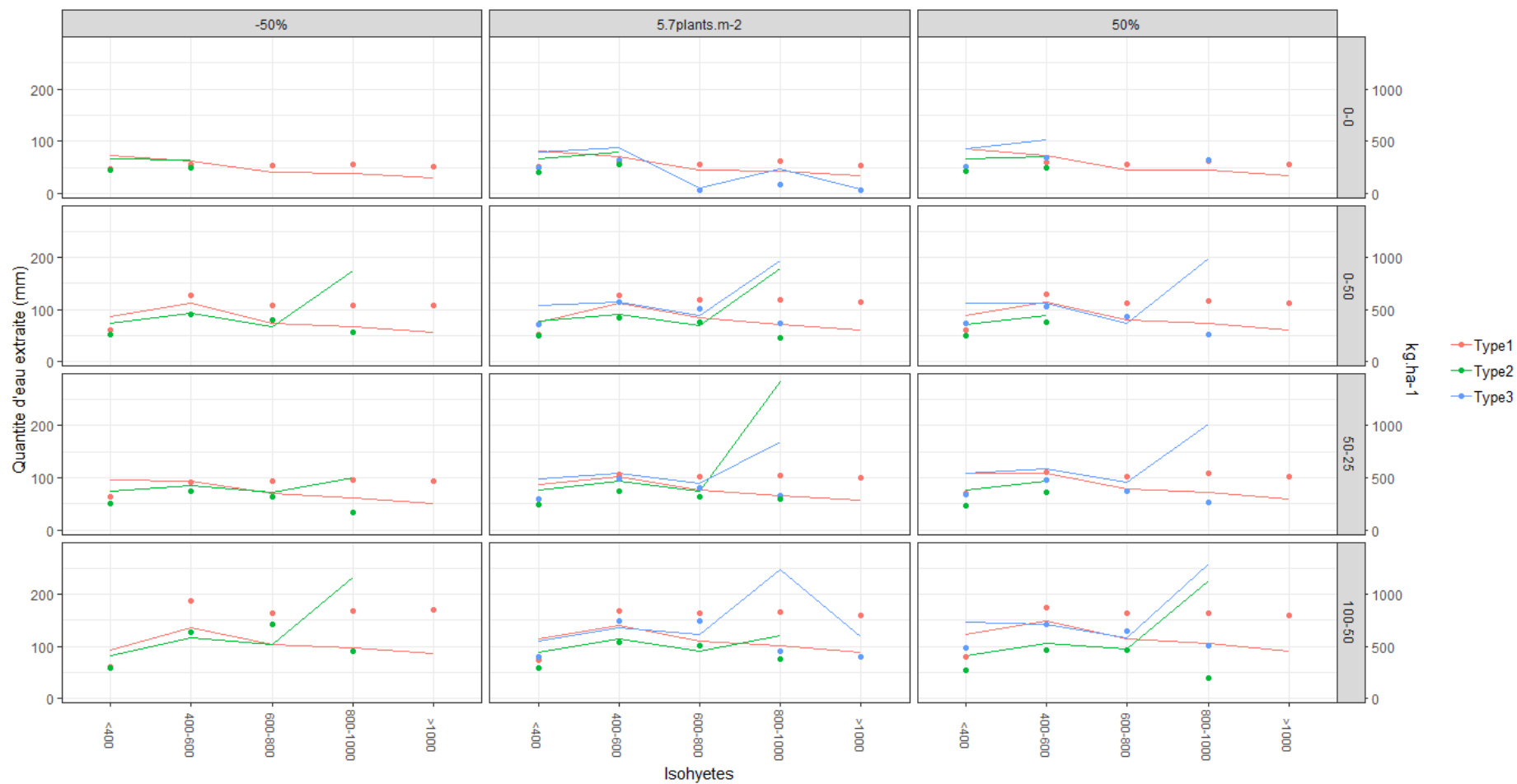


Figure 25 : Réponse du rendement en grains à différentes densités simulées par niveau d'engrais, par isohyète et scenario de stress hydrique. Les lignes représentent la quantité d'eau utilisée par les plantes pendant la saison

La réponse du rendement en grains aux trois densités de semis était similaire entre isohyètes mais différait selon la dose d'engrais (Figure 25). Dans l'ensemble, la diminution de la densité de semis combinée avec l'engrais recommandé entraînait une légère augmentation du rendement en grains. La variabilité de rendement la plus élevée a été observée dans l'isohyète 400 - 600 mm sous l'engrais recommandé pour les trois densités (Figure 25). En l'absence de stress hydrique (Type1), une densité plus élevée entraînait un rendement légèrement supérieur pour tous les traitements (Figure 25).

L'augmentation de la densité de semis combinée avec l'engrais recommandé avait un faible impact sur le rendement en grains dans toutes les isohyètes sauf dans l'isohyète 400 – 600 mm dans laquelle une augmentation allant jusqu'à 6 % avait été observée (Figure 25). Une faible densité de semis associée à l'engrais recommandé augmentait constamment le rendement en grains dans toutes les isohyètes sauf dans la bande < 400 mm où une perte de rendement pouvant atteindre 20 % a été observée (Figure 25). De même, la quantité d'eau utilisée par la plante dans cette isohyète (< 400 mm) était plus faible pour les trois densités testées par rapport aux autres isohyètes (Figure 25).

3.3 Evaluation des résultats de simulation de l'effet combiné de différentes pratiques culturales sur le sorgho par le modèle APSIM au Mali

3.3.1 Effets des dates de semis sur les rendements

La Figure 26 présente les rendements en grains (Figure 26A) et en biomasse (Figure 26B) des trois variétés évaluées à trois dates de semis : SD3 (1-juin) correspondant aux dates de semis précoce simulant les rendements les plus élevés dans l'activité 1 ; SD1 (29-juin) correspondant aux dates de semis sélectionnées par le modèle dans l'activité 2 ; SD2 (27-juillet) qui est la date de semis tardive correspond aux dates de semis observées dans les champs paysans ou définis par les experts.

De manière générale, les rendements en grains et en biomasse les plus élevés ont été observés avec la variété IS15401. Les rendements en grains et biomasse les moins élevés ont été observés avec CSM63E. En plus, on observe une décroissance des rendements du semis précoce (SD3) au semis tardif (SD2) pour toutes les variétés, d'environ 65 %, 78 % et 76 % respectivement pour les rendements en grains et en biomasse de CSM63E, CSM335 et IS15401.

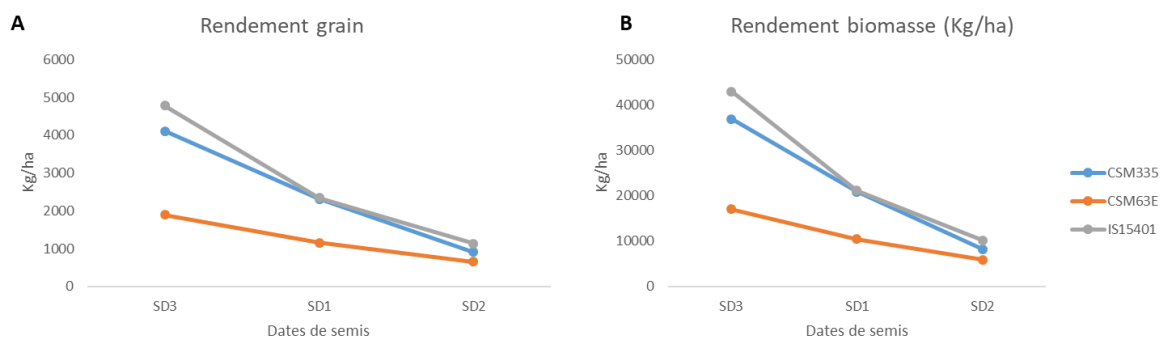


Figure 26 : Rendements en grains (A) et en biomasse (B) des 3 variétés semées à 3 dates de semis

3.3.2 Effets des différentes doses d'engrais sur les rendements

La Figure 27 présente l'effet des quatre niveaux de fertilisation testés sur les rendements en grains (Figure 27A) et en biomasse (Figure 27B) des trois variétés. Les rendements en grains et en biomasse les plus élevés ont été observés avec IS15401 qui est la variété tardive. C'est aussi la seule variété qui a montré une différence significative entre les rendements obtenus sous F1 et F4 et ceux obtenus sous F2 et F4 ($p < 0,001$). Les rendements les moins élevés ont été observés avec CSM63E. Les trois variétés ont montré une même tendance à une augmentation de rendement en réponse à l'augmentation de la dose d'engrais de F1 à F4. Cependant, une utilisation plus efficace de l'engrais apporté a été constatée sous F3 ce qui s'est traduit par une augmentation des rendements en grains de la fertilisation F2 à la fertilisation F3 $\leq 30\%$ pour les trois variétés. Par contre, de F3 à F4, un ralentissement de la réponse des variétés à l'augmentation de la dose d'engrais a été remarqué. Pour CSM63E en particulier, il n'y avait pas de différence significative entre les rendements obtenus sous F3 et F4 ($p = 0,9$). Ainsi pour les trois variétés, les rendements en grains ont augmenté de seulement 11 % de F3 à F4.

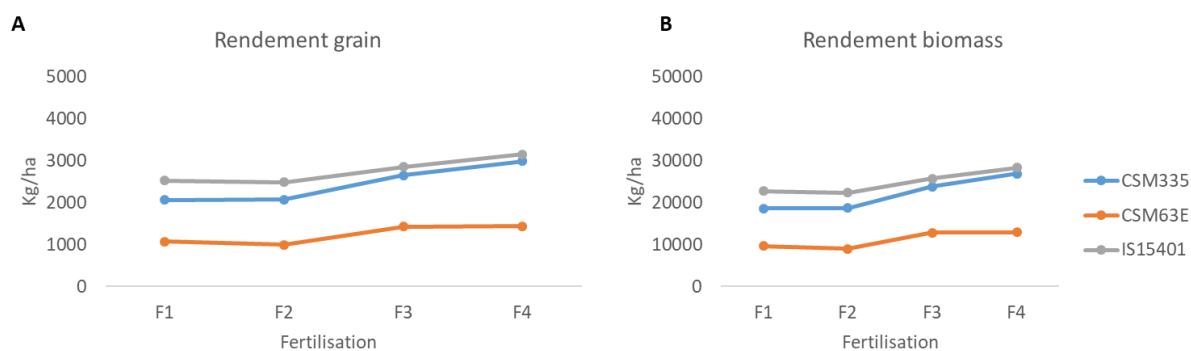


Figure 27 : Rendements grains (a) et biomasse (b) obtenus par type de fertilisation pour les trois variétés

3.3.3 Effets de la densité de semis sur les rendements

Avec les densités de semis, les rendements en grains et en biomasse les plus élevés ont été obtenus avec la variété IS15401 (Figure 28). De plus, les rendements les plus élevés ont été observés avec la plus faible densité D1 (2,85 plants.m⁻²). Les rendements les moins élevés ont été observés avec la plus forte densité D3 (8,55 plants.m⁻²). Une différence significative a été observée entre les rendements obtenus sous D1 et D3 et sous D2 et D3 ($p < 0,001$). Cependant, il n'y avait pas de différence significative entre les rendements obtenus sous D1 et D2 ($p = 0,214$).

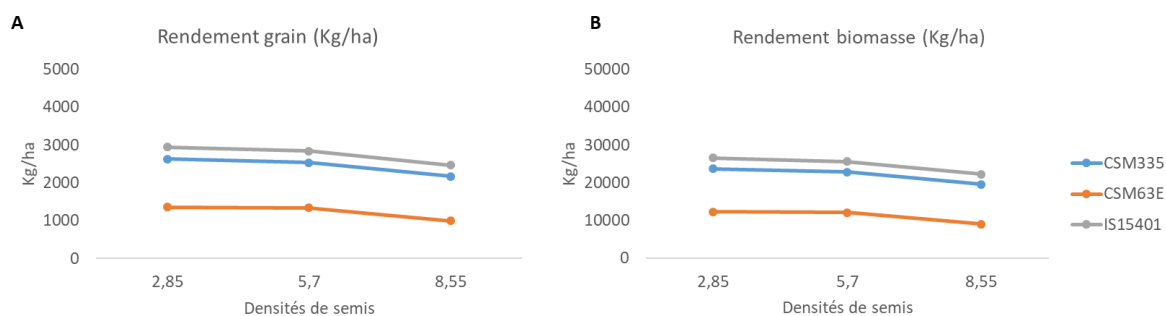


Figure 28 : Rendements en grains (A) et en biomasse (B) obtenus par densité de semis pour les trois variétés testées

3.3.4 Effet combiné de la date de semis, de la fertilisation et de la densité de semis sur les rendements

Les résultats de l'analyse de variance (Annexe 4) ont montré que la date de semis a la somme des carrés la plus élevée suivie de la variété et de l'interaction des deux (date de semis x variété). Les rendements en grains ont été significativement affectés par les quatre facteurs

testés avec une valeur $p < 0,001$. Les interactions dates de semis x fertilisations et dates de semis x variétés ont aussi été significatives avec une valeur $p < 0,001$. Les interactions dates de semis x densités et fertilisations x variétés étaient également significatives avec une valeur $p = 0,002$ et $p = 0,003$ respectivement. En revanche, l'interaction densités x variétés n'était pas significative ($p = 0,872$).

3.4 Réponse de la transpiration des lignées parentales de sorgho malien au déficit de pression de vapeur atmosphérique et au séchage du sol

Des différences ont été observées dans la réaction des variétés au VPD et à l'assèchement progressif du sol à travers la transpiration entre les essais menés dans les environnements contrôlé et naturel. Les résultats ont montré une forte relation entre la perte d'eau par la transpiration et l'augmentation progressive des valeurs de VPD et aussi entre la perte d'eau par la transpiration et la diminution progressive de l'humidité du sol. Mais cette relation n'a pas été toujours linéaire.

Pour les variétés qui ont répondu linéairement, les valeurs de transpiration des géotypes croissent avec l'augmentation du VPD ou la diminution de l'humidité du sol. Par contre, les variétés qui se sont adaptés à la régression segmentée sont arrivées à limiter leur perte d'eau par la transpiration lorsque le VPD a augmenté ou que l'humidité du sol a diminué.

3.4.1 Réaction des variétés au VPD à travers la transpiration dans des environnements contrôlé et naturel

• Essai 1 :

Les résultats ont montré que le modèle segmenté est convenu mieux à la réponse de cinq des six variétés évaluées dans cet essai (Tableau 10). Le modèle segmenté étant constitué de deux pentes, les valeurs de la première pente (lorsque X est inférieur à X_0) ont varié entre 2,1 mg $H_2O\ m^{-2}\ s^{-1}\ kPa^{-1}$ et 4,2 mg de $H_2O\ m^{-2}\ s^{-1}\ kPa^{-1}$, tandis que les valeurs de la deuxième pente (lorsque X est supérieur à X_0) ont varié entre 0,45 mg $H_2O\ m^{-2}\ s^{-1}\ kPa^{-1}$ à 0,7 mg $H_2O\ m^{-2}\ s^{-1}\ kPa^{-1}$. La plus forte valeur de la deuxième pente a été observée avec Sambalma, tandis que la plus faible valeur a été observée avec Keninkeni, suivie de Lata3. La variété CSM63E a été la seule lignée qui a réagi linéairement lorsque le VPD a augmenté avec une pente de 0,8 mg $H_2O\ m^{-2}\ s^{-1}\ kPa^{-1}$. Le R^2 pour les cinq géotypes décrits par la régression à deux segments a varié entre 0,4 et 0,8 alors que celui de CSM63E représenté par la régression linéaire a été de

0,4. La différence de temps a été significative. Cependant, la différence entre les génotypes et l'interaction génotype \times temps n'ont pas été significatives.

Tableau 10: Intersection, les 2 pentes / segments et le R2 des 12 géotypes dont la transpiration est adaptée à la régression segmentée

Géotypes	Essai 1 (Essai1)				Essai 2 (Essai2)				Essai 3 (Essai3)				Essai 4 (Essai4)			
	Pente 1	X0	Pente 2	R ²	Pente 1	X0	Pente 2	R ²	Pente 1	X0	Pente 2	R ²	Pente 1	X0	Pente 2	R ²
Lata3	2,43±0,66	2,8	0,49±0,09	0,67	1,99±0,66			0,66	0,29±0,14	3	0,79±0,073	0,92	0,66±0,08			0,67
Keninkeni	2,9±0,989	2,8	0,45±0,14	0,49					1,01±0,15	3	0,42±0,089	0,95	0,66±0,10			0,52
Grinkan	4,2±1,57	2,8	0,53±0,22	0,39	0,84±0,80	2,07±0,40	3,0±0,73	0,82	0,63±0,04			0,88	0,59±0,09			0,55
Sambalma	2,43±0,56	2,8	0,66±0,078	0,81	2,2±0,54			0,75	0,80±0,12			0,69	0,68±0,08			0,70
B35	2,07±0,68	2,8	0,57±0,1	0,68					0,72±0,05			0,90	0,61±0,05			0,84
CSM63E	0,76±0,17			0,33	1,80±0,50			0,73	0,21±0,18	3	0,74±0,09	0,83	0,68±0,06	3,7	-0,04±0,21	0,871
CSM335					1,33±0,67	2,4±0,12	6,83±1,01	0,85	0,67±0,08	4,8	3,05±0,52	0,90	0,62±0,08			0,65
Ribdahu									0,56±0,07			0,69	0,61±0,06			0,70
Doua-G									0,67±0,09			0,75	0,43±0,04			0,79
IS15401									0,60±0,08			0,67	0,60±0,04			0,84
Framida									0,64±0,08			0,78	0,64±0,09			0,54
Gnossiconi									0,69±0,09	4,9	-0,93±0,65	0,76	0,48±0,04	4,3	-0,99±0,66	0,83
01-BE-F5P-15									0,57±0,07			0,73	0,73±0,07			0,76
CSM 660									0,39±0,08			0,46	0,50±0,02			0,93
GPN01 S01 267-9-3-1-1									0,92±0,08			0,85	0,58±0,03			0,91
GPN01 267-9-(V1,2,3)-4-2									0,51±0,07			0,71	0,69±0,07			0,72
00-CZ-F5P-135									0,65±0,09			0,73	0,57±0,05			0,83
B2-5									0,93±0,14			0,75	0,52±0,07			0,63
Dagnali Kossourou									0,62±0,09			0,62	0,65±0,05			0,80
GPN01 S01 266-8-3-3-vr									0,67±0,08			0,70	0,62±0,05			0,80
E36-1									0,44±0,07			0,61	0,65±0,09			0,58
IS 24887									1,01±0,13			0,67	0,68±0,05			0,86
B2-3									1,09±0,14			0,68	0,64±0,06			0,74
CMDT45									0,62±0,11			0,58	0,61±0,08			0,62
CSM388									0,69±0,11			0,57	0,63±0,05			0,84
98-BE-F5P-84									0,41±0,08			0,49	0,50±0,04			0,81
IS393(411)695									0,50±0,08			0,47	0,72±0,05			0,87
IS29472									0,50±0,12			0,46	0,71±0,06			0,77
IS14556									0,55±0,05			0,80	0,71±0,07			0,71
IS10876									0,21±0,13	3	0,73±0,07	0,86	0,55±0,07			0,61
98-SB-F2-78									0,46±0,04			0,90				
SK5912									0,84±0,15			0,54				
IS 23540									0,51±0,06			0,70				
IS 23645									0,72±0,10			0,65				
GPN01 S01 266-2-1-6-vr									0,59±0,12			0,54	0,73±0,09	3,7	-0,15±0,32	0,73
CIRAD406									0,62±0,07			0,75	0,70±0,07	3,7	0,09±0,23	0,81
BBISS-08 (vrai sauvage No.8)									0,52±0,13			0,33	0,65±0,06	3,7	0,03±0,26	0,83
02-SB-F4DT-275									0,60±0,09			0,66				

• Essai 2:

Dans cet essai, cinq génotypes ont été évalués dans des conditions naturelles. Parmi eux, deux ont présenté une résistance à la transpiration avec l'augmentation des valeurs de VPD (Tableau 10). La valeur de l'intersection entre les deux segments pour ces deux génotypes, a varié entre 2,1 kPa pour Grinkan et 2,4 kPa pour CSM335. Cette dernière variété n'a pas été évaluée dans l'essai 1. La pente du premier segment, lorsque X est inférieur à une valeur X0 a varié de 0,8 mg H₂O m⁻² s⁻¹ kPa⁻¹ pour Grinkan à 1,3 mg H₂O m⁻² s⁻¹ kPa⁻¹ pour CSM335. La pente du deuxième segment, lorsque X est supérieur à X0, variait entre 3 mg H₂O m⁻² s⁻¹ kPa⁻¹ et 6,8 mg H₂O m⁻² s⁻¹ kPa⁻¹. Contrairement à l'essai 1, dans l'essai 2, la pente du deuxième segment au-dessus de l'intersection était beaucoup plus élevée que celle du premier segment pour les variétés Grinkan et CSM335. La pente des trois variétés décrites par une régression linéaire a varié de 1,8 mg H₂O m⁻² s⁻¹ kPa⁻¹ à 2,2 mg H₂O m⁻² s⁻¹ kPa⁻¹. Cependant la pente la plus élevée a été observée avec Sambalma et la plus faible avec CSM63E, suivi de Lata3. Le R², pour les deux génotypes qui présentaient une limitation, variait de 0,8 à 0,9 tandis que celui des génotypes qui n'ont pas présenté de limitation a varié de 0,7 à 0,8.

• Essai 3 :

Trente-huit variétés ont été caractérisées dans cet essai en environnement contrôlé. Parmi eux, huit ont présenté une limitation dans leur transpiration au VPD croissant avec des valeurs de l'intersection variant de 3 kPa à 4,9 kPa (Tableau 10). Pour ces huit génotypes, les valeurs de la première pente, (lorsque X est inférieur à une valeur X0), ont varié de 0,2 H₂O m⁻² s⁻¹ kPa⁻¹ à 1 H₂O m⁻² s⁻¹ kPa⁻¹. Tandis que les valeurs de la deuxième pente au-dessus de l'intersection ont varié entre -0,9 mg H₂O m⁻² s⁻¹ kPa⁻¹ et 3 mg H₂O m⁻² s⁻¹ kPa⁻¹. La pente la plus élevée au-dessus de l'intersection a été observée avec la variété CSM335, par contre la plus faible a été observée avec la variété Gnessiconi. Les génotypes suivant GPN01 S01 267-9-3-3-vr, CSM63E, IS10876, CSM335 et 98-SB-F2-78 ont présenté des valeurs de pente au-dessus de l'intersection, supérieures aux valeurs de la pente au-dessous de l'intersection. Les pentes des trente génotypes qui ont répondu linéairement à l'augmentation du VPD ont varié de 0,4 mg H₂O m⁻² s⁻¹ kPa⁻¹ à 1 mg H₂O m⁻² s⁻¹ kPa⁻¹. La plus forte pente a été observée avec B2-3 alors que la plus faible pente a été observée avec 98-BE-F5P-84 et E36-1. Le R² pour les variétés qui ont présenté une limitation dans leur transpiration a varié entre 0,5 et 0,99 et celui des génotypes ne présentant pas

de limitation a varié de 0,3 à 0,9. Il est important de rappeler que seulement cinq des 38 génotypes ont été évalués uniquement dans cet essai.

- Essai 4 :

Cinq des trente-trois génotypes caractérisés dans cet essai ont montré que leur transpiration a été adaptée à un modèle de régression segmentée (Tableau 10). La valeur de l'intersection pour ces cinq génotypes a varié de 3,5 kPa (CSM63E, CIRAD406, GPN01 S01 266-2-1-6-vr et BBISS-08 (vrai sauvage n ° 8)) à 4,3 kPa (Gnossiconi). Les pentes du premier segment en dessous de l'intersection ont varié de 0,5 mg H₂O m⁻² s⁻¹ kPa⁻¹ à 0,7 mg H₂O m⁻² s⁻¹ kPa⁻¹, tandis que les pentes du deuxième segment, lorsque X est supérieur à X₀ étaient comprises entre -0,1 mg H₂O m⁻² s⁻¹ kPa⁻¹ et 0,01 mg H₂O mg H₂O m⁻² s⁻¹ kPa⁻¹. La variété CIRAD406 a eu la valeur de la pente du deuxième segment la plus élevée tandis que la variété Gnossiconi a eu la plus faible valeur. Les valeurs des pentes des 28 variétés qui ont répondu linéairement à l'augmentation croissante du VPD ont varié entre 0,4 mg H₂O m⁻² s⁻¹ kPa⁻¹ et 0,7 mg H₂O m⁻² s⁻¹ kPa⁻¹. La pente la plus élevée a été observée avec la variété 01-BE-F5P-15, tandis que la plus faible pente a été observée avec la variété Doua-G. Le R² pour les cinq variétés décrites par la régression à deux segments a varié de 0,7 à 0,9 tandis que celui des variétés représentées par la régression linéaire a varié de 0,5 à 0,9.

- Comparaison entre les quatre essais de VPD

La Figure 29 montre les trois types de réactions observées à travers les quatre essais. En moyenne, la valeur la plus élevée des pentes du deuxième segment, lorsque X est supérieur à X₀, a été observée dans l'essai 2 (4,9 kPa). De même, la valeur la plus élevée des pentes de la régression linéaire a été observée dans l'essai 2 (2 kPa). La plus faible intersection a été observée dans l'essai 2, tandis que la plus forte intersection a été observée dans l'essai 3. Parmi les trente-huit variétés évaluées, seules quatre (Grinkan, CSM63E, Lata3 et Sambalma) ont été évaluées dans les quatre essais de VPD. Grinkan, Lata3 et CSM63E ont présenté des résultats cohérents dans deux sur quatre des essais conduits (Tableau 10). La variété Sambalma avait montré une limitation uniquement dans l'essai 1 où il présentait la pente la plus élevée au-dessus de l'intersection (Essai 1). Les variétés Keninkeni, B35 et CSM335 ont été évaluées dans trois essais sur quatre. Ils ont chacun présenté une limitation dans leur transpiration dans deux essais

sur trois. La variété Gnessiconi, évaluée dans les essais 3 et 4, avait une réaction constante dans les deux essais (représenté par une régression segmentée), sa pente en dessous de l'intersection variant entre $0,7 \text{ mg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ et $0,5 \text{ mg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ et sa pente au-dessus de l'intersection variant entre $-0,9 \text{ mg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ et $-1 \text{ mg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ respectivement pour les essais 3 et 4. Douze des 38 génotypes présentaient une pente similaire dans l'Essai 3 allant de $0,41 \text{ mg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ à $0,69 \text{ mg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ et dans l'Essai 4 variant entre $0,43 \text{ mg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$ et $0,69 \text{ mg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$.

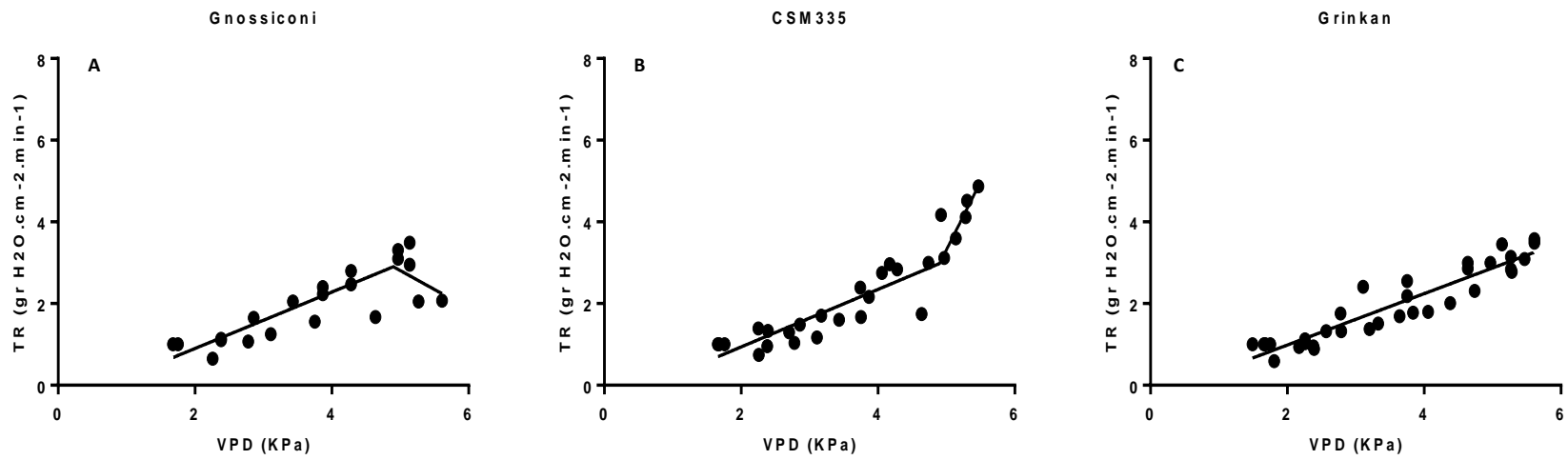


Figure 29 : Transpiration de trois différents génotypes en réponse à différentes conditions de VPD

3.4.2 Réaction des variétés à l'assèchement du sol à travers la transpiration dans des environnements contrôlé et naturel (dans les pots)

Dans l'essai 5 mené dans une serre en Inde, la perte d'eau par la transpiration a commencé à baisser avec des valeurs de FTSW comprises entre 0,35 et 0,51 (Figure 30). La FTSW la plus élevée a été observée avec B35, tandis que la plus faible valeur a été observée avec Grinkan suivie de Keninkeni (Tableau 11). Inversement, avec l'essai 6, mené au Mali en plein air, les valeurs seuils de FTSW ont montré une très grande variabilité allant de 0,16 à 0,49, la plus faible valeur de FTSW était enregistrée avec IS23540 et la valeur la plus élevée avec Framida (Figure 30). Les valeurs de FTSW pour les six variétés utilisées dans l'essai 5 qui ont également été évaluées dans l'essai 6 étaient différentes pour les deux essais (Tableau 11).

Dans les essais 5 et 6, les interactions variété \times jours pour la transpiration en réponse à l'assèchement de l'humidité du sol était significatives ($p < 0,001$).

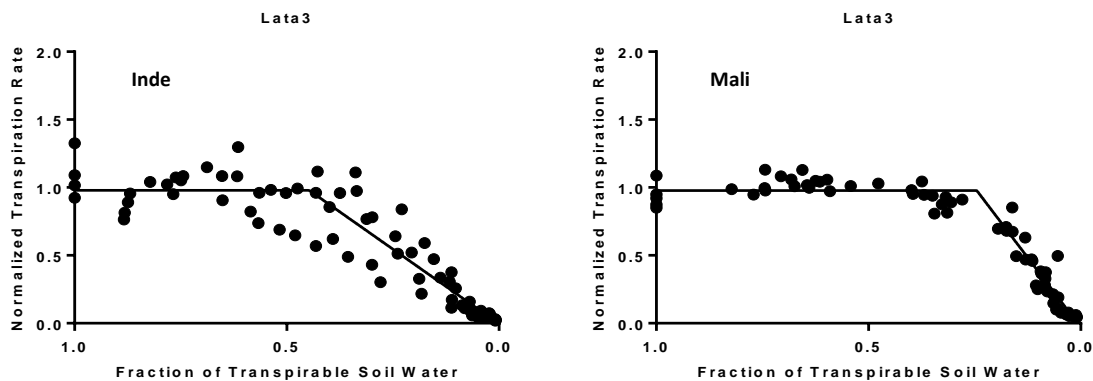


Figure 30 : Transpiration de Lata3 évaluée en Inde et au Mali en réponse à l'abaissement de l'humidité du sol

Tableau 11 : Résultats des deux essais d'abaissement d'humidité du sol montrant le seuil de FTSW auquel le taux de transpiration a commencé à baisser

Désignations Géotypes	Essai 5		Essai 6	
	Seuil de FTSW	R ²	Seuil de FTSW	R ²
Lata3	0.45 ± 0.03	0.8813	0.245 ± 0.012	0.95
Keninkeni	0.41 ± 0.03	0.8672		
Grinkan	0.35 ± 0.02	0.9034	0.3 ± 0.017	0.93
CSM63E	0.45 ± 0.01	0.9574	0.42 ± 0.016	0.94
Sambalma	0.50 ± 0.02	0.9194	0.427 ± 0.016	0.95
B35	0.51 ± 0.02	0.9186	0.34 ± 0.024	0.85
01-BE-F5P-15			0.24 ± 0.009229	0.95
98-SB-F2-78 (Tiandougou)			0.41 ± 0.016	0.94
CSM335			0.26 ± 0.01587	0.9
DouaG			0.41 ± 0.014	0.95
Framida			0.48 ± 0.023	0.9
Gnossiconi			0.23 ± 0.012	0.9
IS15401			0.36 ± 0.0094	0.97
IS15428			0.40 ± 0.014	0.95
IS23540			0.15 ± 0.012	0.78
IS23645			0.37 ± 0.012	0.96
Nafalen P6			0.45 ± 0.026	0.88
N'golofing			0.42 ± 0.016	0.95
Ribdahu			0.27 ± 0.012	0.95
SC566-14			0.28 ± 0.013	0.93
SK5912			0.26 ± 0.011	0.95

3.4.3 Réaction des variétés à l'assèchement du sol à travers la transpiration dans les lysimètres (Essais 7 et 8)

Dans l'essai 7, la valeur de l'efficacité de la transpiration (TE) la plus élevée a été observée avec Ribdahu, suivie de l'IS10876, et la CSM388 et Gnossiconi et la plus faible a été observée avec B35, suivie de l'IS29472 et 02-SB-F4DT-275 pendant la saison pluvieuse (Figure 31A). Dans l'essai 8, la valeur de TE la plus élevée a été observée avec Framida suivie de CIRAD406 et BBIS-08 (vrai sauvage n ° 8) et la plus faible valeur a été observée avec IS393(411)695, suivie de B35 et IS10876 (Figure 31B) pendant la contre-saison.

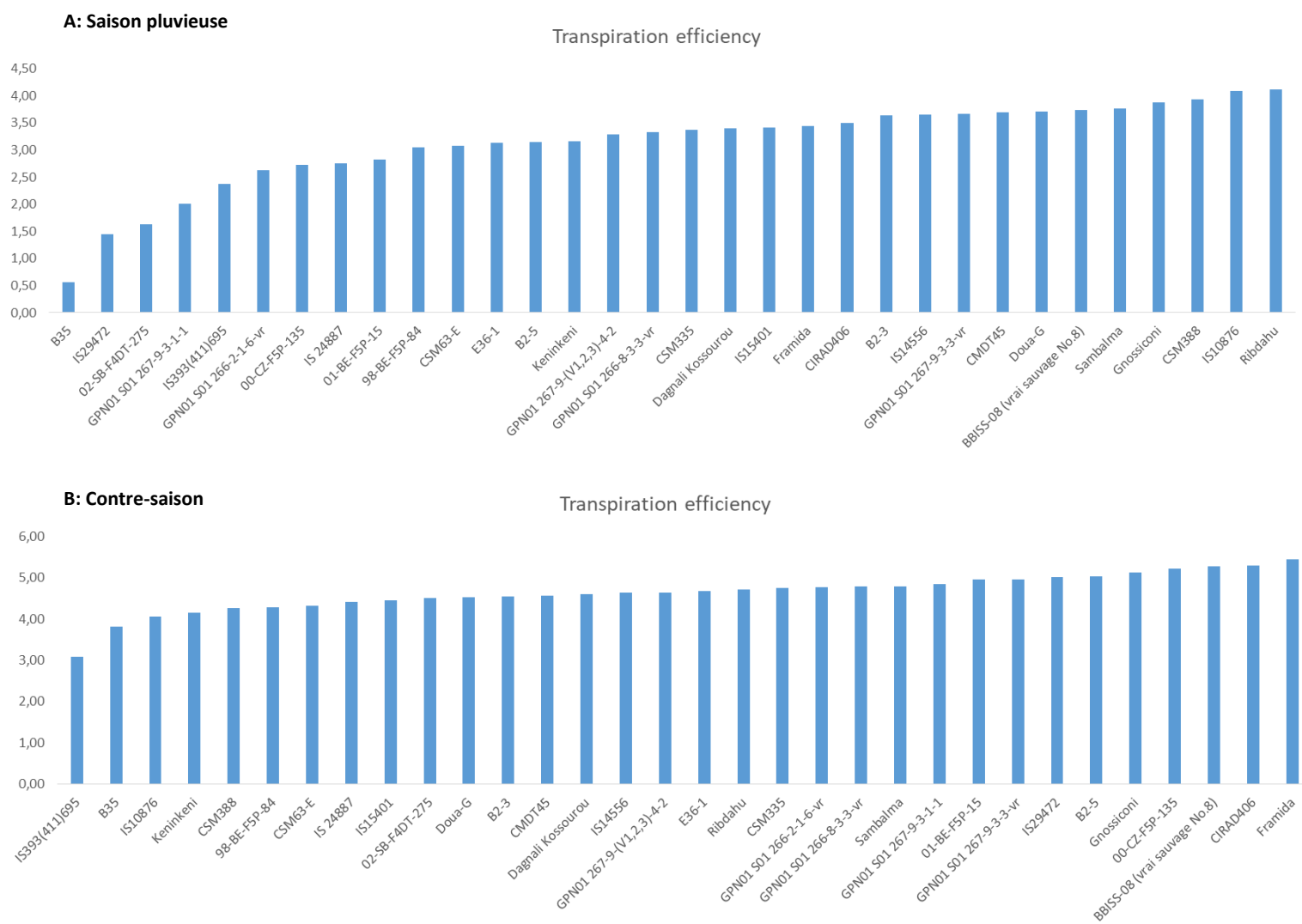


Figure 31: Somme totale des valeurs de l'efficacité de la transpiration de 32 lignées parentales de sorgho (A : Essai conduit pendant la saison pluvieuse en 2016; B : Essai conduit en contre-saison en 2017)

3.4.4 Réaction des variétés au VPD et à la baisse d'humidité du sol dans les pots et dans les lysimètres

En règle générale, les réactions des variétés n'étaient pas totalement cohérentes d'un essai à l'autre. Cela était valable aussi pour les quatre variétés évaluées dans tous les essais (CSM63E, Lata3, Sambalma et Grinkan). À titre d'exemple, la variété Sambalma a été observée dans l'essai de VPD 1 (essai 1) parmi les variétés ayant la plus forte pente au-dessus de l'intersection et dans les essais de VPD 2 et 3 (Essais 2 et 3) comme ayant la plus forte pente parmi les géotypes qui ont répondu linéairement. Cependant, Sambalma a été observé dans l'essai conduit dans les lysimètres avec une efficacité de transpiration (TE) de plus de 3,77 et 4,79 respectivement pour l'essai 7 (pendant la saison pluvieuse) et l'essai 8 (en contre-saison). De même, il a été observé dans les essais 5 et 6 avec un seuil de FTSW de 0,5 et 0,4 respectivement (Tableau 11).

Par ailleurs, les variétés comme Gnessiconi ont été évaluées dans les Essais 3, 4, 7 et 8 et sa réponse était cohérente à travers tous ces essais. Elle a montré une limitation dans sa perte d'eau par la transpiration en réponse au VPD croissant dans les Essais 3 et 4, avec la pente au-dessus de l'intersection la plus faible. Elle est également apparue dans les essais conduits dans les lysimètres parmi les variétés avec l'efficacité de transpiration la plus élevée. Lors de la saison des pluies dans l'essai 7, Gnessiconi avait une valeur de l'efficacité de transpiration de 3,88 (comparé à Ribdahu qui avait l'efficacité de transpiration la plus élevée avec 4,11), contre 5,12 pendant la contre-saison (comparativement à 5,45 pour Framida). De plus, BBISS-08 (vrai sauvage n ° 8) et Framida ont également fait preuve de cohérence dans leur réponse aux contraintes imposées. Similairement, BBISS-08 (vrai sauvage n ° 8), qui a montré une limitation dans sa perte d'eau par la transpiration dans l'essai 4 et une valeur de pente relativement plus faible dans l'essai 3, a également montré une TE relativement plus élevée dans des conditions lysimétriques. Ces deux variétés n'ont pas été caractérisées dans les essais d'abaissement de l'humidité du sol (essais 5 et 6). De plus, Framida qui avait la valeur seuil la plus élevée dans l'essai 6, la TE la plus élevée dans l'essai lysimétrique conduit pendant la saison pluvieuse, présentait également une transpiration relativement plus basse en réponse au VPD élevé dans les essais 3 et 4 et une TE comparativement plus élevée sous l'essai 7.

CHAPITRE IV : DISCUSSION

4.1 Caractérisation des scénarios de stress hydrique et leur effet sur la production du sorgho au Mali utilisant une approche de modélisation

4.1.1 Changement d'algorithmes était nécessaire pour prédire la performance agronomique des types de cultures sensibles à la photopériode

Afin de reproduire la dynamique des systèmes de culture du sorgho au Mali, la version publiée d'APSIM v.7.6 a été initialement testée. Néanmoins, bien que les stades phénologiques aient été bien prédits par le modèle, les changements de la taille de la canopée du matériel sensible ont la photopériode dus aux différentes durées des stades végétatifs n'ont pas été bien capturés par l'approche TPLA (la surface foliaire totale) qui, à la fin, a abouti à des prévisions peu fiables de la performance agronomique des cultures (biomasse et rendement en grains). Pour améliorer la capacité du modèle à prédire de tels changements au niveau de la taille du couvert végétal (de la canopée), l'approche ILA (surface foliaire individuelle) a été adoptée (Birch *et al.*, 1998). Par conséquent, la taille de la canopée est déterminée en fonction de la relation entre la taille de la plus grande feuille et le nombre total de feuilles, où la taille et la position de la plus grande feuille permettent de prédire la distribution de la taille des feuilles restantes. Enfin, l'incorporation de la fonction ILA a permis des prévisions plus mécanistes de la taille de la canopée des cultures sensibles au photopériodisme, qui est une adaptation environnementale courante des cultivars de sorgho maliens (Vaksmann *et al.*, 1996 ; Folliard *et al.*, 2004). Malgré l'algorithme basé sur l'ILA qui s'est avéré nécessaire pour capturer la performance agronomique de la canopée et des cultures sensibles au photopériodisme (PP), cette approche peut compliquer les processus de paramétrisation de la variété puisque la surface foliaire de chaque feuille individuelle doit être mesurée.

4.1.2 Scénarios de stress hydrique identifiés ainsi que leur fréquence d'occurrence dans la zone d'étude

Les résultats de la caractérisation ont révélé trois scénarios de stress hydrique majeurs et le scénario « Pas de stress hydrique » était le plus dominant avec 83 % et 73 % respectivement pour

CSM63E et CSM335. Cela indique que pour les variétés et les pratiques culturales testées, le stress hydrique n'était pas le principal facteur limitant la production de sorgho, en particulier dans la région méridionale, où la fréquence d'apparition des stress hydrique de Type2 et Type3 était très faible (Type2 et Type3: 3 %, 1 % à 2 % et 1 % à 9 %, 8 % à 9 % pour CSM63E et CSM335 respectivement). La différence de 10 % observée entre les fréquences d'occurrence des stress pour les deux variétés peut être expliquée par la durée relativement plus longue du cycle de CSM335 par rapport à CSM63E. Néanmoins, dans la même région (isohyète de 400 mm), la variété CSM335 s'est avérée plus exposée au stress hydrique de Type2 comparée à CSM63E sur 46 des 60 années étudiées ; la plupart des occurrences de ce stress hydrique sévère étant observées sur le sol qui a la plus faible CRE. Cela est à peu près le double du nombre d'années observé avec CSM63E (26 ans). Cela pourrait s'expliquer par le fait que CSM335 était cultivée hors de sa région de production, définie par Smale *et al.* (2016) comme étant l'isohyète 800 à 1000 mm.

Nos résultats ont également délimité une région de performance optimale de CSM63E comprise entre 400 et 800 mm, qui s'est avérée légèrement différente de la zone d'adaptation précédemment définie par Soumaré (2004), selon laquelle CSM63E ne pouvait produire mieux que dans des isohyètes inférieures à 700 mm. Néanmoins, notre zone délimitée pour CSM63E est plus proche de celle définie par Smale *et al.* (2016) qui est comprise entre 500 et 800 mm.

Quoi qu'il en soit, le fait que le stress hydrique ne soit pas un problème majeur pour la production de sorgho dans la région pour les variétés et les pratiques culturales étudiées suggèrent que la nécessité de matériel sensible à la photopériode n'a peut-être pas été motivée par un besoin « lié à la sécheresse », mais plus par la nécessité de disposer de variétés arrivant à maturité au même moment afin d'éviter les moisissures des grains et les attaques d'oiseaux pour les variétés précoces, ou pour éviter les effets de la cécidomyie qui affecte les cultures si la floraison n'est pas groupée.

4.1.3 Variabilité du rendement en grains selon les scénarios de stress hydrique, les zones bioclimatiques et le type de sol

Les résultats rapportés ici montrent que le rendement de CSM63E était supérieur à celui de CSM335 dans toutes les zones et toujours plus élevé sous le stress hydrique de Type1 que sous les Types2 et 3. Les rendements de CSM335 sont inférieurs à ceux de CSM63E, mais moins

variables, en particulier pour les isohyètes de 400 à 1000 mm et surtout pour le sol à forte CRE. Akinseye *et al.* (2017) ont signalé que CSM335 produit plus de biomasse mais moins de rendement en grains. Cela pourrait être bénéfique pour l'alimentation du bétail dans les régions où les terres pastorales tendent à disparaître. Le caractère de production de biomasse plus élevée peut être utilisé dans le développement de géotypes à double usage.

De manière générale, le stress hydrique de Type2 a substantiellement affecté le rendement en grains des deux variétés. Cependant, la réduction de rendement (58 % pour CSM63E et 64 % pour CSM335) causée par ce type de stress hydrique était toujours inférieure à celle rapportée par Seyoum *et al.* (2017) en Afrique de l'Est et du Sud sur le maïs (80 %), mais supérieure (ou égale pour CSM335) à 36 % obtenue par Heinemann *et al.* (2016) dans une étude de caractérisation de la sécheresse conduite dans les hautes terres rizicoles du Brésil.

Comparativement, le stress hydrique de Type3 a eu moins d'impact sur le rendement en grains (8 % et 19 % respectivement pour CSM63E et CSM335). Seyoum *et al.* (2017) ont trouvé des résultats similaires avec le maïs en Afrique Orientale et Australe. Ils ont expliqué que le stress hydrique post-floral observé après une bonne synchronisation de la floraison et de la formation des grains aurait un léger effet sur le rendement, car la formation des graines aurait été sécurisée en raison de l'absence de stress hydrique autour de la floraison.

Le faible rendement des deux variétés, observé dans la région méridionale, malgré l'application d'engrais recommandé, peut s'expliquer par le fait qu'elles étaient hors de leur région d'adaptation définie et ensuite parce que des précipitations abondantes pourraient entraîner une minéralisation rapide et un lessivage de l'azote du sol. En outre, le pH du sol diminue également avec l'augmentation des précipitations (Clerget, 2000, données non publiées). Gigou *et al.* (1998) ont dit que les sols acides se forment sous l'action du drainage qui entraîne les bases échangeables.

Il est à noter que cette étude a été réalisée avec un nombre limité de variétés sur un nombre limité de sites. Elle doit être répétée avec un plus grand nombre de variétés présentant une phénologie contrastée et des caractéristiques de rendement supérieures.

4.2 Modélisation de l'interaction G x E x M pour identifier les meilleures pratiques susceptibles d'avoir un impact significatif sur les scénarios de déficit hydrique et les rendements du sorgho au Mali

Cette étude a quantifié les effets des dates de semis, de la dose et de la période d'application de l'engrais et des densités de semis sur le rendement de la variété de sorgho CSM335 ainsi que sur des scénarios de stress hydrique identifiés sur 22 sites au Mali. Nos résultats ont révélé que les semis précoces donnaient un rendement plus élevé de la variété CSM335. Il a également été observé que la fertilisation recommandée avait plus d'impact sur l'occurrence des scénarios de stress hydrique, en particulier dans les régions du Nord du pays. En outre, sur l'ensemble des densités testées, la forte densité (8,5 plants.m⁻²) est celle qui occasionnait la plus faible fréquence d'occurrence du stress hydrique de Type2.

De manière un peu plus détaillée :

•Dates de semis :

Le rendement le plus élevé a été obtenu lorsque les semis ont été effectués tôt sur la plupart des sites, et cela même sur le sol dont la capacité de rétention d'eau (CRE) est faible. L'observation selon laquelle les semis précoces (SD3) donnent un rendement moyen supérieur à 980 kg.ha⁻¹ pendant 1141 années sur 2160 étudiées (par rapport aux semis observés dans les champs paysans 980 kg / ha pendant 713 ans sur 2160 étudiés) corrobore cet argument. L'effet positif des semis précoces sur les rendements peut être attribué à l'allongement de la durée du cycle des plants qui permet à ces derniers de mieux explorer les ressources disponibles. Cela est particulièrement vrai pour la plupart des variétés de sorgho photosensibles du Mali, car le photopériodisme les dote d'un caractère de plasticité permettant une extension de leur cycle. Diawara *et al.* (2012) ont déjà signalé une augmentation du rendement en grains avec les semis précoces, à savoir que les semis précoces, dans des conditions de températures plus clémentes, avec des journées relativement longues, ont tendance à augmenter considérablement le rendement en grains du sorgho. Cependant, le degré de précocité du semis dépend de l'emplacement des sites. Par exemple, il était déconseillé de semer CSM335, un type de cultivar de cycle moyen, très tôt dans la région extrême Sud (>1000 mm), car la saison de croissance est plus longue dans cette région et les précipitations sont plus abondantes. De ce fait, elles pourraient induire des moisissures ou des dommages par les oiseaux (dus à la maturation précoce) (Folliard *et al.*, 2004). Dans le même

ordre d'idée il est déconseillé de semer CSM63 au sud du pays car il faudrait alors fortement retarder le semis ce qui entraînerait une baisse de rendement considérable (Sissoko et al, 2018). L'analyse du stress hydrique dû à la sécheresse a révélé la plus grande fréquence d'occurrence du stress Type1 sous SD1 dans le Nord et une partie des régions du Centre. Les semis précoces dans ces régions ont probablement allongé la durée d'extraction de l'eau des plantes, réduisant ainsi l'effet de la sécheresse causée par l'augmentation de la demande d'évaporation ou l'insuffisance des précipitations. Semer plus tard, lorsque la photopériode quotidienne est plus courte, peut provoquer une croissance et un développement plus rapide du sorgho (Thao *et al.*, 2015).

•*Dose et période d'application de l'engrais:*

Les résultats ont montré que la fertilisation recommandée, sur l'ensemble des doses d'engrais testées, augmentait la fréquence d'occurrence du stress hydrique et en même temps donnait le meilleur rendement. Par exemple, l'occurrence du stress hydrique de Type3 s'intensifiait avec l'apport de l'engrais, c'est-à-dire que l'application de la dose recommandée F4 triplait la fréquence de l'occurrence du stress hydrique de Type3 (8 % sous F1 contre 26 % sous F4).

En moyenne dans les régions méridionales, aucun type de stress hydrique n'a été observé sous aucune des doses d'engrais étudiées. Cependant, malgré l'absence de stress hydrique dans cette région, les rendements en grains simulés étaient considérablement inférieurs aux rendements potentiels des deux variétés cela même avec l'application de la dose recommandée. Ce faible niveau de rendement a aussi été observé dans l'isohyète 600 – 800 mm définie par Kouressy *et al.* (2008) comme étant la principale région de production de CSM335. De plus, il a été démontré que l'utilisation d'engrais réduisait considérablement le risque de perte de récolte en raison du stress hydrique. En effet, la présence des stress hydrique de Type2 et 3, même si elle était moins élevée, avec environ 10 % de chance, pouvait causer 40 % à 60 % de chance d'échec de la culture. A l'inverse, même si l'application d'engrais augmentait le risque d'occurrence des stress hydriques de 30 %, elle réduisait néanmoins le risque de perte de récolte d'environ 20 %. Nos résultats ont également montré que le rendement en grains de F2 (0 et 50 kg.ha⁻¹) était supérieur à celui de F3 (50 et 25 kg.ha⁻¹), qui correspond à la moitié de la dose recommandée, sur tous les sites et sur toutes les années étudiés. Ceci peut être attribué à la version du modèle APSIM-sorgho (vs 7.6) utilisé qui ne réagit pas à l'engrais phosphaté. Comme seulement 50 % de l'azote est contenu dans 50 kg.ha⁻¹ de DAP, cela ajouté aux 25 kg.ha⁻¹ d'urée est bien inférieur aux 50

kg.ha⁻¹ d'urée de F2. Ce résultat souligne la nécessité et l'importance de l'utilisation des paramètres sensibles du modèle à l'engrais phosphaté dans les études futures.

•*Densité de semis :*

Les résultats ont montré que les densités de semis évaluées avaient un impact significatif sur le rendement en grains. Mais cet impact était très variable d'un site à l'autre. Une densité plus faible, par exemple, a exposé les cultures à un stress hydrique à la floraison (Type3) avec une dose d'engrais inférieure sur presque tous les sites et qui s'est transformé en un stress hydrique sévère (Type2) lorsque la dose d'engrais était élevée (F4) dans les régions plus sèches (< 400 - 600 mm). Ceci n'est pas en accord avec Tokatlidis *et al.* (2011) qui ont suggéré une densité plus faible dans les zones exposées à la sécheresse pour une utilisation efficace des ressources nécessaire à la croissance. D'autres chercheurs ont également constaté des résultats non concluants en essayant d'établir une relation entre les rendements en grains du sorgho et les différentes densités de semis (Myers et Foale, 1981). Cependant, ils ont indiqué que, pour augmenter le rendement en grains tout en compensant la faible densité de semis, le sorgho utilise le remplissage de plus de fleurons par panicule et la production de talles fertiles, bien que ces dernières puissent être soumises à une forte inhibition à haute température. Ils ont également déclaré qu'une faible densité de semis n'était pas souhaitable en présence de mauvaises herbes, car cela pourrait empêcher les cultures de couvrir complètement la surface du sol, ce qui limiterait donc le potentiel de rendement des cultures (Butler *et al.*, 2003). La plus forte densité a entraîné une forte fréquence de l'occurrence du stress hydrique à la floraison (Type3). Malgré l'occurrence de ce stress hydrique pendant la floraison qui a été définie par Thomas *et al.* (1981) comme étant une des principales périodes de concurrence pour l'eau du sol, une augmentation mineure du rendement a été observée.

4.3 Evaluation des résultats de simulation de l'effet combiné de différentes pratiques culturales sur le sorgho par le modèle APSIM au Mali

Les effets des pratiques culturales sur la variété CSM335 simulés par le modèle dans l'activité précédente ont été comparés aux résultats observés au champ :

•Date de semis :

Les résultats de simulation obtenus dans l'activité précédente avec la variété CSM335 ont montré que les rendements moyens de SD3 (dates de semis précoces, simulant les rendements les plus élevés) étaient constamment supérieurs à ceux de SD1 (dates de semis sélectionnées par le modèle dans le Chapitre 2) et de SD2 (dates de semis observées dans les champs paysans ou définis par les experts). Ces résultats étaient valables pour les zones situées en dessous de l'isohyète > 400mm. Ainsi, les rendements moyens en grains de SD3 étaient 10 % et 11 % supérieurs à ceux de SD1 et SD2 respectivement.

Des résultats similaires ont également été observés en champ où les rendements moyens de SD3 (semis du 1^{er} juin) étaient supérieurs à ceux de SD1 (semis du 29 juin) et SD2 (semis du 27 juillet) de 46 % et 75 % respectivement.

•Fertilisation :

Il a également été observé dans le Chapitre 3, que l'application de l'engrais augmentait substantiellement les rendements et cela sous tous les scénarios de stress hydrique étudiés. Les rendements les plus élevés ont été obtenus sous F4 qui est la fertilisation recommandée. Cependant, les rendements moyens obtenus sous le traitement F2 étaient constamment supérieurs à ceux de F3 qui est la moitié de la fertilisation recommandée par la recherche. Ce fait a été attribué à la non-sensibilité du modèle APSIM au phosphore.

En milieu réel également, il a été constaté que l'apport de l'engrais augmentait régulièrement le rendement en grains et en biomasse de CSM335. Les rendements les plus élevés ont été obtenus avec F4. De façon générale, le facteur fertilisation a eu des effets significatifs sur les rendements en grains de CSM335 (F probabilité < 0,05).

•Densité de semis :

L'analyse de l'effet de la densité de semis sur les rendements simulés dans l'activité précédente a aussi montré que le changement de la densité de semis entraînait une variation des rendements de sorgho par isohyète, par dose d'engrais et par scénario de stress hydrique. Cependant, le rendement moyen en grains simulé avec la plus faible densité (2,85 plants.m⁻²) était de seulement 64 kg.ha⁻¹ (soit 5 %) plus élevé que celui simulé avec la densité de référence (5,7 plants.m⁻²). De même, le rendement moyen en grains simulé avec la forte densité testée (8,5 plants.m⁻²) était de 96 kg.ha⁻¹ (soit 7%) supérieur au rendement de la densité de référence. Il a été simulé qu'une

augmentation de la densité de semis, combinée avec la dose d'engrais recommandée, avait un faible impact sur le rendement en grains dans toutes les isohyètes sauf dans l'isohyète 400 – 600 mm. De plus, une faible densité de semis associée à la dose d'engrais recommandée augmentait constamment le rendement en grains dans toutes les isohyètes sauf dans la bande < 400 mm.

En milieu réel, des résultats contraires ont été obtenus. Le rendement moyen en grains observé avec la plus faible densité (2,85 plantes m⁻²) était de 98 kg.ha⁻¹ (soit 4 %) supérieur au rendement de la densité de référence. Par contre, le rendement moyen en grains simulé avec la forte densité testée (8,5 plants.m⁻²) était de 366 kg.ha⁻¹ (soit 14 %) inférieur au rendement de la densité de référence. On remarque également que la faible densité D1 performe bien sous le traitement F3 comparé aux autres niveaux de fertilisation. Par contre, la densité de référence D2 performe mieux sous la fertilisation F4 tandis que la densité D3 performe mieux sous la fertilisation recommandée F4 mais aussi sous F3.

4.4 Réaction des lignées parentales de sorgho malien au déficit de pression de vapeur atmosphérique et au séchage du sol à travers la transpiration

Ces résultats ont démontré une variation dans la réaction des variétés aux différents stress hydrique imposés. Au total, 38 génotypes ont été évalués dans des conditions naturelles et contrôlées afin de déterminer leur niveau de perte d'eau par la transpiration en réponse à l'abaissement progressif de l'humidité du sol dans les pots et les lysimètres et à l'augmentation progressive du VPD. Pour ce qui est du VPD, deux tendances ont été observées dans la réponse des variétés : 21 génotypes ont présenté une réponse linéaire et 17 ont présenté une limitation dans leur transpiration.

Parmi les variétés caractérisées, quatre ont été évaluées dans l'essai 1 en environnement contrôlé et re-testées dans l'essai 2 en condition naturelle. Il est intéressant de noter que, des quatre génotypes, seul CSM63E a répondu de façon linéaire dans les deux essais. Par conséquent, CSM63E avait une pente de 0,8 dans l'essai 1 et de 1,8 dans l'essai 2. Le fait que Lata3 et Sambalma, deux des quatre génotypes, aient exhibé une limitation dans leur perte d'eau par la transpiration en réponse à l'augmentation du VPD en milieu contrôlé dans l'essai 1, mais pas en condition naturelle dans l'essai 2 pourrait être attribué à la gamme de VPD testée à l'extérieur. La valeur la plus élevée de VPD calculée en condition contrôlée était de 3,95 kPa, tandis que celle calculée en milieu naturel était de 5,7 kPa. En plus, il convient de noter que les plantes évaluées

en plein air étaient à un stade végétatif avancé par rapport à celles évaluées en environnement contrôlé. Shekoofa *et al.* (2014) ont procédé à une évaluation au champ et dans des chambres de croissance de neuf géotypes de sorgho. Ils ont comparé les géotypes cultivés dans les chambres de croissance avec seulement quatre feuilles développées à des géotypes cultivés au champ à un stade végétatif avancé, puis ont évoqué la possibilité que l'exhibition de la limitation dans la perte d'eau par la transpiration des dernières feuilles apparues se produise à un VPD plus élevé.

L'inverse des résultats ci-dessus (sur Lata3 et Sambalma) a été observé avec Grinkan qui a été décrit par une régression segmentée à la fois dans les Essais 1 et 2 mais avec la pente au-dessus de l'intersection beaucoup plus forte que celle en dessous de l'intersection (lorsque X est supérieur à X_0) dans l'essai 2. Des résultats similaires ont été observés avec CSM335, qui a montré une limitation dans sa transpiration dans les essais 2 et 3 mais avec la pente au-dessus de l'intersection supérieure à la pente en dessous de l'intersection dans les deux essais. Pour CSM335, la pente au-dessus de l'intersection dans l'essai 2 était deux fois supérieure à celle observée dans l'essai 3. La forte pente au-dessus de l'intersection indique que la transpiration n'était pas limitée par ce géotype dans les deux conditions. Des résultats similaires ont été trouvés par Shekoofa, *et al.* (2014) avec le géotype TX 436 qui a été évalué au champ où il a exhibé une limitation dans sa réponse au VPD et en milieu contrôlé où il a répondu linéairement. Ils n'ont cependant pas trouvé de différence significative entre les deux réponses, car la forte pente au-dessus de l'intersection pour la réponse segmentée obtenue avec l'essai au champ, a montré que la transpiration n'était pas strictement limitée.

Il est nécessaire de rappeler que le VPD est responsable de la perte d'eau du sol et du couvert végétal. Pendant la journée, le contenu en eau de l'atmosphère ne varie pas significativement mais l'augmentation de température entraîne une diminution de l'humidité relative et une augmentation du VPD. Ainsi, l'effet de la sécheresse atmosphérique se manifeste en milieu de journée ensoleillée (Bertrand, 2009). Par conséquent, les faibles valeurs de VPD de l'essai 2 pourraient s'expliquer par la basse température observée particulièrement vers 14h00 (32,9 °C) à cause du temps nuageux et de la fine pluie qui est tombée 1h après (c'est-à-dire vers 15h00). L'impact de la température qui conditionne le déficit de transpiration a été rapporté par plusieurs chercheurs. Yang *et al.*, (2012) ont évalué la réponse du taux de transpiration de quatre hybrides de maïs à l'augmentation du VPD sous différents régimes de température. Ils ont constaté qu'à

température élevée (30 °C), les géotypes limitaient leur perte d'eau par la transpiration sous un VPD plus élevé que lorsque la température est faible (25 °C). Riar *et al.* (2015) ont également signalé qu'une température plus élevée peut amener les géotypes de sorgho à perdre leur caractère de limitation de la perte d'eau par la transpiration mais qu'en contrepartie, l'augmentation du taux de transpiration lorsque la température est plus élevée peut entraîner un refroidissement des feuilles.

Une large variation a été observée dans la transpiration des géotypes en réponse à l'assèchement progressif de l'eau du sol. Des différences phénotypiques dans la sensibilité des variétés à l'assèchement du sol ont été observées. Le seuil de limitation de la transpiration exprimé par le FTSW résultant de l'analyse de régression se produisait lorsque la teneur en eau du sol était encore élevée dans l'essai 1 comparé à l'essai 2.

Une découverte importante de cette étude est que Gnossiconi et, dans une certaine mesure, Lata3 (dans l'essai 1), qui présentaient une limitation de la perte d'eau par la transpiration sous un VPD plus élevé, semblaient avoir un seuil de transpiration inférieur à celui des autres géotypes lors de la baisse d'humidité du sol.

CHAPITRE V : CONCLUSION ET PERSPECTIVES

5.1 Caractérisation des scénarios de stress hydrique et leurs effets sur la production du sorgho au Mali utilisant une approche de modélisation

Notre étude sur la caractérisation des scénarios de stress hydrique a permis de paramétrer dans le modèle de culture APSIM-sorgho deux variétés communément cultivées dans la zone de production du sorgho au Mali. Bien que nous ayons réussi à paramétrer ces deux variétés représentant les cultivars sahéliens (CSM63E) et soudano-sahéliens (CSM335), nous n'avons pas pu refléter de manière fiable le type de cultivar soudano-guinéen (IS14501) dans le modèle. Nous avons réalisé que la fonction ILA utilisée (même la TPLA) n'était pas adaptée pour les variétés produisant plus de 26 feuilles. Malgré la formulation de nouveaux algorithmes, les données disponibles n'étaient pas suffisantes pour tester rigoureusement ces algorithmes et des données complémentaires doivent être collectées dans une étude future, afin que ces algorithmes puissent être déployés de manière crédible.

Aussi, l'approche de caractérisation du déficit en eau utilisée a permis de caractériser de façon intégrale les types de stress hydriques qui peuvent affecter les variétés CSM63E et CSM335 durant leur cycle de croissance sur les 22 sites sélectionnés au Mali. Les scénarios simulés ont été regroupés en trois principales trajectoires (Pas de stress hydrique, stress hydrique pendant la préfloraison et stress hydrique pendant la floraison). Cela a également permis d'évaluer l'impact de chaque type de stress hydrique sur le rendement. La connaissance de la nature et de la fréquence de ces stress hydriques peut aider à améliorer l'adaptation des variétés dans une zone de production donnée et à atténuer les interactions génotype x environnement. Cela aidera non seulement les programmes de sélection des cultures à orienter leur processus de sélection, mais également les agronomes dans leurs stratégies de phénotypage. Cette étude de caractérisation peut être étendue à d'autres environnements en Afrique et à d'autres cultures telles que le mil. Cette approche peut être utilisée dans les conditions climatiques futures pour faciliter les prévisions.

Les études futures devraient prendre en compte des facteurs autres que le stress hydrique.

Compte tenu de l'absence d'occurrence du stress dans la zone sud, probablement dû à la précocité des deux variétés étudiées, d'autres évaluations physiologiques paraissent nécessaires pour déterminer la réponse des variétés très sensibles à la photopériode (comme IS15401) sous les trois scénarios de stress hydrique.

5.2 Modélisation de l'interaction G x E x M pour identifier les meilleures pratiques susceptibles d'avoir un impact significatif sur les scénarios de déficit hydrique et les rendements du sorgho au Mali

L'étude de la modélisation de l'interaction G x E x M a permis de quantifier l'impact de la période de semis, de la dose et de la période d'application de l'engrais et de la densité de semis sur le rendement en grains du sorgho et sur trois types de stress hydrique et leur fréquence d'occurrence au Mali. Il a permis de tester différentes combinaisons de pratiques culturales dans le temps et dans l'espace, ce qui ne peut être fait que de manière limitée en conditions naturelles à travers les essais multi-locaux. L'activité précédente nous a permis d'identifier trois principaux scénarios de stress hydriques, à savoir un scénario sans stress hydrique (Type1), un stress hydrique qui se produit avant la floraison (Type2) et un scénario de stress hydrique qui se produit pendant la floraison (Type3). Dans cette activité, il a été observé que l'impact du stress hydrique qui se produit avant la floraison et de celui qui se produit pendant la floraison peut être réduit en semant tôt. En outre, l'étude a démontré que la performance d'une combinaison particulière de G x M peut varier selon l'emplacement du site. Les sites situés entre les isohyètes < 400 – 600 mm ont présenté une fréquence plus élevée de stress hydrique et celle-ci croissait avec l'augmentation de la dose d'engrais. Il a été observé que l'application d'engrais a provoqué des situations de stress sur tous les sites du Nord et du Centre (< 800 mm), tandis que son application réduisait et même éliminait les situations de stress hydrique dans les régions du Sud (> 800 mm) et minimisait généralement le risque de perte de récolte. Parmi les trois densités de semis (2,85 plantes m⁻², 5,7 plantes m⁻² et 8,55 plantes m⁻²) évaluées, il a été démontré que la densité de semis la plus faible occasionnait plus la fréquence d'occurrence du stress hydrique de Type2, en particulier lorsqu'une quantité d'engrais plus faible était apportée. Cette activité de simulation peut servir de base pour explorer de nouvelles pistes et tester un éventail de pratiques culturales dans de nombreux endroits du monde. Une étude future des interactions G x E x M pourrait envisager des types de cultures différentes pour mieux comprendre le défi.

5.3 Evaluation des résultats de simulation de l'effet combiné de différentes pratiques culturales sur le sorgho par le modèle APSIM au Mali

Les résultats de cette étude de validation ont confirmé nos résultats de simulation sur les dates de semis et sur la fertilisation. En ce sens qu'ils ont démontré l'avantage des semis précoces en termes de rendements en grains et en biomasse par rapport aux semis tardifs. Ils ont également montré qu'une augmentation de la fertilisation entraîne une amélioration des rendements en grains et aussi une croissance de l'occurrence du stress hydrique sévère. Cependant, les résultats observés sur les densités de semis étaient quelque peu différents de ceux simulés par le modèle. Des études approfondies peuvent être menées sur la comparaison de l'effet observé et simulé de la densité de semis sur les rendements grains et de biomasse des variétés CSM63E et CSM335.

5.4 Réaction des lignées parentales de sorgho malien à travers la transpiration au déficit de pression de vapeur atmosphérique et au séchage du sol

Dans cette étude, notre objectif était d'identifier des génotypes de sorgho du Mali qui pouvaient limiter leur transpiration sous une forte demande atmosphérique et un contenu en eau suffisant pour une efficiente utilisation ultérieure. À cette fin, des variétés (38 au total) qui étaient des lignées parentales de BCNAM (cartographie d'association imbriquée) dont certaines avaient déjà été identifiées comme sensibles ou non au VPD, ont été sélectionnées. La transpiration de ces génotypes a été évaluée sous trois types de stress hydrique (augmentation progressive du VPD, abaissement progressif de l'humidité du sol en pot et en lysimètre) en Inde et au Mali, sous les serres et en milieu naturel. Les résultats ont montré deux tendances dans la limitation de la perte d'eau par la transpiration lors de l'augmentation du VPD. 27 génotypes ont répondu linéairement au VPD croissant, tandis que 12 présentaient une limitation dans leur perte d'eau à travers la transpiration lorsque le VPD augmentait. De plus, une grande variabilité a été observée parmi les réactions des variétés à l'assèchement du sol à travers la transpiration. Dans l'essai 5, mené dans une serre en Inde, la FTSW la plus élevée a été observée avec B35 (0,51), tandis que la valeur la plus faible a été observée avec Grinkan (0,35) suivi de Keninkeni. Inversement, dans l'essai 6 conduit au Mali dans des conditions naturelles, le seuil le plus bas de l'indice de FTSW a été enregistré pour IS23540 (0,16) et le seuil le plus élevé pour Framida (0,49). Les valeurs de seuil de FTSW pour les six génotypes utilisés dans l'essai 5 qui ont été évaluées dans l'essai 6 étaient

différentes pour les deux essais. Ces résultats nous amènent à la conclusion que certains génotypes maliens sont capables de limiter leur transpiration tôt pendant la saison pour une utilisation ultérieure. Ceci est une caractéristique importante qui pourra aider les sélectionneurs des zones tropicales semi-arides sujettes à la faible humidité avec un VPD atmosphérique élevé et où les déficits en eau se développent généralement plus tard au cours de la saison de croissance. Elle permet une meilleure conservation de l'eau lorsque les conditions en eau sont non-limitantes pour une meilleure utilisation pendant la phase de remplissage des grains.

Vu le rôle important que joue le système racinaire dans l'adaptation morphologique des plantes au stress hydrique, il est nécessaire de mener une étude poussée sur la réponse des lignées parentales aux conditions de stress hydrique lorsque leurs racines sont soumises à des stress imposés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abamu, F. J. and J.; Wopereis, M. P. (2001): 'Adapting a photoperiod-sensitive routine to the INTERCOM model for use in West Africa', *Crop Management et Physiology*, pp. 59–77.
- Affholder, F., Tittone, P., Corbeels, M., Roux, S., Motisi, N., Tixier, P., Wery, J. (2012). Ad hoc modeling in agronomy: what have we learned in the last 15 years? *Agronomy Journal*, 104 (2012), pp. 735-748.
- Agence canadienne d'inspection des aliments. (2017). La biologie du Sorghum bicolor (L.(Linnaeus)) Moench (Sorgho cultivate). Document de biologie BIO2017-01: Cahier parallele aux Criteres d'evaluation du risque environnemental associe aux vegetaux a caracteres nouveaux. Ottawa (Ontario).
- Akinseye, FM., Samuel, A., Traore, PCS., Adam, M., Whitbread, AM. (2015): 'Evaluation of the onset and length of growing season to define planting date—a case study for Mali (West Africa)', *Theoretical and Applied Climatology*. doi: 10.1007/s00704-015-1460-8.
- Akinseye, FM., Adam, M., Agele, SO., Hoffmann, MP., Traore, PCS., Whitbread, AM. (2017). Field Crops Research Assessing crop model improvements through comparison of sorghum (sorghum bicolor L . moench) simulation models : A case study of West African varieties. *Field Crops Research*. Elsevier B.V. 201, pp. 19–31. doi: 10.1016/j.fcr.2016.10.015
- Agence canadienne d'inspection des Aliments: 'La Biologie du sorgho bicolor'. Ottawa, Ontario, pp. 668–698.
- Amadou, M. (1994). Analyse et modelisation de l'évaporation-transpiration d'une culture de mil en region aride sahelienne. Universite de Paris-Sud.
- Annerose, DJM. (1990). Recherches sur les mécanismes physiologiques d'adaptation à la sécheresse. Application au cas de l'arachide (*Arachis hypogea* L.) cultivée au Sénégal. Thèse de doctorat. Universite PARIS VII, France.
- Annerose, D., et Cornaire, B. (1994). Approche physiologique de l'adaptation à la sécheresse des espèces cultivées pour l'amélioration de la production en zones sèches : 137-150. In : Reyniers F. N. & Netoyo L. (eds.). Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale. Ed. John Libbey Eurotext. Paris.
- Barbottin A., Lecomte C., Bouchard C., Jeuffroy M.H (2005) Nitrogen Remobilization during Grain Filling in Wheat: Genotypic and Environmental Effects, *Crop Sci.* 45, 1141–1150.

- Batjes, N. H. (1995). A homogenized soil data file for global environmental research : a subset of FAO, ISRIC AND NRCS profiles. Working Paper and Preprint 95/10b, International Soil Reference and Information Centre, Wageningen, (July).
- Batjes, N. H. (2002). A homogenized soil profile data set for global and regional environmental', Working Paper and Preprint 95/10b, International Soil Reference and Information Centre, Wageningen.
- Belko, N., Zaman-Allah, M., Cisse, N., Ndack, ND., Zombre, G., Ehlers, JD., Vadez, V. (2012). Lower soil moisture threshold for transpiration decline under water deficit correlates with lower canopy conductance and higher transpiration efficiency in drought-tolerant cowpea. *Functional Plant Biology*, 39(4), p. 306. doi: 10.1071/fp11282.
- Benkhellef, I. (2016). Stratégies génomiques pour une meilleure tolérance au stress hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf). Mémoire de Master. Université des Frères Mentouri Constantine. Algérie.
- Bertrand, G. (2009): Caractérisation des réponses adaptatives à la contrainte hydrique dans le Sud-Est de l' Amazonie chez trois espèces fourragères cultivées en monoculture et en association : *brachiaria brizantha* , *Leucaena leucocephala* et *Arachis pintoï* To cite this versi. Université Paris-Est.
- Birch, CJ., Hammer, GL., and Rickert, KG. (1998). Improved methods for predicting individual leaf area and leaf senescence in maize (*Zea mays*). *Australian Journal of Agricultural Research*. 49(January 2015), pp. 249–62. doi: 10.1071/A97010.
- Blum A. (1974a). Genotypic responses in sorghum to drought stress. 1. Response to soil moisture stress. *CROP SCI.*, 14, pages 361-364.
- Blum, A., Arkin, G. F. and Jordan, W. R. (1977). Sorghum Root Morphogenesis and Growth. I. Effect of Maturity Genes. *Crop Science*, 17, p. 149. doi: 10.2135/cropsci1977.0011183x001700010039x.
- Blum, A. (1982). Evidence for genetic variability in drought resistance and its applications for plant breeding. Agricultural Research Organization, The Volcani Center, P.O.B. 6, Bet Dagan Israel
- Borrell, A.K., Jordan, D.R., George-Jaeggli, B., Hammer, G.L., Van Oosterom, E., Klein, P., Mullet, J. (2009). Fine-mapping candidate genes for 'stay-green' in sorghum: are we there yet? 3rd International Conference on Integrated Approaches to Improve Crop Production

under Drought-Prone Environments (Inter Drought-III). Shanghai, China: Shanghai Academy of Agricultural Science L 5.03.

- Bretaudeau, A., Traore, B.M., Traore, S., Toure, O.S., Keita, M. (1994). Contribution à l'utilisation des paramètres morpho-physiologiques et agronomiques pour la sélection de variétés de sorgho résistantes à la sécheresse. "Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique Tropicale", (John Libbey Ed.) Eurotext, Paris. 125-136.
- Bretaudeau, A., et Traore B.M. (1991). Caractérisation de quelques paramètres morpho-physiologiques de deux variétés de sorghos (*Sorghum bicolor* Moench) soumises à un stress hydrique. *Rev. Res. Amélior. Prod. Agr. Milieu Aride*, 3, 21-34.
- Bretaudeau, A., Traore, B. et Simpara, B. (1990). Amélioration de l'adaptation à la sécheresse du sorgho. Rapport C.E.R.A.A.S. 17 pages.
- Butler, G., Manning, B., Serafin, L. (2003). What are the impacts of varying populations and row configuration? GRDC Update papers.
- Carberry, P.S., Muchow, R.C., Hammer, G.L. (1993). Modelling genotypic and environmental control of leaf area dynamics in grain sorghum. II. Individual leaf level. *Field Crops Research*, 33 (1993) 311-328
- Chantereau, J., Cruz, J.F., Ratnadass, A., Trouche, G., (2013): Le sorgho. *Agricultures tropicales en poche*. Quæ, CTA., Versailles Cedex, France.
- Chantereau J. et Nicou R., 1991. Le sorgho. Paris, Maisonneuve et Larose, collection le technicien de l'agriculture tropicale, 159p.
- Chapman, S.C., Cooper, M., hammer G.L., and Butler D.G. (2000c). Genotype by environment interactions affecting grain sorghum. III. Temporal sequences and spatial patterns in the target population of environments. *Australian Journal of Agricultural Research*. 51, pp. 223–33. doi: 10.1071/AR99022.
- Chapman, S.C., Cooper, M., hammer G.L., and Butler D.G. (2000b) 'Genotype by environment interactions affecting grain sorghum. II. Frequencies of different seasonal patterns of drought stress are related to location effects on hybrid yields. *Australian Journal of Agricultural Research*. 51, pp. 209–21. doi: 10.1071/AR99021.
- Chauhan, Y.S., and Rachaputi, R.C.N. (2014). Defining agro-ecological regions for field crops in variable target production environments: A case study on mungbean in the northern grains

- region of Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 194, pp. 207–217. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.04.007>.
- Chenu, K., Cooper, M., Hammer, GL., Mathews, KL., Dreccer, MF., and Chapman SC. (2011). Environment characterization as an aid to wheat improvement: Interpreting genotype-environment interactions by modelling water-deficit patterns in North-Eastern Australia. *Journal of Experimental Botany*. 62(6), pp. 1743–1755. doi: 10.1093/jxb/erq459.
- Chenu, K., Deihimfard, R. and Chapman, SC. (2013): ‘Large-scale characterization of drought pattern : a continent- wide modelling approach applied to the Australian wheatbelt – spatial and temporal trends’, *New Phytologist*, 198, pp. 801–820.
- Choudhary, S., Sinclair, TR. and Prasad, PVV. (2013): ‘Hydraulic conductance of intact plants of two contrasting sorghum lines, SC15 and SC1205’, *Functional Plant Biology*, 40(7), p. 730. doi: 10.1071/fp12338.
- Clavel D, Drame N K., Diop Ndeye D., F. Y. Z. (2005): ‘Adaptation à la sécheresse et création variétale : le cas de l ’ arachide en zone sahélienne Première partie : revue bibliographique’, *Fondamental*, 12(N° 3 MAI-JUIN 2005).
- Craufurd, PQ., Mahalakshmi, V., Bidinger, FR., Mukuru, SZ., Chanterreau, J., Omanga, PA. (1999). Adaptation of sorghum: Characterisation of genotypic flowering responses to temperature and photoperiod. *Theoretical and Applied Genetics*. 99(5), pp. 900–911. doi: 10.1007/s001220051311.
- Devi, M. J. and Sinclair, T. R. (2011): ‘Diversity in Drought Traits among Commercial Southeastern US Peanut Cultivars’, *International Journal of Agronomy*, 2011, pp. 1–7. doi: 10.1155/2011/754658.
- Diawara, B. (1997). Effect of planting date on growth, development, and yield of grain sorghum hybrids. These de Master. Kansas State University Manhattan, Kansas.
- Do, FC., Daouda, OS., Marini, P. (1989). Etude agrophysiologique des mécanismes de résistance du mil à la sécheresse (cas d'un stress hydrique terminal). *Rev. Rés. Amélior. Prod. Agr. Milieu aride*; 1989, I, 57-74.
- Doggett, H. (1965). Disruptive selection in crop development. *Nature* 206, 279–280. doi: 10.1038/hdy.1968.1.
- FAO. (2017). The state of food and agriculture. Leveraging food systems for inclusive rural transformation. Rome, Italy

- FAO. (1995). The state of food and agriculture, Rome, Italy
- Folliard, A., Traore, PCS., Vaksman, M., and Kouressy, M. (2004). Modeling of sorghum response to photoperiod: A threshold-hyperbolic approach. *Field Crop Research*. 89, 59-70. doi: 10.1016/j.fcr.2004.01.006.
- Girma, FS., et Krieg, DR. (1992). Osmotic adjustment in sorghum: I. Mechanisms of diurnal osmotic potential changes. *Plant Physiology* 99, 577– 582.
- Gigou, J., 1998. Les contraintes aux systèmes de cultures coton-céréales dues à l'acidité In: Ratnadass A., C.J., Gigou J., (Editeurs) (Ed.), *Amélioration du sorgho et de sa culture en Afrique de l'Ouest et du Centre. Actes de l'atelier de restitution du programme conjoint sur le sorgho lcrisat-Cirad*, . CIRAD, Collection Colloques, Montpellier, Cirad-ca, 315 p. , Bamako, Mali, pp. 181-195.
- GraphPad Prism version 8.0.0 for Windows, GraphPad Software, San Diego, California USA, www.graphpad.com.
- Grieser, J., Gommès, R., Bernardi, M. (2006): 'New LocClim -the Local Climate Estimator of FAO', *Geophysical Research Abstracts*, 8(08305). Available at: http://www.juergen-grieser.de/publications/publications_pdf/EGU06-J-08305.pdf (Accessed: 7 September 2017).
- Hammer, GL., vanOosterom, E., McLean, G., Chapman, SC. Broad, I., Harland, P., and Muchow, RC. (2010). Adapting APSIM to model the physiology and genetics of complex adaptive traits in field crops. *Journal of experimental Botany*. 61, 2185– 2202. doi:<https://doi.org/10.1093/jxb/erq095>.
- Hammer, G. L., Carberry, P. S. and Muchow, R. C. (1993): 'Modelling genotypic and environmental control of leaf area dynamics in grain sorghum. I. Whole plant level', *Field Crops Research*, 33(3), pp. 293–310. doi: 10.1016/0378-4290(93)90087-4.
- Hammer GL, van Oosterom EJ, Chapman SC, McLean G. Borrell AK, Henzell RG. (2001). The economic theory of water and nitrogen dynamics and management in field crops, *Proceedings of the fourth Australian sorghum conference*, Kooralbyn, Queensland, pg. 5-8. CD Rom Format. Range Media Pty Ltd.
- Hariprasanna and Patil (2015) *Sorghum: Origin, Classification, Biology and Improvement. Sorghum Molecular Breeding*. Springer India 3-23.
- Heinemann, AB. (2016). Drought impact on rainfed common bean production areas in Brazil', *Agricultural and Forest Meteorology*, 225, pp. 57–74. doi: 10.1016/j.agrformet.2016.05.010.

- House, L. R. (1987): Manuel pour la selection du sorgho, International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT).
- Jaafari, SE., Paul, R., Lepoivre, P., Semal, J., Laitat, E. (1993). Resistance a la secheresse et reponses a l'acide abscissique: analyse d'une approche synthetique. Cahiers Agricultures. 2 : 216-63
- Jordan, D.R., Hunt, C.H., Cruickshank, A.W., Borrell, A.K., Henzell, R.G., (2012). The relationship between the stay-green trait and grain yield in elite sorghum hybrids grown in a range of environments. *Crop Science* 52, 1153–1161.
- Keating, BA., Carberry, PS., Hammer, GL., Probert, ME., Robertson, MJ., and Holzworth D. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*. 18, 267– 288. doi: [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9).
- Kholová, J., Hash, CT., Kumar, PL., Yadav, RS., Kocova, M., Vadez, V. (2010): ‘Terminal drought-tolerant pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] have high leaf ABA and limit transpiration at high vapour pressure deficit’, *Journal of Experimental Botany*, 61(5), pp. 1431–1440. doi: 10.1093/jxb/erq013.
- Kholová, J., McLean, G, Vadez, V., Craufurd, P., Hammer, GL. (2013): ‘Drought stress characterization of post-rainy season (rabi) sorghum in India’, *Field Crops Research*. Elsevier B.V., 141, pp. 38–46. doi: 10.1016/j.fcr.2012.10.020.
- Krieg, DR. (1993). Stress Tolerance Mechanisms in Above Ground Organs. [Volume 94, Issue 2 of INTSORMIL. Publications](#). Workshop on adaption of plants to soil stresses, 1993, Lincoln.
- Kouressy, M., Dingkuhn, M., Vaksman, M., Heinemann, AB. (2008): ‘Adaptation to diverse semi-arid environments of sorghum genotypes having different plant type and sensitivity to photoperiod’, 148, pp. 357–371. doi: 10.1016/j.agrformet.2007.09.009.
- Kouressy M. (2002). Étude de la durée du cycle des sorghos du Mali. Comparaison avec la durée de la saison des pluies. Évolution sur les 20 dernières années. DEA, université du Mali, Bamako.
- Levitt, J., 1980. Responses of plants to environmental stresses, vol II. Water, radiation, salt, and other stresses. Academic Press, London.
- Loffler, CM., Wei, J., Fast, T., Gogerty, J., Langton, S., Bergman, M., Merrill, B., Cooper, M. (2005): ‘Classification of Maize Environments Using Crop Simulation and Geographic Information Systems’, 1716, pp. 1708–1716. doi: 10.2135/cropsci2004.0370.

- Lys, P. (2010). The Current State of Cost of Production Estimates A review of Country Practices in Ethiopia, Mali and Zambia'. Available at:
http://www.fao.org/fileadmin/templates/ess/ess_test_folder/Workshops_Events/production_cost/Lys_Report_on_country_case_studies_on_CoP.pdf (Accessed: 7 September 2017).
- Mann, J. A., Kimber, C. T., Miller, F. R. (1983). The Origin and Early Cultivation of Sorghum in Africa (Texas, USA: Texas Agricultural Experiment Station).
- McNaughton, S.J. (1991). Response of Plants to Multiple Stress. Dryland herbaceous perennials. H.A. Mooney, W.E. Winner, E.J. Pell (Eds.), Academic Press, San Diego , pp. 307-328.
- Miller, E. C. (1916). Comparative study of the root systems and leaf areas of corn and the sorghums. Joup. Agr. Res. 6: 311-332, illus.
- Mooney, H.A., Winner, W.E. y Pell, E.J. (1991). Response of Plants to Multiple Stresses. Academic Press, California, USA.
- Murdock G. (1959) Staple subsistence crops of Africa. Geographical review 50(4): 521-540
- Myers, R. and Foale, M. (1981): 'Row spacing and population density in grain sorghum - A imple analysis', Field Crops Research, 4, pp. 147–154.
- Namara, R.E., & Sally, H. (Eds.) (2014). Proceedings of the Workshop on Irrigation in West Africa: Current Status and a View to the Future, 720 Ouagadougou, Burkina Faso, December 1–2, 2010. IWMI. 373p. <https://doi.org/10.5337/2014.218>.
- Passioura J.B. (1996). Simulation models: science; snake oil, education, or engineering? Agronomy Journal, 88:690-694.
- Pell, E.J., et Dann, M.S. (1991). Multiple stress-induced foliar senescence and implications for whole-plant longevity. In: Integrated Response of Plants to Stress (Ed. by H. A. Mooney, W. E. Winner & E. J. Pell), pp. 189-204. Academic Press, San Diego.
- Penning de Vries, F.W.T., Jansen, D.M., ten Berge, H.F.M., and Bakema, A. (1989). Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. IRRRI Los Baños 1989.
- PIRT (1986): Projet "Inventaires des Ressources Terrestres " au Mali. Volume 1, Atlas ; Volume II, Rapport Technique.
- Prasad, P. V. V. and Staggenborg, S. a (2009): 'Growth and Production of Sorghum and Millets', Soils, Plant Growth and Crop Production, 2(January 2010), pp. 1–27.
- R Development Core Team (2008) R: A language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.

- Ravi Kumar, S., Hammer, G.L., Broad, I., Harland, P., and McLean, G. (2009). Modelling environmental effects on phenology and canopy development of diverse sorghum genotypes. *Field Crops Research*. 111(1–2), pp. 157–165. doi: 10.1016/j.fcr.2008.11.010.
- Renard, C. (1983). Adaptation dur riz pluvial au deficit hydrique. *Tropicultura*. 1, (4), 128-132.
- Riar, M. K., Sinclair, T. R. and Prasad, P. V. V. (2015): ‘Persistence of limited-transpiration-rate trait in sorghum at high temperature’, *Environmental and Experimental Botany*. Elsevier B.V., 115, pp. 58–62. doi: 10.1016/j.envexpbot.2015.02.007.
- Riou, C., Nicaud, J.M., Barre, P., Gaillardin, C. (1997). Stationary phase gene expression in *Saccharomyces cerevisiae* during wine fermentation. *Yeast* 13, 903–915.
- Roberts, E.H.; Summerfield, R. J. (1987). Measurement and prediction of flowering in annual crops: Types of flowering response to photoperiod. In *Manipulation of Flowering* (Ed. J. G. Athert), pp. 17-50. London: Butterworth. doi: 10.1016/B978-0-407-00570-9.50007-7.
- Sexton, R., Lewis, L. N., Trewavas, A. J., and Kelly, P. (1985). Ethylene and abscission. In "Ethylene and Plant Development" (J. A. Roberts and G. A. Tucker, eds.), pp. 173-196. Butterworth, London.
- Seyoum, S., Chauhan, Y., Rachaputi, R., Fekybelu, S., Prasanna, B. (2017). Characterising production environments for maize in eastern and southern Africa using the APSIM Model. *Agricultural and Forest Meteorology*. Elsevier. 247(January), pp. 445–453. doi: 10.1016/j.agrformet.2017.08.023.
- Shekoofa, A., Balota, M. and Sinclair, T. R. (2014): ‘Limited-transpiration trait evaluated in growth chamber and field for sorghum genotypes’, *Environmental and Experimental Botany*. Elsevier B.V., 99, pp. 175–179. doi: 10.1016/j.envexpbot.2013.11.018.
- Sinclair, T.R., and Ludlow, M.M. (1986). Influence of soil water supply on the plant water balance of four tropical grain legumes. *Aust. J. Plant Physiol.*, 1986, 13, 329-41.
- Sinclair, T.R., and Muchow, R.C. (2001). System analysis of plant traits to increase grain yields on limited water supplies. *Agronomy Journal*, 93(2), pp. 263–270. doi: 10.2134/agronj2001.932263x.
- Sinclair, T.R., Devi, J., Shekoofa, A., Choudhary, S., Sadok, W., Vadez, V., Riar, M., Rufty, T. (2017): Limited-transpiration response to high vapor pressure deficit in crop species. *Plant Science*, 260(April), pp. 109–118. doi: 10.1016/j.plantsci.2017.04.007.

- Smale, M., Kergna, A., and Diakite, L. (2016). An Economic Assessment of Sorghum Improvement in Mali. Impact Assessment Report No. 2. MPatancheru 502 324, Telangana, India: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics., (2), p. 52 pages. Available at: <https://ideas.repec.org/p/ags/midiwp/198186.html>.
- Smale, M., Assima, A., Kergna, A., Thériault, V., Weltzien, E. (2018). Farm family effects of adopting improved and hybrid sorghum seed in the Sudan Savanna of West Africa. *Food Policy*. 74, pp. 162-171. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2018.01.001>.
- Sissoko, S., Tékété, M.L., Kouressy, M., Thera, K., Dembélé, Y., Doumbia, M., Sissoko, A., Sanogo, S., Diarra, Y., Samaké, M., Rami, J.F., Diallo, A.G., Vaksmann, M., Niangado, O., Témé, N. (2018). Combined agronomic and climatic approaches for sorghum adaptation in Mali. *African Journal of Agricultural Research* 13, 1816-1827. <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13274>.
- Snowden, J.D. (1936). Cultivated races of sorghum. London, UK: Adlard and Sons. 274 pp.
- Snowden, J.D. 1955. The wild fodder sorghums of the section Eu-sorghum. *Journal Linnean Society, Botany (London)* 55:191-260.
- Soltani, A., Sinclair, T. R. (2012): Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield. doi: 10.1146/annurev.physiol.65.092101.142622.
- Soumare, M. (2004): Contribution à la prévision de l'aire de diffusion de variétés de sorgho au Mali Couplage entre Modèle de Croissance des Cultures et Système d'Information Géographique. Université de Paris X.
- Stout, D. G., Kannangara, T. and Simpson, G. (1978): 'Drought resistance of sorghum bicolor. 2. water stress effects on growth', *Canadian Journal of Plant Science*, 58(225–233).
- Sultan, B., Guan, K., Kouressy, M., Biasutti, M., Piani, C., Hammer, G.L., McLean, G., Lobell, D.B., (2014). Robust features of future climate change impacts on sorghum yields in West Africa. *Environmental Research Letters* 9, 104006 <http://stacks.iop.org/1748-9326/9/i=10/a=104006>.
- Sullivan, C.Y. (1972). Mechanisms of heat and drought resistance in grain Sorghum and methods of measurement. Pages 247-264 dans N.G.P. Rao and L.R. House, eds. *Sorghum in the Seventies*. Oxford and I.B.H. Publishing Co. New Delhi, India.

- Thao, NP., Khan, MIR., Anh Thu, NB., Thi Hoang, XL., Asgher, M., Khan, NA., Tran, LSP. (2015). Role of ethylene and its cross talk with other signaling molecules in plant responses to heavy metal stress. *Plant Physiology*. Volume 169, Issue 1, 1 September 2015, Pages 73-84.
- Thomas, GA., Myers, RJK., Foale, MA., French, AV., Hall, B., Ladewig, JH., Done, AA., Taylor, GK., Lefroy, E., Wylie, P. and Stifling, G.D. (1981). Evaluation of row spacing and population density effects on grain sorghum yield over a range of Australian environments. *Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb*, 21: 210--217.
- Tokatlidis, IS., Has, V., Melidis, V., Mylonas, I., Evgenidis, G., Copandean, A., Ninou, E., Fasoula, VA. (2011): 'Field Crops Research Maize hybrids less dependent on high plant densities improve resource-use efficiency in rainfed and irrigated conditions', *Field Crops Research*. Elsevier B.V., 120(3), pp. 345–351. doi: 10.1016/j.fcr.2010.11.006.
- Tshiabukole JPK. (2018). Evaluation de la sensibilité aux stress hydriques du maïs (*Zea mays* L.) cultivé dans la savane du Sud-Ouest de la RD Congo, cas de Mvuazi. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences Agronomiques, Département de Phytotechnie, Université Pédagogique Nationale, RD Congo, p. 162.
- Turner, NC. (1982). The role of shoot characteristics in drought resistance of crop plants. In book: *Drought resistance in crops with emphasis on rice* Publisher: International Rice Research Institute, Los Banos, The Philippines.
- Vadez, V. (2011): 'Stay-green quantitative trait loci's effects on water extraction, transpiration efficiency and seed yield depend on recipient parent background', *Functional Plant Biology*. CSIRO Publishing, 38(7), p. 553. doi: 10.1071/fp11073.
- Vadez, V. (2013): 'Molecular Breeding for Stay-Green: Progress and Challenges in Sorghum Vincent Vadez, Santosh Deshpande, Jana Kholova, Punna Ramu, and C Tom Hash', *Translational Genomics for Crop Breeding*, II.
- Vadez, V.; Kholova, J.; Medina, S.; Kakkera, A.; Anderberg, H. Transpiration efficiency: New insights into an old story. (2014). *Journal of Experimental Botany*. 65, 6141–6153.
- Vadez, V. and Ratnakumar, P. (2016): 'Field Crops Research High transpiration efficiency increases pod yield under intermittent drought in dry and hot atmospheric conditions but less so under wetter and cooler conditions in groundnut (*Arachis hypogaea* (L.))', *Field Crops Research*. Elsevier B.V., 193, pp. 16–23. doi: 10.1016/j.fcr.2016.03.001.

- Vaksmann, M., Traore, SB., and Niangado, O. (1996). Le photopériodisme des sorghos africains. *Agriculture et développement*. (No9), pp. 13–18.
- van Oosterom, EJ., Carberry, PS., and O’Leary, GJ. (2001). Simulating growth, development, and yield of tillering pearl millet I. Leaf area profiles on main shoots and tillers. *Field Crops Research*. 72(1), pp. 51–66. doi: 10.1016/S0378-4290(01)00164-2.
- Vartanian N., et Lemée G. (1984). La notion d'adaptation à la sécheresse. *Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques*, 131:1, 7-15, DOI: 10.1080/01811789.1984.10826628.
- Verma, R., Kumar, R., Nath D. (2018) Drought resistance mechanism and adaptation to water stress in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *International Journal of Bio-resource and Stress Management* 91:167–172. Doi: [HTTPS://DOI.ORG/10.23910/IJBSM/2018.9.1.3C0472](https://doi.org/10.23910/IJBSM/2018.9.1.3C0472).
- VSN International (2015). *Genstat for Windows 12th Edition*. VSN International, Hemel Hempstead, UK. Web page: Genstat.co.uk.
- Wang, E., Robertson, M.J., Hammer, G.L., Carberry, P.S., Holzworth, D., Meinke, H., Chapman, S.C., Hargreaves, J.N.G., Huth, N.I., McLean, G., (2002). Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM. *Eur. J. Agron.* 18, 121–140.
- De Wet, J M J; Huckabay, J. P. (1967): ‘The origin of sorghum bicolor. II. Distribution and domestication’, *Evolution*, 21, pp. 787–802.
- Yang, Z., Sinclair, TR, Zhu, M., Messina, CD., Cooper, M., Hammer, GL. (2012). Temperature effect on transpiration response of maize plants to vapour pressure deficit. *Environmental and Experimental Botany*. Elsevier B.V., 78, pp. 157–162. doi: 10.1016/j.envexpbot.2011.12.034.
- Youness, S., et Amar, A. (2010). Impact de l'adoption des indices Masi et Madex sur la capitalisation boursière de la bourse de Casablanca : utilisation de la régression segmentée. *Rapport de stage*, 2010. Université Hassan II.
- Zaman-allah, M., Jenkinson, D. M. and Vadez, V. (2011): ‘This is author version post-print archived in the official institutional repository of the ICRISAT www.icrisat.org’, 38(4), pp. 270–281.
- Zouina, K. (2014): *Etat hydrique du sol et performance d’une collection de variétés de blé dur*. Université Ferhat Abbas Sétif 1.

ANNEXES

Annexe 1: Experiment data set used for traits parameterization. SD: sowing dates; Dens: sowing density.

Genotypes	Steps	Treatments	Sowing year	Design used	Measured traits	Source
CSM63E	Parameterization	Staggered sowing	2000	split-plot	Pheno-phases, height, leaf number appeared, emerged, scenessed, dry masses per organ, leaf area and the specific mass of each leaf stage, grain and biomass yield	Clerget Reports 2000-2008
		Staggered validation	2001	split-plot	Pheno-phases, total leaf number, grain and biomass yield	Clerget Reports 2000-2009
		Staggered sowing densities	2007	split-plot	Pheno-phases, height, leaf number appeared, number of tiller, total leaf number, grain and biomass yield	Clerget Reports 2000-2010
		Staggered irrigation	2008		Pheno-phases, fresh and dry masses per organ, length from the first node, number of primary branches, grain and biomass yield	Clerget Reports 2000-2011
CSM335	Parameterization	Staggered sowing	2000	split-plot	Pheno-phases, height, leaf number appeared, emerged, scenessed, dry masses per organ, as well as the surface and the specific mass of each leaf stage, grain and biomass yield	Clerget Reports 2000-2012
		Staggered sowing	2001	split-plot	Pheno-phases, total leaf number, grain and biomass yield	Clerget Reports 2000-2013
		Staggered sowing densities	2003	split-plot	Pheno-phases, dry masses per organ, , grain and biomass yield	Clerget Reports 2000-2014
		Staggered sowing	2007	split-plot	Pheno-phases, dry masses per organ, , grain and biomass yield	Clerget Reports 2000-2015
IS15401	Parameterization	Staggered sowing densities	2008	split-plot	Pheno-phases, dry masses per organ, , grain and biomass yield	Clerget Reports 2000-2016
		Staggered sowing	2000	split-plot	Pheno-phases, height, leaf number appeared, emerged, scenessed, dry masses per organ, leaf area and the specific mass of each leaf stage, grain and biomass yield	Clerget Reports 2000-2017

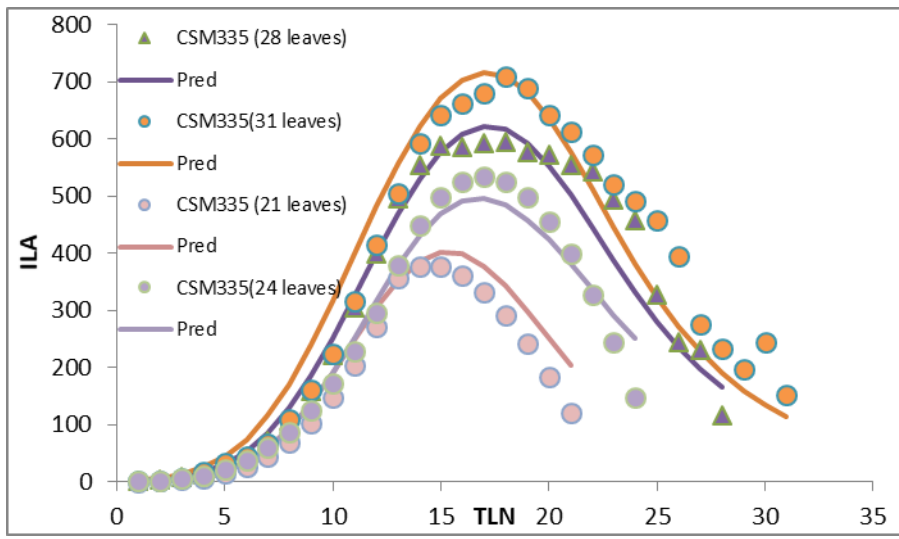
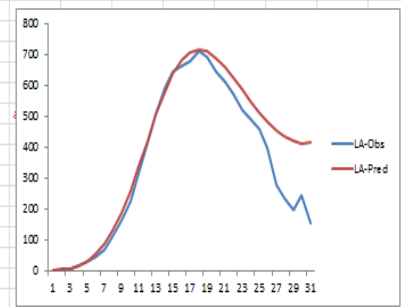
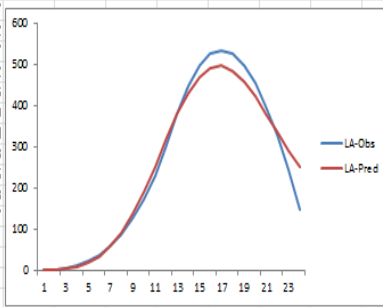
		Staggered validation	2001	split-plot	Pheno-phases, total leaf number, grain and biomass yield	Clerget Reports 2000-2018
		Staggered irrigation	2008		Pheno-phases, fresh and dry masses per organ, length from the first node, number of primary branches, grain and biomass yield	Clerget Reports 2000-2019
CSM63E	Evaluation	Staggered sowing	2013	split-plot	Pheno-phases, height, leaf number appeared, number of tiller, total leaf number, dry masses per organ, LAI, stem diameter, grain and biomass yield	Akinseye et al (2017)
		Staggered sowing	2014	split-plot	Pheno-phases, height, leaf number appeared, number of tiller, total leaf number, dry masses per organ, LAI, stem diameter, grain and biomass yield	
CSM335	Evaluation	Staggered sowing	2013	split-plot	Pheno-phases, height, leaf number appeared, number of tiller, total leaf number, dry masses per organ, LAI, stem diameter, grain and biomass yield	Akinseye et al (2017)
		Staggered sowing	June	split-plot	Pheno-phases, height, leaf number appeared, number of tiller, total leaf number, dry masses per organ, LAI, stem diameter, grain and biomass yield	

Annexe 2 : Frequency of occurrence of the 3 stress scenarios (and grain yield kg ha⁻¹) across isohyets for CSM335 and CSM63E. WSD 1: Water supply and demand ratio 1 (“no stress”); WSD 2: early pre-flowering terminal stress; WSD 3: at-flowering stress.

Genotypes	Stress scenarios	<400	400-600	600-800	800-1000	>1000
CSM335	WSD 1	4.8 (440.4)	61.1 (808.2)	99.0 (816.7)	98.8 (815.2)	1.0 (781.4)
	WSD 2	74.2 (167.9)	18.2 (405.2)	0.2 (425.2)	0.3 (112.9)	
	WSD 3	21.0 (330.4)	20.7 (741)	0.9 (739.9)	1.0 (467)	
Mean		312.9	651.5	660.6	465.1	781.4
CSM63E	WSD 1	25.8 (1219.9)	90.4 (1469.8)	99.8 (1235.8)	99.0 (1187.4)	99.6 (1161)
	WSD 2	41.9 (430)	3.2 (775)			0.4 (547)
	WSD 3	32.3 (992.3)	6.4 (1278.9)	0.2 (1303.7)	1.0 (1083.7)	
Mean		880.8	1174.6	1269.8	1135.5	854.0

Annexe 3: L'approche ILA n'arrivant pas à prédire la surface foliaire des variétés produisant plus de 27 feuilles

K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI
CSM335	05-Jul	AL_2000	Fig 8.xls	double	a0	-0.009	FLN	24				CSM335	Sowing d	AL_2001	Fig 1-5	double	a0	-0.009	FLN	31				
LeafNo	LA-Obs	LA-Pred			a1	-0.2						LeafNo	LA-Obs	LA-Pred			a1	-0.2						
1	0.169	0.7491	0.3365		b0	0.0006						1	0.9311	1.5543	0.3883		b0	0.0006						
2	1.3578	1.8834	0.2762		b1	-0.43						2	1.983	3.6488	2.775		b1	-0.43						
3	4.5342	4.3508	0.0532		a	-0.017						3	5.7533	7.9112	4.6564		a	-0.011						
4	10.909	9.2665	2.6398		b	0.0006						4	15.826	15.898	0.0052		b	0.0006						
5	21.337	18.258	3.4812	params	aMaxA	182.8198	not used for calculation					5	31.836	29.72	4.473	params	aMaxA	182.8198	not used for calculation					
6	36.912	33.391	12.393		a'0	0.698264	optimized					6	44.594	51.865	52.863		a'0	0.580867	optimized					
7	58.671	56.88	3.2048		aMaxB	0.4						7	66.715	84.801	327.1		aMaxB	0.4						
8	87.651	90.554	8.4264		aMaxC	13.95						8	109.68	130.37	428.19		aMaxC	13.95						
9	124.89	135.19	106.06	fn	aMax	173.54	150.1	maxLAleaf=3.1981TLN+73.308				9	161.4	189.14	769.64	fn	aMax	182.62	172.4	maxLAleaf=3.1981TLN+73.308				
10	171.43	189.31	341.56	fn	x0	16.758	497	maxLAleaf=31.369x - 255.87				10	223.96	259.88	1289.9	fn	x0	18.007	716.6	maxLAleaf=31.369x - 255.87				
11	228.31	251.89	556									11	316.48	339.38	524.61									
12	296.57	316.51	397.83									12	415.35	422.76	54.899									
13	373.4	378.07	1.7667									13	504.73	504.15	0.3335									
14	448.8	430.77	325.06									14	591.52	577.61	193.46									
15	496.98	469.75	741.37									15	642.68	638.09	21.028									
16	525	491.96	1091.2									16	663.08	682.13	362.67									
17	533.89	496.49	1398.7									17	680.15	708.17	785.03									
18	524.7	484.48	1617.2									18	709.29	716.57	52.991									
19	498.47	458.69	1582.6									19	689.75	709.23	379.54									
20	456.25	422.77	1120.9									20	642.98	689.11	2127.3									
21	399.07	380.64	340.01									21	612.48	659.65	2225.4									
22	328	335.91	62.533									22	571.92	624.35	2748.3									
23	244.07	291.55	2254.5									23	520.89	586.39	4290.8									
24	148.32	249.72	10283									24	492.27	548.47	3158.6									
Sum	6025.7	5999.6	22257									Sum	10671	12305	247599									



13,38 23,46 3,51 4,7

Annexe 4: Analyse de variance des effets combinés des pratiques culturales sur les rendements en grains de CSM335

Sources de variation	ddl	Somme des carrés des écarts (SCE)	Carré moyen	Test F	Prob. F
Rep stratum	2	1142883	571441	4,37	
Semis	2	398993323	199496661	1525,89	<0,001
Engrais	3	26185743	8728581	66,76	<0,001
Densité	2	11693571	5846786	44,72	<0,001
Génotype	2	139029063	69514532	531,69	<0,001
Semis × Engrais	6	6224701	1037450	7,94	<0,001
Semis × Densité	4	2351190	587797	4,50	0,002
Engrais × Densité	6	1641026	273504	2,09	0,055
Semis × Génotype	4	62601032	15650258	119,70	<0,001
Engrais × Génotype	6	2652296	442049	3,38	0,003
Densité × Génotype	4	161418	40354	0,31	0,872
Semis × Engrais × Densité	12	12	1658005	138167	1,06
Semis × Engrais × Génotype	12	1931824	160985	1,23	0,263
Semis × Densité × Génotype	8	702244	87780	0,67	0,716
Engrais × Densité × Génotype	12	2980440	248370	1,90	0,036
Semis × Engrais × Densité × Génotype	24	24	2224341	92681	0,71
Résiduel	214	27978670	130741		
Total	323	690151769			

Ddl : Degré de liberté