

Université Assane Seck de Ziguinchor



UFR Sciences et Technologies

Département d'Agroforesterie

Mémoire de Master

Spécialité : Aménagement et Gestion Durable des Écosystèmes Forestiers et
Agroforestiers

Sujet :

**Evaluation de l'effet de la carence du sol en macronutriments
(N, P, K) sur la croissance et le rendement de *Zea mays. L* à
Sédhiou (Séfa).**

Présenté par

Paul Djamalyeugh BADIANE

Sous la supervision de **Dr. Mohamed Mahamoud CHARAHABIL**, Maitre de conférences,
UASZ

Encadreurs : **Dr Antoine SAMBOU**, Assistant, UASZ et **Dr Moussa N'DIENOR**,
Chercheur à l'ISRA/LNRPV

Soutenu publiquement le 19 Mai 2021 devant le jury composé de :

Président	Dr Ngor NDOUR	Maitre de conférences	UASZ
Membres	Dr Ismaïla COLY	Maitre-Assistant	UASZ
	Dr Ousmane Ndiaye	Maitre-Assistant	UASZ
	Dr Joseph Saturnin DIEME	Assistant	UASZ
	Dr Antoine Sambou	Assistant	UASZ
	Dr Abdoulaye Badiane	Chercheur	ISRA

Année universitaire 2019-2020

DEDICACES

Tout d'abord je rends grâce à Dieu, le tout puissant, pour la santé et la force qu'il m'a accordé pour réaliser ce travail.

Je dédie ce Mémoire à :

- Ma mère Élisabeth MANGA et mon défunt père Jean Pierre BADIANE pour tous le soutien moral et matériel, les innombrables sacrifices consentis pour mon éducation, les prières et encouragements depuis le cycle élémentaire jusqu'à l'université.
- Mes frères et sœurs pour l'amour, la tolérance, la paix dans lesquels nous avons vécu et les assistances qu'ils m'ont gracieusement accordées.
- Toute personne qui de près ou de loin m'a assisté dans ma vie.

REMERCIEMENTS

Par la grâce de Dieu, je tiens à exprimer ma sincère et profonde gratitude à :

- Dr. Antoine SAMBOU, enseignant-chercheur au département d'Agroforesterie de l'UASZ pour les conseils et pour l'encadrement,
- Dr. Moussa N'DIENOR, chercheur à l'ISRA/LNRPV pour son soutien et encadrement,
- Dr. Hakim BOULAL, directeur du programme APNI Afrique du Nord.

Toute notre reconnaissance va à l'endroit du Chef du Département Dr. Ousmane NDIAYE avec tous les autres enseignants-chercheurs et vacataires en l'honneur du Dr. Ngor NDOUR, Dr. Mohamed Mahamoud CHARAHABIL, Dr. Siré DIEDHIOU, Dr. Djibril SARR, Dr. Ismaïla COLY, Dr. Aly DIALLO, Dr. Boubacar CAMARA, Dr. Joseph Saturnin DIEME, Dr. Maurice DASYLVA, Dr. Arfang GOUDIABY, Dr. Abdoul Ader DIEDHIOU, Dr. Seydou NDIAYE, Pr. Daouda NGOM, Dr. Pape Ibrahima DJIGALI pour la qualité de la formation.

Mes remerciements vont à l'endroit de :

- tous les doctorants du département d'agroforesterie, à mes camarades de promotion pour le soutien.
- l'équipe technique du côté de Séfa qui m'a accompagné durant toute la phase de terrain.
- Lucien DIAMACOUNE, Omar CISSE.
- Papis DIATTA, Vieux BADJI et Fulgence BADIANE pour le soutien
- Habib DIEDHIOU, Ibrahima BASSENE.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

ACP : Analyse en Composantes Principales

AE : Efficacité Agronomique

ANOVA : Analysis of variance (Analyse de Variance)

ANSD : Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie

APNI : African Plant Nutrition Institute

ASS : Afrique sub-saharienne

CEC : Capacité d'Echange Cationique

ISRA : Institut Sénégalais de Recherches Agricoles

JAS : Jour Après Semis

MS : Matières Sèches

MO : Matières Organiques

NE : Nutrient Expert

NPF : Nombre de Plants Fleuris

NPK : Azote, Phosphore, Potassium

NPT : Nombre de Plants Total

RVC : Ratio Valeur Coût

T0 : traitement témoin

T1 = -N : traitement avec omission de l'azote

T2 = -P : traitement avec omission du phosphore

T3 = -K : traitement avec omission du potassium

T4 = +NPK : traitement NPK

T5=FFP : Farmer Fertilizer Practice

T6 = ST : soil testing

T7 = SSNM : Site Spécifique Nutrient Management

T8 = TR : traitement recommandé

50%FF : 50 % de Floraison Femelle

50%FM : 50 % de Floraison Male

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS.....	ii
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	iii
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX	viii
RESUME.....	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	3
1.1. Généralités sur le maïs	3
1.1.1. Origine et systématique	3
1.1.2. Caractéristiques botaniques.....	3
1.1.3. La culture du maïs au Sénégal	4
1.1.4. Contraintes de la culture de maïs	5
1.1.4.1. Variabilités climatiques	5
1.1.4.2. Baisse de la fertilité des sols.....	5
1.1.4.3. Maladies et ravageurs	6
1.1.4.4. Mauvaises herbes.....	6
1.2. Généralités sur la fertilisation	7
1.2.1. La fertilisation minérale	7
1.2.2. Méthodes de calcul des doses d'engrais	7
1.2.2.1. Le bilan prévisionnel	7
1.2.2.2. La courbe de réponse	7
1.2.3. La fertilisation du maïs.....	8
1.2.3.1. Rôle agronomique des macronutriments	9
1.2.3.2. Carence en macronutriments	9

1.2.3.3. Excès de macronutriments.....	10
CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES	11
2.1. Présentation de la zone d'étude.....	11
2.2. Description du <i>Nutrient Expert</i>.....	12
2.3. Matériel végétal	13
2.4. Traitements et doses d'engrais correspondantes.....	14
2.5. Dispositif expérimental	15
2.6. Conduite de l'essai.....	16
2.6.1. Préparation du sol.....	16
2.6.2. Semis.....	16
2.6.3. Fertilisation.....	16
2.6.4. Entretien	18
2.7. Paramètres mesurés	18
2.7.1. Caractérisation du sol.....	18
2.7.2. Paramètres de croissance et de rendement.....	18
2.8. La réponse de rendement aux nutriments, N, P et K (Yield response)	20
2.9. Efficacité agronomique	20
2.10. Analyse économique	21
2.11. Traitement et analyse de données	21
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION.....	22
3.1. Résultats	22
3.1.1. Caractéristiques du sol	22
3.1.2. Paramètres de croissance des plants de maïs	23
3.1.2.1. Hauteur des plants de maïs	23
3.1.2.2. Nombre de feuilles des plants de maïs au 79 ^{ème} JAS	24
3.1.2.3. Stade 50% floraison mâle et femelle	25
3.1.3. Paramètres du rendement.....	25

3.1.4.	Rendements du maïs	27
3.1.5.	Relation entre le rendement grains et ses composantes	29
3.1.6.	La réponse de rendement aux nutriments N, P et K	33
3.1.7.	Efficacité agronomique	33
3.1.8.	Analyse économique	34
3.2.	Discussion	34
3.2.1.	Caractéristiques du sol	34
3.2.2.	Effet des traitements sur les paramètres de croissance des plants de maïs	35
3.2.3.	Effet des traitements sur les composantes du rendement	35
3.2.4.	Effet des traitements sur le rendement du maïs	36
3.2.5.	La réponse au rendement des nutriments	37
3.2.6.	L'efficacité agronomique	38
3.2.7.	Rentabilité des engrais	38
	Conclusion et perspectives	39
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	40

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : les différentes parties du maïs (Source : www.wikipedia.com consulté le 18/04/2020)	4
Figure 2 : évolution de la superficie, de la production et du rendement du maïs au Sénégal. Source : DAPSA, 2019.....	4
Figure 3 : carte représentative des zones agro-écologiques du Sénégal (Source : www.wikipedia.com consulté le 18/04/2020).....	9
Figure 4 : Signes de carence en macronutriment (Source : Béroubé, 2015)	10
Figure 5 : localisation de la zone d'étude	11
Figure 6 : Précipitation de la région de Sédhiou des années 2018 et 2019	12
Figure 7 : Interface du Nutrient Expert	13
Figure 8 : schéma du dispositif expérimental.....	15
Figure 9 : délimitation de la parcelle après préparation du sol.....	16
Figure 10 : épandage d'engrais.....	17
Figure 11 : prélèvement de sol avec une tarière	18
Figure 12 : dispositif de récolte	20
Figure 13 : Evolution de la hauteur des plants de suwan-1 (a) et de Panar (b).....	23
Figure 14 : rendement paille de Suwan-1 (A) et Panar (B).....	28
Figure 15 : rendement grains de Suwan-1 (A) et Panar (B).....	29
Figure 16 : relation entre le rendement grains et ses composantes	32
Figure 17 : Réponse du rendement aux nutriments N, P et K	33

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : les sols du Sénégal (Source : INP, 2013)	6
Tableau 2 : Traitements et doses d’engrais correspondantes pour SUWAN-1	14
Tableau 3 : Traitements et doses d’engrais correspondantes pour Panar.....	15
Tableau 4 : dates des apports d’engrais.....	17
Tableau 5 : Caractéristiques physico-chimiques du sol	22
Tableau 6 : effets des traitements sur la hauteur des plants de maïs au 79ème JAS.....	24
Tableau 7 : effet des traitements sur le nombre de feuilles des plants de maïs.....	24
Tableau 8 : effet des traitements sur les dates de50% floraison mâle et femelle des plants de maïs	25
Tableau 9 : effet des traitements sur les composantes du rendement de la variété Suwan_1 ..	26
Tableau 10 : effet des traitements sur les composantes du rendement de la variété Panar.....	27
Tableau 11 : matrice de corrélation des paramètres de croissance, de rendement et le rendement de la variété suwan	30
Tableau 12 : matrice de corrélation des paramètres de croissance, de rendement et le rendement de la variété Panar	31
Tableau 13 :Efficacités agronomique des engrais.....	34
Tableau 14 : ratio valeur coût.....	34

RESUME

Zea mays L. (maïs) est une céréale importante au Sénégal à la fois pour l'alimentation humaine mais aussi celle du bétail. Cependant, ses rendements restent encore faibles. Ainsi la faible fertilité des sols et la mauvaise gestion des nutriments sont une des causes de ces faibles rendements. Une fertilisation déséquilibrée entraîne un mauvais développement de la plante et par conséquent un mauvais rendement. Ainsi il s'avère nécessaire donc d'optimiser la fertilisation afin d'améliorer la production et le revenu des agriculteurs tout en réduisant l'impact sur l'environnement. Cette étude a été conduite à la station de recherche de l'ISRA à Séfa et a pour objectif d'intensifier la production du maïs par une utilisation optimale des engrais minéraux et à faible impact environnemental. Pour ce faire, deux variétés de maïs (Suwan-1 et Panar) ont été utilisées. Un dispositif expérimental en split plot composé de quatre répétitions a été installé avec les facteurs fertilisants et variétés. Le facteur fertilisant a été composé de neuf niveaux : sans engrais (T0), engrais sans azote(T1), engrais sans phosphore (T2), engrais sans potassium (T3), engrais complet NPK (T4) ou les trois éléments N, P et K sont apportés, « *Farmer Fertilizer Practice* » (FFP) (T5), « *soil testing* » (ST), (T6), « *Site Spécifique Nutrient Management* » (SSNM) (T7) proposé par l'outil *Nutrient Expert* (NE) comme traitement optimisé et le traitement recommandé (TR) (T8). Les doses d'engrais varient suivant les variétés. Chaque parcelle élémentaire avait une superficie de 36m². Les traitements sans N, P ou K ont été utilisés pour évaluer la carence du sol en ces nutriments. Les paramètres agro-morphologiques du maïs (hauteur, nombre de feuilles), l'efficacité agronomique et la rentabilité des engrais ont été évalués. Les résultats ont montré que l'azote est le nutriment le plus limitant suivi du phosphore et du potassium. En effet, les omissions de N, de P et de K ont entraîné des pertes de rendement qui varient de 0,99t/ha à 1,76 t/ha. Le rendement en grains le plus important a été noté sur le traitements T4 pour toutes les variétés. Le traitement T7 (SSNM) du *Nutrient expert* a eu un rendement grains (1,57 et 2,09 t/ha respectivement pour suwan_1 et panar) plus important que le traitement T5 (1,17 et 1,37 t/ha respectivement pour suwan_1 et panar) avec une différence de 400 kg/ha pour la variété Suwan-1 et 720 kg/ha pour la variété Panar. De plus, Le traitement T7 a eu une efficacité agronomique plus importante que le traitement T5. L'analyse économique a montré que les traitements T8 et T5 avec des ratios valeur/cout respectif de 5,4 et 4,5 sont plus rentables respectivement sur Suwan-1 et Panar. Le traitement T7 semble être plus performant que le T5 sur les paramètres de croissance, les paramètres de rendement et sur le rendement paille et grains.

Mots clés : *Zea mays*, variétés, fertilisants, rendement, grains

ABSTRACT

Zea mays L. (maize) is an important cereal in Senegal both for human food and for livestock. However, its yields are still low. Thus, low soil fertility and poor nutrient management are one of the causes of these low yields. Unbalanced fertilization leads to poor plant development and consequently poor yield. Thus it is necessary to optimize fertilization in order to improve the production and income of farmers while reducing the impact on the environment. This study was conducted at the ISRA research station in Sefa and aims to intensify maize production through optimal use of mineral fertilizers and low environmental impact. To do this, two varieties of corn (Suwan-1 and Panar) were used. An experimental split plot device composed of four repetitions was installed with the fertilizing factors and varieties. The fertilizer factor was composed of nine levels: fertilizer-free (T0), nitrogen-free fertilizer (T1), phosphorus-free fertilizer (T2), potassium-free fertilizer (T3), complete fertilizer NPK (T4) or the three elements N, P and K are provided, "Farmer Fertilizer Practice" (FFP) (T5), "soil testing" (ST), (T6), "Site Spécifique Nutrient Management" (SSNM) (T7) proposed by the Nutrient Expert tool (NE) as an optimized treatment and recommended treatment (TR) (T8). Fertilizer doses vary from variety to variety. Each elementary plot had an area of 36m². Treatments without N, P or K have been used to assess soil deficiency of these nutrients. The agro-morphological parameters of the maize (height, number of leaves), agronomic efficiency and the profitability of fertilizers were evaluated. The results showed that nitrogen is the most limiting nutrient followed by phosphorus and potassium. Indeed, the omissions of N, P and K led to yield losses that ranged from 0.99t/ha to 1.76 t/ha. The highest grain yield was noted on the T4 treatments for all varieties. The T7 treatment (SSNM) of the Expert Nutrient had a higher grain yield (1.57 and 2.09 t/ha respectively for suwan_1 and panar) than the T5 treatment (1.17 and 1.37 t/ha respectively for suwan_1 and panar) with a difference of 400 kg/ha for the Suwan-1 variety and 720 kg/ha for the Panar variety. In addition, the T7 treatment had a greater agronomic efficacy than the T5 treatment. Economic analysis has shown that T8 and T5 treatments with value-to-cost ratios of 5.4 and 4.5 respectively are more cost-effective on Suwan-1 and Panar respectively. The T7 treatment appears to be more efficient than the T5 on growth parameters, yield parameters and on straw and grain yield.

Keywords: *Zea mays*, varieties, fertilizers, yield, grain

INTRODUCTION

Zea mays L. (maïs) est la plante la plus cultivée au monde et la première céréale produite devant le blé (Tahir et *al.*, 2009). Avec 200 millions de tonnes produites en 1961, la production mondiale du maïs a atteint environ 712 millions de tonnes en 2005 (Yannick et *al.*, 2014). En Afrique sub-saharienne (ASS), dans cette région, le maïs reste la culture alimentaire de base la plus largement pratiquée. Elle couvre plus de 33 millions d'hectares chaque année (Macauley et *al.*, 2015). La culture couvre presque 17 % des quelques 200 millions ha de terres cultivées. On estime que plus de 300 millions de personnes en ASS dépendent du maïs comme source d'alimentation et de subsistance (Macauley et *al.*, 2015). Les rendements moyens régionaux peuvent atteindre 1,7 t/ha en Afrique de l'Ouest et 1,5 t/ha en Afrique de l'Est et 1,1 t/ha en Afrique australe (Smale et *al.*, 2011). Au Sénégal, le maïs est la troisième céréale la plus produite après le mil et le riz (DAPSA, 2019). Il est principalement cultivé dans les zones Centre, Sud et Est du Sénégal (Sine-Saloum, Casamance et Sénégal Oriental). Cette céréale est également cultivée dans la Vallée du Fleuve Sénégal, essentiellement lors des périodes de décrue (ISRA, 2008). La superficie emblavée par le maïs au niveau national a sensiblement augmenté passant respectivement entre 2013/2014 et 2018/2019 de 156576 ha à 250891 ha avec des rendements respectifs de 1,44 et 1,93 t/ha (DAPSA, 2019).

Malgré l'importance du maïs, cette culture est menacée par des rendements faibles. Les principaux facteurs responsables de ces faibles rendements sont la gestion inadéquate de la nutrition des plantes et la faible fertilité du sol (Useni et *al.*, 2013). Face à cette situation, l'utilisation de la matière organique est suggérée (Ilunga et *al.* 2015 et Ilunga et *al.*, 2016). Le souci avec cette technique est que la libération des éléments par la matière organique est progressive et lente et leur utilisation requiert de grande quantité, ce qui limite leur usage (Bot et Benites, 2005). De plus, cette ressource organique reste limitée dans les exploitations agricoles. C'est ainsi que d'autres études se sont orientées vers l'utilisation des engrais minéraux (Nyembo et *al.*, 2012 ; Nyembo et *al.*, 2013 ; Nyembo et *al.*, 2015 ; Useni et *al.*, 2012 ; Useni et *al.*, 2013) où une meilleure productivité des cultures est souvent indiquée (Nyembo et *al.*, 2012). Toutefois, les agriculteurs ont peu accès aux engrais en raison de leur cherté. Ainsi, la quantité d'engrais utilisée par les agriculteurs est peu suffisante en raison de difficultés économiques. Optimiser les apports d'engrais est donc une façon de minimiser les risques d'une mauvaise efficacité de l'engrais (Dupriez et Leener, 1983) limitant ainsi les pertes qui peuvent être dommageables pour l'environnement tout en améliorant la productivité des cultures. Par conséquent, pour assurer une efficacité optimale des engrais, la période d'apport de celles-ci et les quantités nécessaires doivent être choisies de telle sorte que le maximum d'éléments soit

utilisé par la plante. C'est-à-dire apporter les engrais au moment où la plante en a le plus besoin. Ceci est important pour les éléments mobiles tels que l'azote qui est facilement lessivé s'il n'est pas prélevé par les plantes.

En Afrique sub-saharienne, une analyse de la situation sur la sécurité alimentaire montre un écart croissant entre les besoins de consommation et les disponibilités alimentaires. Cette situation entraîne une malnutrition et une sous-alimentation marquée (Dembele, 2001). D'ici 2050, cette situation pourrait s'aggraver suite à un accroissement très important de la population dans cette région (Lutz et *al.*, 2001 ; Ezeh et *al.*, 2012). Augmenter la production de maïs reste donc une possibilité de lutter contre l'augmentation du taux de pauvreté et de sous-alimentation (Hugues et *al.*, 2018).

C'est dans cette optique que s'oriente cette présente étude avec pour objectif global d'intensifier la production du maïs par une utilisation optimale des engrais minéraux et à faible impact environnemental basé sur le *Nutrient Expert*. Spécifiquement, il s'agit d'évaluer l'effet de la carence du sol en macronutriments, l'efficacité agronomique des engrais et la performance des variétés.

Le présent mémoire comprend trois (03) chapitres. Le premier chapitre est consacré à la synthèse bibliographique qui traite des généralités sur le maïs et la fertilisation. Le deuxième chapitre présente le matériel et méthodes utilisés dans la conduite de l'étude. Le troisième chapitre est consacré aux résultats et discussions suivis d'une conclusion.

CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Généralités sur le maïs

1.1.1. Origine et systématique

Zea mays L. (maïs) est originaire de l'Amérique centrale plus précisément des hauts plateaux mexicains où de nombreux échantillons témoignent de sa présence à plus de 5000 ans avant Jésus-Christ. (Gay, 1984 ; Rouanet, 1984). Après avoir été portée en Espagne, la culture du maïs s'est répandue dans toute l'Europe Méridionale. Elle a été introduite par la suite en Afrique et en Asie (Vandenput, 1981).

Selon la classification phylogénétique APG 3, *Zea mays* est une plante herbacée tropicale annuelle qui appartient à la classe des monocotylédones, la sous-classe des *Commelinidae*, l'ordre des Cypéales, la famille des *Poaceae* (ou Graminées), la sous-famille des *Panicoideae* et au genre *Zea* (Bambara, 2012).

1.1.2. Caractéristiques botaniques

La plante de maïs a une taille qui varie généralement de 1 à 3 m pour les variétés couramment cultivées. Elle se compose d'une tige unique, de gros diamètre, pleine, lignifiée et formée de plusieurs entre-nœuds d'une vingtaine de centimètres, séparés par des nœuds (Figure 1). Au niveau de chaque nœud, de manière opposée, s'insèrent les feuilles à limbe allongée et à nervure parallèle (Bambara, 2012). Le maïs est une espèce à pollinisation croisée dont les inflorescences femelles (épis) et les inflorescences mâles (panicules) sont disposées à des endroits distincts sur la plante. Les épis, souvent à raison d'un épi par tige sont formés d'un nombre variable de rangées de grains (de 12 à 16), qui fournissent entre 300 à 1000 grains. Le grain de maïs est formé d'un embryon, d'un tissu de réserve, l'albumen et d'une enveloppe fine et translucide, le péricarpe. Les épis de maïs peuvent présenter une diversité de couleur, de forme et de taille. Le maïs a un système racinaire traçant qui prélève l'eau et les nutriments nécessaire à la plante dans les couches les plus superficielles du sol. Le développement du maïs nécessite une température optimale d'environ 30 à 34°C dans les basses terres et moyennes altitudes. Cette température est d'environ 21°C pour les hautes terres (Ellis *et al.*, 1992). Il est cultivé entre 750 à 1750 mm d'eau par an. Le maïs peut pousser sur tout type de sols à condition que ces sols soient sains et profonds mais de préférence les sols assez riches en éléments fins, humifères, frais et à capacité de rétention élevée. Il pousse normalement sur des sols de pH compris entre 5,5 et 7. Cependant, sa croissance est limitée sur la plupart des sols acides tropicaux par la toxicité de l'aluminium (Sanchez *et al.*, 1997).

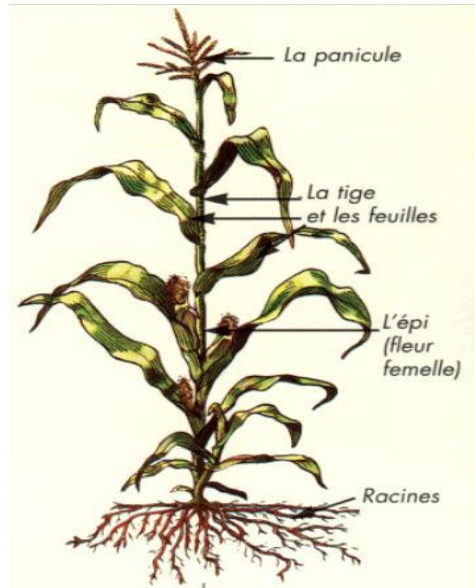


Figure 1 : les différentes parties du maïs (Source : www.wikipedia.com consulté le 18/04/2020)

1.1.3. La culture du maïs au Sénégal

La production de maïs à l'échelle nationale est faible avec 500000 tonnes produites en 2019. Elle n'arrive pas à couvrir les besoins de consommation des populations. La surface emblavée, la production et le rendement à l'hectare ont sensiblement augmenté ces dernières années (Figure 2). Au Sénégal, le maïs est essentiellement utilisé pour l'alimentation humaine mais aussi pour le bétail. Toutefois, il est aussi utilisé en vert après avoir été grillé, le reste est transformé en farine et consommé sous forme de bouillies et couscous. La consommation moyenne de maïs est estimée à 9,2 kg/tête/an au niveau national. Mais cette valeur est inférieure à la moyenne des zones rurales, équivalente à 19,5 kg/tête/an et supérieure à celle estimée au niveau urbain, égale à 6 kg/tête/an (IPAR, 2017).

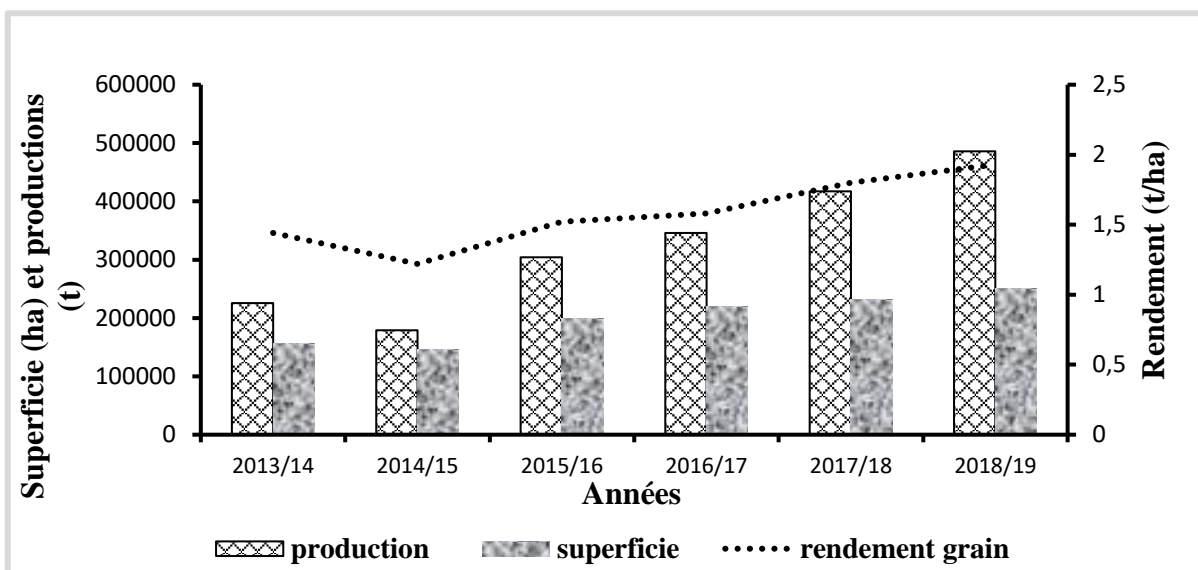


Figure 2: évolution de la superficie, de la production et du rendement du maïs au Sénégal. Source : DAPSA, 2019

1.1.4. Contraintes de la culture de maïs

1.1.4.1. Variabilités climatiques

L'agriculture mondiale est confrontée à l'impact probable du réchauffement planétaire. Des études récentes montrent que la production de produits majeurs a décliné depuis 1980 à cause du réchauffement planétaire (Macauley et *al.*, 2015). On estime que, face aux tendances actuelles du réchauffement climatique en Afrique sub-saharienne, la production de céréales majeures pourrait décliner jusqu'à 20 % d'ici le milieu du siècle (Macauley et *al.*, 2015). Le maïs étant cultivé en grande partie sous pluie, alors sa production risque d'être plus impactée avec le réchauffement climatique à cause de la baisse des pluies (Doztsi, 2002). La période de sécheresse la plus critique du maïs est de 5 jours avant la floraison femelle (Kambire et *al.*, 2010). Durant cette période critique, la plante absorbe 45% des besoins en eau. Donc un stress hydrique à cette période peut entraîner des pertes de rendement qui peuvent atteindre 60% (CIMMYT, 1991).

1.1.4.2. Baisse de la fertilité des sols

Le Sénégal a une diversité de sols avec 3,8 millions d'ha de terres arables soit une proportion de 19% du territoire national (INP, 2013). Les sols ferrugineux tropicaux sont les plus présents avec une proportion de 33,98% suivi des lithosols (21,12%), des sols hydromorphes (10,8%) (Tableau 1). La baisse de la fertilité des sols devient de plus en plus marquante par l'absence de jachère. Au Sénégal, la baisse de la fertilité des sols est due en plus de l'absence de la jachère, à l'érosion hydrique, à la salinisation des terres et l'érosion éolienne mais aussi à la culture continue avec peu ou pas de restitution. Il est noté également une forte pression foncière qui est surtout causée par la forte croissance démographique. Cette situation de baisse de fertilité des sols se fait sentir par la baisse de la production arachidière et céréalière (CILSS, 2000).

Tableau 1 : les sols du Sénégal (Source : INP, 2013)

Type de sols	Proportion (%)
Sols ferrugineux tropicaux	33,98
Lithosols	21,12
Sols hydromorphes	10,80
Régosols	8,06
Sols peu évolués	7,65
Sols bruns rouges	6,08
Sols ferralitiques	5,71
Sols halomorphes	2,86
Vertisols	1,63
Sols bruns subarides	0,63
Sols minéraux bruts	0,27

1.1.4.3. Maladies et ravageurs

Les maladies causées par des champignons, des bactéries, des virus entraînent d'importantes pertes de rendement au champ. Le Mildiou peut causer des pertes de rendement pouvant atteindre 80% (CIMMYT, 2000).

Les lépidoptères foreurs (*Sesamia calamistis* Hampson, ...) et défoliateurs (*Spodoptera exigua* Hübner, ...) du maïs sont de loin les ravageurs les plus préjudiciables en raison principalement de leur biologie particulière (développement à l'intérieur de la tige) et de leur comportement migratoire. En plus des lépidoptères, il y'a les coléoptères (*Pachnoda interrapyta* Olivier, ...), les termites (*Microtermes* sp.) et les acridiens (*Hieroglyphus daganensis* Krauss, ...) qui causent d'énormes dégâts sur la culture de maïs. Tous les organes du maïs (racines, tige, feuilles, panicules et épis) sont attaqués. Ces ravageurs peuvent causer des baisses de production de 15 à 35% en hivernage et de 5 à 10% en saison sèche et froide (Goebel, 1995). Ces dernières années, il a été noté une apparition de chenilles légionnaires. Ces chenilles causent des dégâts importants sur le maïs (DAPSA, 2019).

1.1.4.4. Mauvaises herbes

La compétition des mauvaises herbes avec les cultures pour l'eau, les nutriments, la lumière entraîne d'importantes pertes de rendement (Doztsi, 2002). Dans les savanes nigérianes, les mauvaises herbes causent des pertes de rendement de 92% de la production (Bambara, 2012). Le striga est une véritable peste en Afrique subsaharienne où il peut entraîner chaque année un manque à gagner correspondant à 7 milliards de dollar US à l'économie africaine (Bambara, 2012).

1.2. Généralités sur la fertilisation

1.2.1. La fertilisation minérale

Les plantes prélèvent les éléments minéraux du sol pour produire les composés organiques. Pour pouvoir être absorbés par la plante, les éléments nutritifs doivent être présents sous une forme assimilable. La fertilisation minérale apporte donc le complément nécessaire à la fourniture du sol en éléments nutritifs en vue de répondre aux besoins physiologiques et d'optimiser la croissance et le développement des plantes. L'objectif de la fertilisation est d'obtenir un meilleur rendement en quantité et en qualité à moindre coût compte tenu de la qualité du sol, du climat, des apports en eau, du potentiel génétique des cultures et des moyens d'exploitations (ANONYME, 2010).

1.2.2. Méthodes de calcul des doses d'engrais

1.2.2.1. Le bilan prévisionnel

La méthode des bilans permet de calculer la dose d'azote nécessaire à la culture en fonction d'un rendement objectif. Elle équilibre les besoins avec les fournitures issues du milieu. La différence permettant de déterminer la quantité d'azote minéral à apporter à la culture. La dose d'azote nécessaire se détermine selon l'équation suivante :

Dose d'engrais azoté = Besoins de la culture – Fournitures du sol en azote (Metz et Nass, 2015).

Les besoins de la culture dépendent du niveau ou objectif de rendement qui doit être multiplié par le coefficient d'azote absorbé par unité de production et de la part d'azote non valorisable par la plante. Le niveau de rendement à retenir doit être égal à la moyenne des rendements réalisés sur l'exploitation, pour la culture considérée, au cours des 5 dernières années, en écartant la valeur maximale et la valeur minimale. Il prend en compte également les conditions du sol et du milieu (type de sol, précédent, apports d'effluents d'élevage, ...).

Plusieurs postes sont à prendre en compte et doivent être cumulés afin de déterminer les fournitures totales d'azote de la parcelle. Ils s'agissent de la fourniture du sol, de la contribution des fertilisants organiques et de l'effet du précédent cultural (Metz et Nass, 2015).

1.2.2.2. La courbe de réponse

L'étude de la relation entre l'apport d'une quantité d'engrais et le rendement de la culture se base sur les observations de deux chimistes allemands : Von Liebig, 1855 et Mitscherlich, 1909. Ils ont énoncé des lois qui prévalent encore dans leurs principes. La « *loi du minimum* » qui exprime « la possibilité de voir les rendements des cultures limités par l'influence ou l'absence d'un élément nécessaire à la végétation » (Godard, 2005). La « *loi des*

rendements moins que proportionnels » qui stipule que : « quand on apporte des doses croissantes d'éléments fertilisants, les augmentations de rendements sont de plus en plus faibles au fur et à mesure que les doses s'élèvent. » (Godard, 2005).

La courbe de réponse à l'azote est envisageable à la fois du point de vue de l'agronome et du point de vue de l'économiste.

Pour l'agronome, la forme de la courbe répond à plusieurs critères permettant de rapprocher cette courbe de différents modes de consommation des nutriments azotés par la plante (Godard, 2005). Le rendement obtenu pour un apport nul est positif. Pour ce cas la plante bénéficie de la fourniture du sol en azote et des arrières effets des fertilisants antérieurs. Les rendements étant moins que proportionnels (Godard, 2005), la courbe se doit d'être croissante jusqu'à atteindre une dose optimale. Au-delà cette dose optimale, le rendement plafonne puis diminue pour des doses d'azote plus importantes.

La notion de réponse du rendement à l'azote d'une culture renvoie à la notion de fonction de production. En effet, l'azote est considéré comme un facteur de production. Dans le cas d'une production agricole, les facteurs de production peuvent être l'azote, l'eau, le travail de l'agriculteur, etc. La fonction de production est donc l'équation $y = f(x)$ de la courbe de réponse de la céréale à l'engrais, avec $y =$ Rendement et $x =$ dose azote engrais (Godard, 2005).

1.2.3. La fertilisation du maïs

La fertilisation est un ensemble de pratiques coordonnées ayant pour objectif d'assurer aux plantes cultivées une alimentation correcte dans l'ensemble des éléments nutritifs (Falisse et Lambert 1994). Elle consiste à apporter aux plantes les quantités d'éléments nutritifs qu'elles ne sont pas en mesure de trouver dans le sol (Rouanet, 1984). La fertilisation prend en compte plusieurs facteurs comme le sol, la plante et le climat. Le maïs est une céréale qui exige des quantités considérables d'éléments fertilisants, surtout pour l'azote. Les variations du rendement du maïs grain dépendent principalement de la dose des éléments nutritifs, des unités thermiques et du régime de précipitation. Pour un rendement compris entre 5 et 6 tonnes/ha, le maïs prélève 100 à 150 kg/ha de N, 40 à 60 kg/ha P_2O_5 et 100 à 150 kg/ha K_2O (Ndiaye et Sidibé, 1992). Une formule de fertilisation NPK est recommandée au Sénégal (quelle que soit la zone agroécologique) sur le maïs (quelle que soit la variété). Cette formule est de 200 kg/ha NPK (15-15-15) et de 200 kg d'Urée soit 122 kg N/ha, 30 kg P_2O_5 /ha et 30 kg K_2O /ha. Malgré la diversité des zones agro-écologiques (Figure 3), cette formule est vulgarisée partout alors qu'elle ne devrait pas. En effet, il y'a une forte hétérogénéité du sol dans un même champ paysan et celle-ci peut-être d'autant plus forte entre zones agroécologiques.

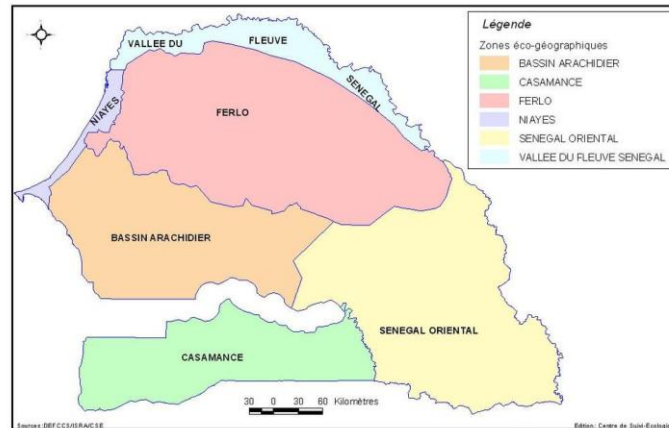


Figure 3: carte représentative des zones agro-écologiques du Sénégal (Source : www.wikipedia.com consulté le 18/04/2020)

1.2.3.1. Rôle agronomique des macronutriments

Les éléments primaires de l'engrais sont ceux qui jouent un rôle majeur dans le développement des cultures agricoles. Ceux sont l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K). Le phosphore et le potassium sont tous les deux hautement réactifs et sont, par conséquent, habituellement trouvés et comptabilisés dans leurs formes oxydées, respectivement P_2O_5 et K_2O . Chacun de ces éléments joue un rôle très important sur la plante :

- l'azote donne la couleur verte aux plantes, stimule la croissance et assure de meilleurs rendements. Il tend à prolonger la durée du fonctionnement des organes verts ; à retarder la sénescence et la maturation. Cependant un apport précoce peut dans certains cas favoriser la précocité. Il est responsable de l'affaiblissement de la résistance mécanique de la plante et de la sensibilité à certaines maladies cryptogamiques (Falisse et Lambert, 1994),
- le phosphore donne une jeune plante forte, crée des racines saines, améliore la qualité globale de la plante et conduit à une maturité précoce des cultures.
- le potassium contribue à la qualité des grains et de bonnes semences, à la santé générale des plantes, rend les plantes résistantes aux maladies et soutient l'absorption d'eau par les plantes (Lerot, 2006).

1.2.3.2. Carence en macronutriments

La carence ou déficience est une situation d'insuffisance d'un élément nutritif caractérisée par l'apparition de symptômes (Lambert et *al.*, 1994). Une carence en azote se manifeste par des feuilles vertes pâles ou jaunes et les plantes sont en retard de croissance chez le maïs. La carence en phosphore se manifeste chez le maïs par une croissance ralentie, des feuilles vert pâles et violacées ou cuivrées de l'apex à la base (souvent aussi sur les tiges), une

maturation lente, les plantes restantes vertes plus longtemps, des fruits mal formés ou grains peu remplis (Figure 4). Il en est de même chez le potassium où une carence induit une croissance ralentie, des plantes chétives, les feuilles montrent une altération de couleur tout au long de la marge extérieure de leur sommet à la base ; les bords des feuilles (surtout les plus basses) jaunissent, rougissent ou brunissent, se dessèchent et meurent (Nécroses des bords des feuilles) ; des feuilles fanées (Rabat, 2003).

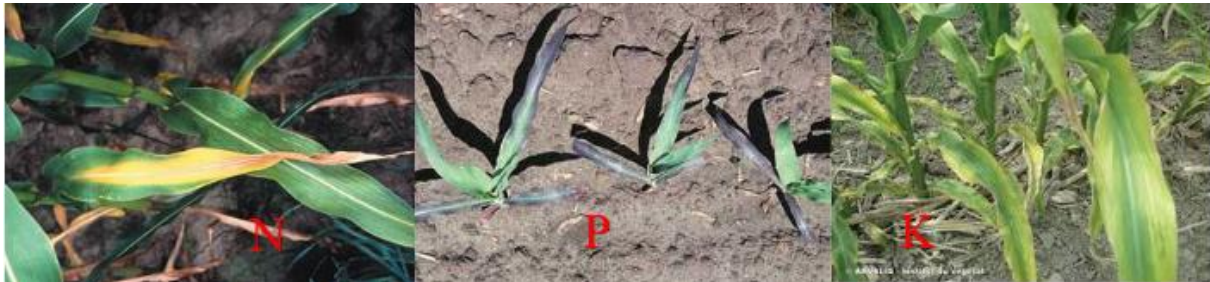


Figure 4: *Signes de carence en macronutriment (Source : Béroubé, 2015)*

1.2.3.3.Excès de macronutriments

L'excès d'azote peut avoir des conséquences variables selon la culture. Il se manifeste par une prolifération de la partie végétative au détriment de la floraison, un retard de maturation. Les organes de réserves sont de moins bonnes qualités et les feuilles sont vert-foncées, les racines fixent moins bien la plante dans le sol. La plante est plus sensible aux maladies et aux ravageurs. La capacité du phosphore à être complexé sous des formes hyposolubles et insolubles permet aux substrats d'avoir d'une part une bonne réserve phosphatée et d'autre part, cela permet d'éviter les excès phosphoriques. Un excès de potassium conduit à une augmentation de la sensibilité de la plante aux parasites et maladies. Il bloque l'assimilation du magnésium (Mg) et calcium (Ca) faisant apparaître des signes de carences magnésiennes et calciques même si ces éléments sont présents(Lerot, 2006).

CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES

2.1.Présentation de la zone d'étude

L'étude a été réalisée à Séfa (12°47' N, 15°32' O situé à 10 m d'altitude), une station expérimentale de l'ISRA dans la région de Sédhiou, département de Sédhiou, commune de Diendé et village de Bloc (Figure 5). La région de Sédhiou correspond à la sous zone agro écologique de la Moyenne Casamance (Gueye, 2016). Le climat est de type sud-soudanien continental avec deux saisons (Sagna, 2005). Une saison pluvieuse qui s'étale de juin à octobre, avec une intensité maximale en août et septembre et une saison sèche qui couvre la période de novembre à mai. Le mois d'août a enregistré 313,9 mm de pluie et celui de septembre 354,7 mm pluie en 2019. Comparée à 2018, le début de la saison des pluies 2019 a été très difficile caractérisée par une pluviométrie faible et très irrégulière (Figure 6) induisant des pauses pluviométriques.

Les températures moyennes mensuelles les plus basses sont enregistrées entre décembre et janvier et varient entre 25 à 30°C, les plus élevées sont notées entre mars et septembre avec des variations de 30 à 40°C (ANSD, 2015).

Le sol de la station de Séfa est généralement sableux, acide avec un pH qui varie de 4,5 à 5 et une faible capacité de rétention en eau. Le sol est constitué de 93,3% de sable, 3,4% de limon et de 3,3% d'argile (Gueye, 2016).

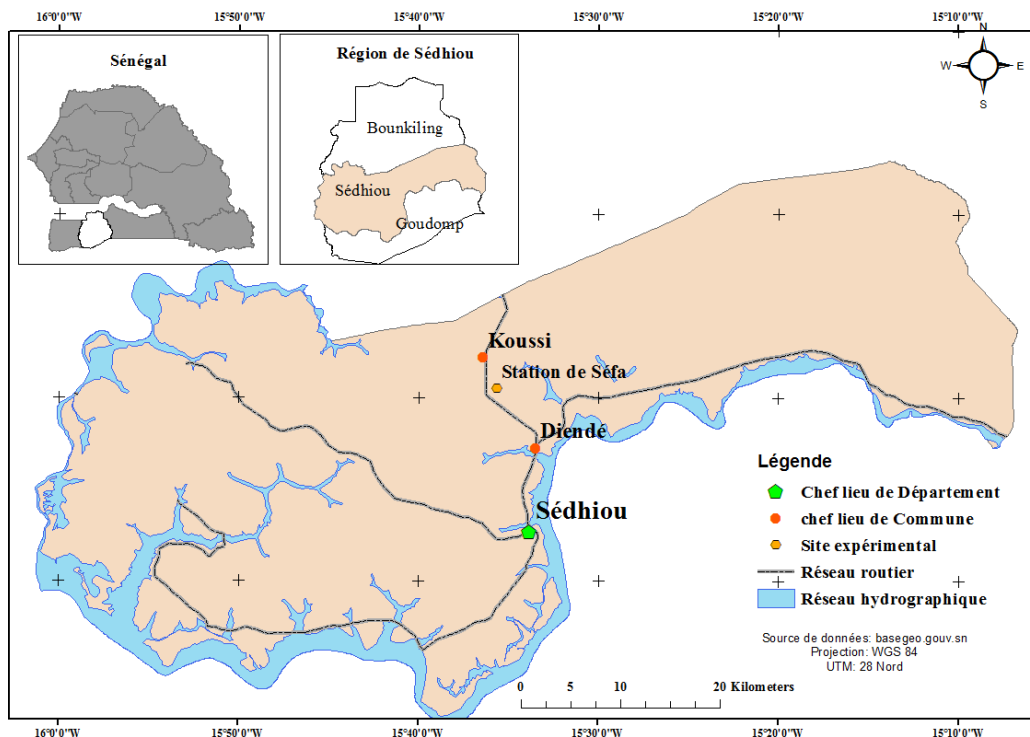


Figure 5: localisation de la zone d'étude

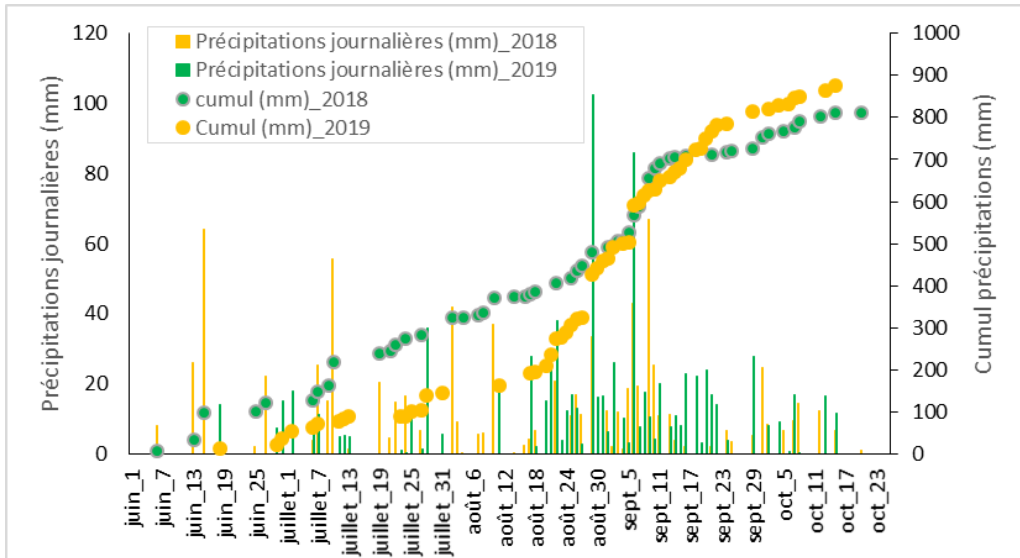


Figure 6: Précipitation de la région de Sédhiou des années 2018 et 2019

2.2. Description du Nutrient Expert

Le Nutrient Expert (NE), développé par « International Plant Nutrition Institute (IPNI) », est un outil informatisé d'aide à la décision de gestion des nutriments des cultures. C'est un outil qui permet aux conseillers agricoles d'élaborer des recommandations de fertilisation des cultures pour les agriculteurs. Ces recommandations aident l'agriculteur à augmenter son rendement et ses revenus tout en contribuant à minimiser les pertes de nutriments (Dobermann, 2005). Il a été validé sur le riz, le maïs, le manioc dans divers pays (Philippines, Kenya, Nigéria ...). Il est en cours de validation au Maroc, en Tunisie et en Algérie. Au Sénégal, il est en cours de calibration et de validation sur le maïs.

Le NE se base sur les principes de la gestion (management) des nutriments spécifiques au site (SSNM) pour développer des recommandations d'engrais adaptées à une parcelle ou à un environnement de culture spécifique.

Le SSNM est un concept alternatif à une recommandation généralisée des engrais sur les cultures à l'échelle d'un pays, d'une zone agro-écologique voire dans un champ d'agriculteur en raison d'une grande variabilité en termes de capacité d'apport en nutriments. Dès lors, face à cette orientation générale, le SSNM vise à optimiser l'approvisionnement en nutriments du sol dans le temps et dans l'espace afin de répondre aux besoins des cultures selon le concept 4B (Bonne source, Bonne dose, Bon moment et Bonne place). Sa recommandation a été utilisée dans cette étude.

Le Nutrient Expert est composé de 4 fenêtres (Figure 7) et aide à :

- évaluer les pratiques actuelles de la gestion des nutriments ;
- déterminer un rendement objectif basé sur des rendements réalisables ;

- estimer des doses NPK pour la gestion spécifique des nutriments au site (SSNM) et les traduire en source d'engrais ;
- recommander une stratégie de fertilisation basée sur le concept de 4B ;
- comparer le bénéfice actuel et celui attendu de la recommandation de l'outil (analyse de profit).

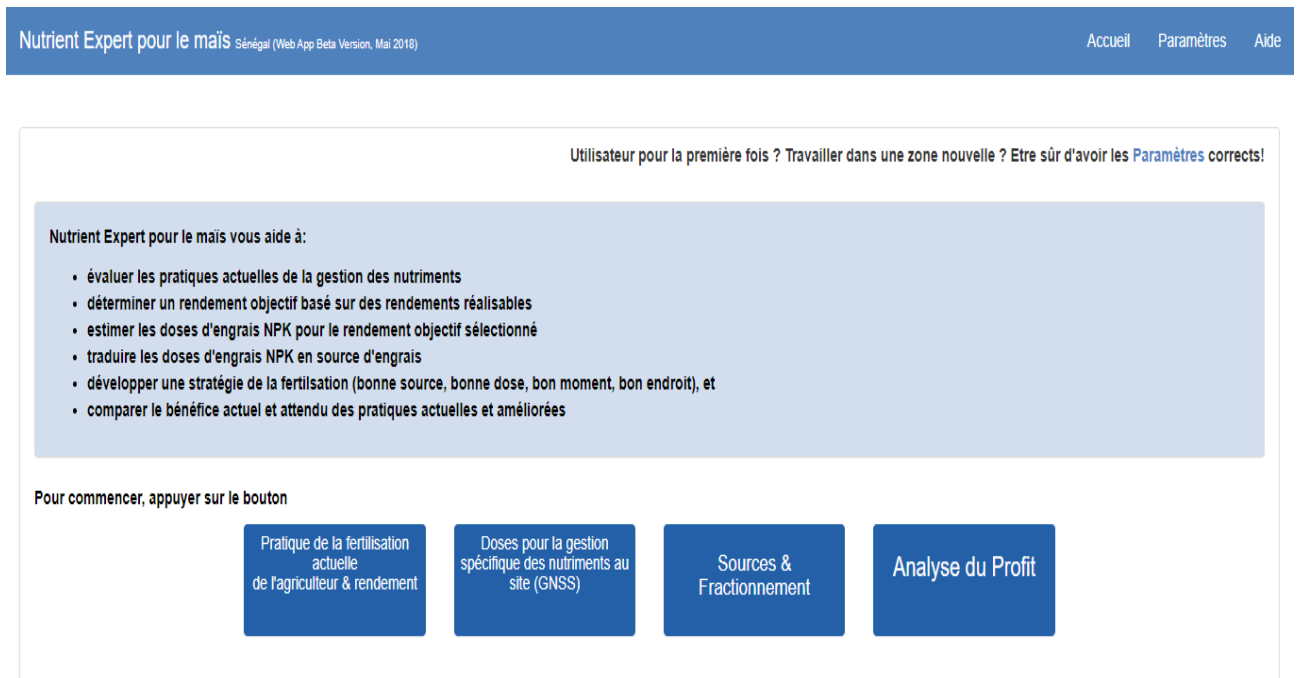


Figure 7 : Interface du Nutrient Expert

2.3. Matériel végétal

Deux variétés de maïs ont été utilisées. Il s'agit de la variété de maïs hybride appelée PANAR ou PAN12 et de la variété SUWAN-1. La variété SUWAN-1 "GoorYomboul", utilisée par la plupart des agriculteurs, a un cycle de maturation de 90-100 jours après semis (JAS). Son rendement potentiel en grain peut atteindre 3-4 tonnes par hectare et ses grains sont de type corné et de couleur jaune-orange (ISRA, 2012). La variété PANAR, de couleur jaune intense avec une typologie de grains corné a un cycle cultural qui varie entre 120 et 130 jours. Elle possède un potentiel de rendement élevé jusqu'à 8 t/ha et est aussi tolérante à la sécheresse (ANANI, 2016). Elle est peu cultivée au Sud alors qu'elle est très prisée dans le bassin arachidier notamment dans le département de Nioro.

2.4. Traitements et doses d'engrais correspondantes

Les essais mis en place sont appelés des essais soustractifs ou essais à « omission » qui exigent l'utilisation des engrais simples pour identifier la carence de chaque élément. Il s'agit, à partir d'un traitement correspondant à un apport complet et suffisant de NPK et des traitements sans N, P ou K. Le traitement NPK a été raisonné de telles sortes que le besoin maximal en N, P et K de maïs soit apporté. Les autres traitements sont : un traitement appelé FFP ou « *Farmer Fertilizer Practice* », c'est-à-dire la pratique de fertilisation de l'agriculteur ; un traitement recommandé par l'outil *Nutrient Expert* appelé aussi SSNM « *Site Spécifique Nutrient Management* » ; le traitement « *soil testing (ST)* » basé sur l'analyse du sol ; le traitement recommandé (TR) et en fin un control ou témoin sans engrais.

Ce traitement recommandé ne concerne que la variété SUWAN-1. Il n'existe pas encore une recommandation sur les hybrides au Sénégal. Ainsi, deux facteurs ont été étudiés dans cet essai. Il s'agit du facteur variété avec deux modalités (les variétés SUWAN-1 et PANAR) et du facteur fertilisation minérale avec neuf modalités qui sont sans engrais ou témoin (T0), engrais sans N (T1), engrais sans P (T2), engrais sans K (T3), NPK (T4), FFP (T5), ST (T6), SSNM (T7) et TR (T8).

Les doses d'engrais varient suivant les variétés (Tableaux 2 et 3). Au total neuf traitements ont été retenus pour chaque variété. Les engrais utilisés sont : NPK triple 15, l'Urée (46 %), double superphosphate (DSP à 25 %) et le Chlorure de potassium (KCl à 60 %). Le NPK 6-20-10 a été aussi utilisé par recommandation du *Nutrient Expert*.

Tableau 2: Traitements et doses d'engrais correspondantes pour SUWAN-1

Traitements	Unité fertilisante/Doses		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	Kg/ha		
T0	0	0	0
T1	0	60	100
T2	150	0	100
T3	150	60	0
T4	150	60	100
T5	115	23	23
T6	162	38	0
T7	120	28	28
T8	122	30	30

Tableau 3: Traitements et doses d'engrais correspondantes pour Panar

Traitements	Unité fertilisante/Doses		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	Kg/ha		
T0	0	0	0
T1	0	90	150
T2	225	0	150
T3	225	90	0
T4	225	90	150
T5	115	23	23
T6	248	91	0
T7	150	81	41
T8	160	67,5	67,5

2.5. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est un split-plot à deux facteurs : le facteur principal est la variété de maïs et le facteur secondaire la fertilisation minérale. Le facteur principal a deux niveaux (variétés PANAR et SUWAN-1) et le facteur secondaire a neuf niveaux avec 4 répétitions, soit 8 grandes parcelles et 72 sous-parcelles ou parcelle expérimentale (Figure 8). Chaque parcelle expérimentale a une dimension de 6 m x 6 m (36 m²) avec un écartement entre lignes de 0,75 m et 0,25 m entre plants. Chaque traitement comporte 8 lignes et 24 plants par ligne, soit 192 plants/traitements. Les répétitions sont distantes de 3 m. Au sein, d'une grande parcelle, deux traitements sont séparés par une distance de 1,5 m contre 2 m entre grandes parcelles au sein d'une même répétition (Figure 8). Ainsi, les dimensions de l'essai sont 91 m x 45 m (4095 m²).

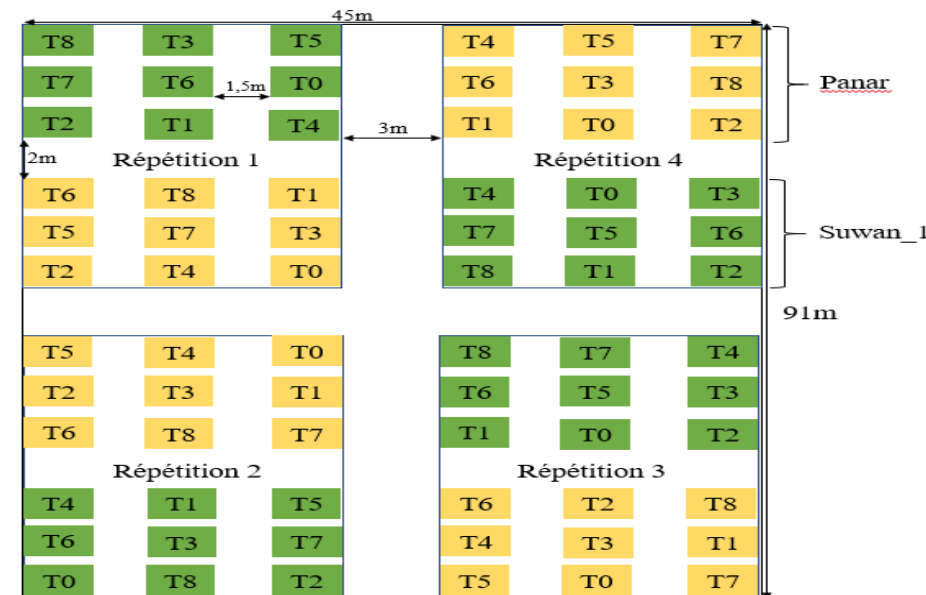


Figure 8: schéma du dispositif expérimental

2.6. Conduite de l'essai

2.6.1. Préparation du sol

La parcelle a été choisie sur la base de deux critères : l'homogénéité du terrain et un précédent arachide. La délimitation de la parcelle a été faite à l'aide d'un ruban métrique de 50 mètres, des piquets en bois et d'une corde (Figure 9). La préparation du sol a consisté en un labour à plat effectué par un tracteur à une profondeur d'environ 20 cm. La préparation du lit de semis a été faite manuellement à l'aide d'un râteau. Les écartements entre lignes et entre poquets ont été faits manuellement à l'aide de deux rayonners.



Figure 9: délimitation de la parcelle après préparation du sol

2.6.2. Semis

Le semis a été fait manuellement à la main à la date du 16 juillet 2019 avec un espacement de 0,75 m entre les lignes et 0,25 m sur les lignes. Un deuxième semis a été fait à la date du 29 juillet 2019 suite à une mauvaise levée causée par un manque de pluies. Dans chaque parcelle élémentaire, il y'avait 8 lignes et sur chaque ligne, 24 poquets, deux à trois graines ont été semées par poquet. Lors du démarrage, un plant de maïs a été laissé par poquet, soit une densité de semis de 53 333 plants/ha.

2.6.3. Fertilisation

La fertilisation a été faite manuellement et les engrais apportés en localisé le long de la ligne de semis à environ 5 cm du plant en respectant la dose spécifique par traitement (figure 10). La pesée des engrais par ligne de semis a été faite à l'aide d'une balance électronique. La fertilisation minérale a consisté à apporter NPK, DSP et KCl en une seule fraction au semis et l'Urée par fractionnement pendant les phases de semis et de développement des plants. Le fractionnement permet de minimiser les pertes par lessivage, de fournir l'azote au moment où la plante en a besoin car l'azote est très mobile. Ainsi, le fractionnement de l'Urée s'est fait en

trois apports (Tableau 4). Un premier apport a été fait en phase de semis, un deuxième et troisième apport pendant la phase de développement. La période des deux derniers apports dépend des types de traitements (Tableau 4). Le nombre de fractionnement de l'Urée et la date d'apport ont été appliqués tel que recommandé par la recherche pour tous les traitements à l'exception du traitement T5 où le nombre de fractionnement et la date d'apport ont été faits tel que pratiqués par les agriculteurs (Tableau 4).



Figure 10: épandage d'engrais

Tableau 4: dates des apports d'engrais

Traitements	Semis				Développement	
	NPK	DSP	KCl	Urée	Urée couverture	
					1er apport	2eme apport
T0	-	-	-	-	-	-
T1	-	+	+	-	-	-
T2	-	-	+	+	25/08/2019 (27jas)	08/09/2019 (41jas)
T3	-	+		+	25/08/2019 (27jas)	08/09/2019 (41jas)
T4	-	+	+	+	25/08/2019 (27jas)	08/09/2019 (41jas)
T5	+	-	-	-	13/08/2019 (15jas)	07/09/2019 (40jas)
T6	-	+	-	+	25/08/2019 (27jas)	08/09/2019 (41jas)
T7	+	-	-	-	23/08/2019 (25jas)	09/09/2019 (42jas)
T8	+	-	-	+	25/08/2019 (27jas)	08/09/2019 (41jas)

Légende : + traitement ayant reçu l'engrais, - traitement n'ayant pas l'engrais

2.6.4. Entretien

L'entretien des essais a consisté à faire un démariage à un plant par poquet au 20^{ème} JAS, deux sarclage, binages (pour enfouir l'engrais) et en un buttage. Le premier sarclage a été effectué deux semaines après semis (15JAS) et le deuxième a été réalisé à 5 semaines après semis (35 JAS). Le binage a été fait après chaque apport d'engrais. Le buttage a été fait à la date du dernier apport d'engrais (42 JAS). Deux traitements phytosanitaires ont été effectués 15 JAS et à la floraison femelle (67 JAS). Ces traitements ont été effectués suite à des attaques de chenilles. L'insecticide « decis » a été utilisé pour le traitement des plantes contre les chenilles. Ces attaques n'ont pas du tout affecté le développement des plantes.

2.7. Paramètres mesurés

2.7.1. Caractérisation du sol

Des prélèvements de sols (0-20 cm) ont été faits à raison d'un échantillon composite issu de 7 échantillons élémentaires dans chaque répétition avant labour au tracteur. Les échantillons de ont été mélangés deux à deux, soit 2 échantillons de sols. Une tarière (Figure 11), un seau de 5 litres et des sachets plastique ont été utilisés pour ces prélèvements. La texture et les paramètres chimiques tels que Carbone organique, Azote total, Phosphore assimilable (Olsen), pH, bases échangeables, teneur Zn et la capacité d'échange cationique (CEC) ont été analysés au laboratoire, Eau-Sols-Plantes, du Centre de Recherches Agronomiques (CRA) de l'ISRA à Saint-Louis.



Figure 11: prélèvement de sol avec une tarière

2.7.2. Paramètres de croissance et de rendement

2.7.2.1. Paramètres de croissance

- a. Hauteur et nombre de feuilles des plants

Des mesures de hauteur et un comptage du nombre de feuilles ont été fait à chaque 10 jours à partir du 19^{ème} JAS. Au total 7 mesures ont été réalisées. La hauteur des plants a été mesurée à partir du niveau de sol jusqu'au niveau de la dernière feuille la plus longue. Ces mesures ont été faites sur 12 plants dans chaque parcelle élémentaire à l'aide d'une règle. Les 12 plants ont été choisis sur la base d'un dispositif bien défini (Figure 12).

b. La floraison

La date de floraison mâle au stade 50 % et la date de floraison femelle au stade 50 % ont été enregistrées. Elles ont été obtenues par comptage direct sur chaque parcelle élémentaire du nombre de plantes fleuris jusqu'à atteindre 50% de fleurs (mâle et femelle) par intervalle de 2 jours avec la formule suivante :

$$\text{Taux de floraison} = (100 * \text{NPF}) / \text{NPT}$$

NPF : Nombre de Plants Fleuris

NPT : Nombre Total de Plants

2.7.2.2. Paramètres de rendement

a. Les composantes du rendement

Dans chaque carré, la longueur des épis, le nombre de lignes de grains/épi, le nombre de grains/épi, le poids frais et sec des grains/épi et le poids des 1000 grains. Les 1000 grains étaient choisis dans le carré de rendement. À défaut d'un compteur de grain, ils ont été comptés à la main et pesés sur une balance électrique.

Ces paramètres de rendement ont été évalués sur les épis de 12 plants choisis dans chaque parcelle et sur lesquelles été fait le suivi phénologique. Une balance électronique d'une capacité de 4 kg a été utilisée pour les mesures de masse. Pour déterminer la longueur des épis, la distance qui sépare la base et le sommet de l'épi a été mesurée à l'aide d'un double décimètre.

b. Rendements

La récolte été faite manuellement à la date du 14 novembre 2019, soit environ 4 mois après semis. Chaque traitement était divisé en deux : (i) carré de rendement avec 56 poquets et une superficie de 10,5 m² et (ii) hors carré de rendement avec 136 poquets et une superficie de 25,5 m² (Figure 12). Les poids des grains et de la paille à la récolte ont été évalués. Les rendements paille et grain ont été calculés sur la base du carré de rendement et extrapolé à l'hectare. Un peson d'une capacité de 20kg a été utilisé pour les mesures de masse. Les épis ont été mis dans des sacs blancs de 25 Kg puis séchés au soleil pendant 15 jours avant d'être égrainer à l'aide d'un mortier.

Enfin, pour chaque parcelle élémentaire, un échantillon de pailles et de grain a été constitué pour évaluer la matière sèche à l'étuve (65 °C pendant 72 h) au laboratoire Eau-Sols-Plantes, du Centre de Recherches Agronomiques (CRA) de l'ISRA à Saint-Louis.

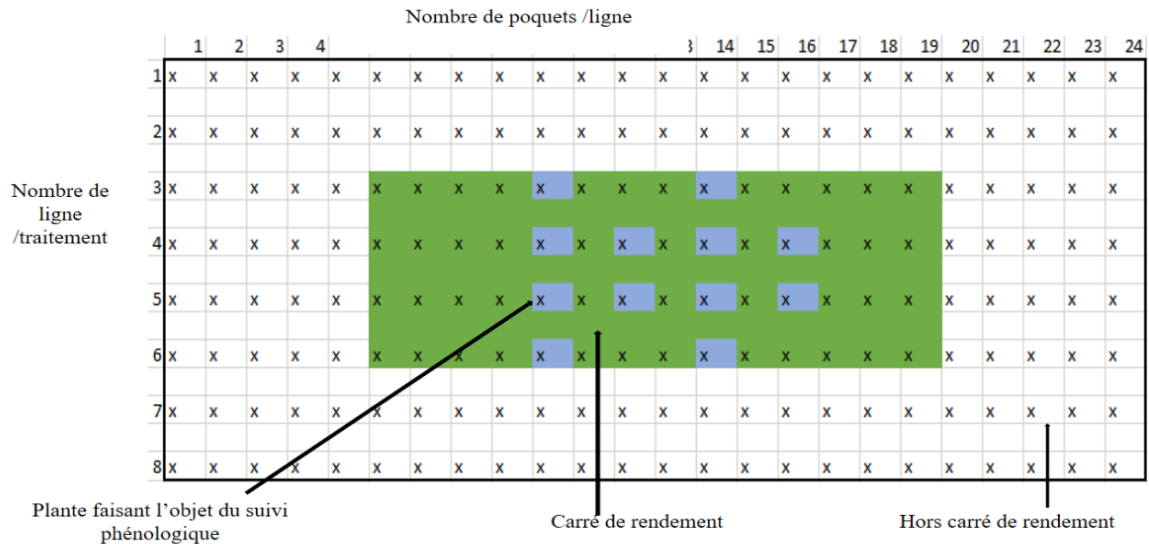


Figure 12: dispositif de récolte

2.8.La réponse de rendement aux nutriments, N, P et K (Yield response)

La réponse de rendement aux nutriments est la différence de rendement entre le traitement ayant reçu tous les macronutriments (NPK) et un traitement où un élément (N, P ou K) est omis. La réponse de rendement aux nutriments se calcule à l'aide des expressions suivantes :

Réponse de rendement de N = rendement du traitement NPK – rendement du traitement sans N

Réponse de rendement de P = rendement du traitement NPK – rendement du traitement sans P

Réponse de rendement de K = rendement du traitement NPK – rendement du traitement sans K (Dobermann, 2005).

2.9. Efficacité agronomique

L'efficacité agronomique (EA) traduit l'augmentation du rendement par unité de nutriment appliquée. Elle se calcule par la formule suivante :

$$EA = (Y - Y_0) / F \text{ (Dobermann, 2005)}$$

Avec :

F - quantité (d'engrais) appliquée (kg/ha)

Y - rendement des cultures avec application d'engrais (kg/ha)

Y₀ - rendement des cultures (kg/ha) dans un traitement témoin sans engrais

L'AE de N pour les céréales varie de 10 à 30 kg de rendement par kg de N. L'AE de P quant à elle varie de 20 à 50 kg de rendement de céréales par kg d'application de P (Dobermann, 2007)

2.10. Analyse économique

L'analyse économique cherche à trouver le traitement d'engrais le plus rentable. En effet, la rentabilité de l'utilisation des engrais est l'un des facteurs clés qui déterminent l'adoption du traitement et donc la quantité d'engrais utilisée (Njoroge et *al.*, 2018). Dans ce contexte, le ratio valeur coût (RVC) des engrais est utilisé pour déterminer les avantages économiques de chaque traitement pour la production de maïs. Le RVC indique la valeur du rendement supplémentaire produit par unité d'argent investie dans les engrais comme le montre l'équation suivante :

$$\text{RVC} = (\text{produit supplémentaire du maïs dû à l'utilisation d'engrais (kg/ha)} \times \text{prix des céréales (f cfa/kg)}) / (\text{quantité d'engrais appliquée} \times \text{coût de l'engrais (f cfa/kg)})$$
 (Njoroge et *al.*, 2018).

Une valeur du RVC supérieur à 1 signifie un bénéfice net alors qu'une valeur du RVC inférieur à 1 signifie une perte nette tant que d'autres intrants de production tels que la main-d'œuvre, le coût des semences ne sont pas modifiés à la suite de l'application d'engrais. Une valeur du RVC de 2 est considérée comme le seuil critique pour adopter l'utilisation d'engrais (Njoroge et *al.*, 2018).

2.11. Traitement et analyse de données

Les données collectées ont été saisies dans le tableur Excel. Pour comparer l'effet des différents fertilisants et la performance des variétés, des analyses de variance (ANOVA) et des tests de Fisher au seuil de 5% ont été effectués avec le logiciel RStudio version 3.6.3. Le package agricolae a été utilisé pour les tests de Fisher et le package ggplot2 a été utilisé pour les boxplot. La relation entre les paramètres a été déterminée en utilisant des tests de corrélation et des analyses en composantes principales (ACP) avec le logiciel XLSTAT version 2014. Cette analyse a permis d'avoir des tableaux matriciels de corrélation entre le rendement grain et les composantes du rendement.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

3.1.Résultats

3.1.1. Caractéristiques du sol

Les résultats d'analyse de sols du site d'essai sont consignés dans le tableau 5. Le sol a une proportion d'argile qui oscille entre 11,25 et 12,25%, une proportion de limon qui tourne entre 11,75 et 12% et une proportion de sable qui varie entre 76 et 76,75%. Au regard de sa composition et d'après le triangle textural de l'USDA, ce sol est d'une texture sablo-limoneuse. Le pH du sol oscille entre 5,71 et 5,75, avec une proportion d'azote qui varie entre 0,039 et 0,040% et de phosphore assimilable entre 3,706 et 5,095ppm. Le sol a une teneur en carbone de 0,458 à 0,538% et une teneur en matière organique de 0,788 à 0,926% et un rapport C/N de 11,682 à 13,471. Ce sol a une teneur en Na⁺ qui oscille entre 0,031 et 0,101 meq/100g, en K⁺ oscillante entre 0,152 et 0,157 meq/100g, en Mg²⁺ qui varie entre 0,520 et 0,529 meq/100g, en Ca²⁺ qui varient entre 0,721 et 0,757 meq/100g et une CEC moyenne de 4,461 meq/100g.

Tableau 5: Caractéristiques physico-chimiques du sol

Paramètres	E1	E2	Moyenne
A (%)	12,25	11,25	11,75
L (%)	11,75	12,0	11,875
S (%)	76,0	76,75	76,375
pH (1/2,5)	5,71	5,75	5,73
pH KCl(1/2,5)	5,61	4,67	5,14
CE (1/2,5) (µs.cm-1)	77,3	83,1	80,2
C (%)	0,458	0,538	0,498
N (%)	0,039	0,040	0,0395
C/N	11,682	13,471	12,5765
MO (%)	0,788	0,926	0,857
P ass (ppm)	3,706	5,095	4,4005
Na ⁺ (meq/100g)	0,101	0,031	0,066
K ⁺ (meq/100g)	0,152	0,157	0,1545
Mg ²⁺ (meq/100g)	0,520	0,529	0,5245
Ca ²⁺ (meq/100g)	0,721	0,757	0,739
CEC (meq/100g)	4,4615	4,461	4,46125

Légende : E1 échantillon 1, E2 échantillon 2

3.1.2. Paramètres de croissance des plants de maïs

3.1.2.1. Hauteur des plants de maïs

Une évolution progressive de la hauteur des plants de maïs a été notée du 19^{ème} au 79^{ème} JAS pour tous les traitements. Le traitement T7 a eu la plus grande vitesse de croissance en hauteur suivi des traitements T8, T4 et T5. Les traitements T0, T1, T6, T3 et T2 ont eu respectivement une vitesse de croissance en hauteur plus faible (Figure 13).

L'analyse de la variance (ANOVA) de la hauteur des variétés plantées au 79^{ème} JAS a montré une différence significative ($p < 0,05$) entre les traitements. Le traitement T7 présente la plus grande hauteur ($173,44 \pm 15,26$ Cm et $174,04 \pm 11,63$ Cm pour respectivement Suwan-1 et Panar). En effet, la hauteur des plants du traitement T7 est significativement plus élevée que la hauteur des traitements T0, T1, T2, T3 et T6 (Tableaux 6). Les trois derniers ont une hauteur significativement plus grande que les traitements T0 et T1. Par contre, aucune différence significative n'est notée entre T7, T4, T5 et T8. L'omission de l'azote affecte plus négativement la hauteur des plants de maïs suivi de l'omission du potassium et du phosphore (Tableaux 6).

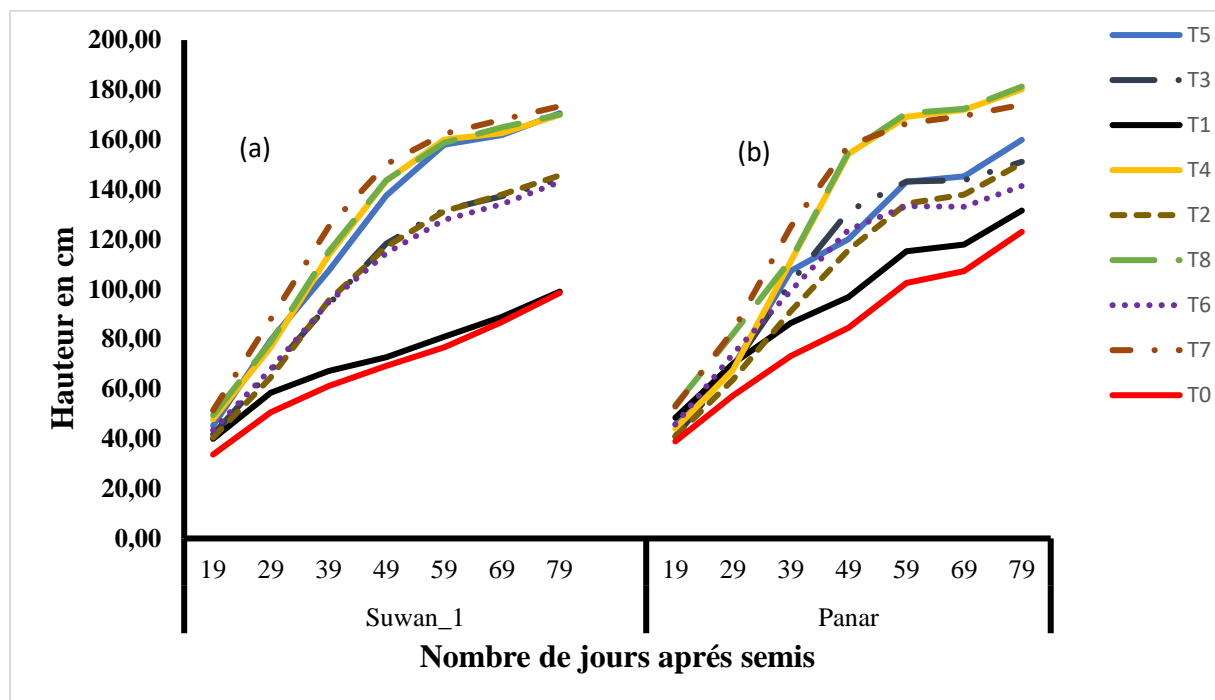


Figure 13 : Evolution de la hauteur des plants de suwan-1 (a) et de Panar (b)

Tableau 6: effets des traitements sur la hauteur des plants de maïs au 79^{ème} JAS

Traitements	Suwan_1	Panar
T0	98,48 (±10,90) c	123,04 (±20,63) e
T1	99,00 (±5,97) c	131,58 (±21,77) e
T2	145,68 (±21,59) d	150,52 (±10,66) cd
T3	144,19 (±6,74) d	151,15 (±9,12) cd
T4	170,00 (±14,07) a	180,19 (±7,24) a
T5	170,64 (±9,94) a	159,98 (±7,90) bc
T6	143,06 (±8,75) b	141,42 (±7,15) de
T7	173,44 (±15,26) a	174,04 (±11,63) ab
T8	170,10 (±7,03) a	181,33 (±8,51) a
Moyenne	146,07 (±30,21)	154,81 (±22,94)
P	2,5e-10 ***	1,21e-06 ***

3.1.2.2. Nombre de feuilles des plants de maïs au 79^{ème} JAS

L'analyse de la variance montre que la différence de nombre de feuilles entre les traitements est significative pour les deux variétés ($P > 0,05$). Les plants du traitement T7 ont eu le plus grand nombre de feuilles avec 12 feuilles par plant. En effet, le nombre de feuilles des plants du traitement T7 n'est pas significativement plus important que celui des plants des traitements T2, T3, T4, T5, T6 et T8 pour la variété Suwan_1. Par contre, pour la variété Panar, les plants du traitement T7 ont un nombre de feuilles non significativement plus élevé que les plants des traitements T4 et T8, mais significativement plus important que celui des plants des traitements T0, T1, T2, T3, T5 et T6 (Tableau 7).

Tableau 7: effet des traitements sur le nombre de feuilles des plants de maïs

Traitements	Suwan_1	Panar
T0	10,00 (±0,82) b	10,25 (±0,50) d
T1	10,00 (±0,00) b	11,25 (±0,96) bc
T2	10,75 (±0,96) ab	10,75 (±0,50) cd
T3	11,25 (±0,50) a	11,00 (±0,00) cd
T4	11,25 (±0,96) a	11,50 (±0,58) abc
T5	11,50 (±0,58) a	11,00 (±0,82) cd
T6	11,25 (±0,50) a	11,00 (±0,82) cd
T7	11,50 (±0,58) a	12,25 (±0,50) a
T8	11,50 (±0,58) a	12,00 (±0,00) ab
Moyenne	11 (±0,83)	11,22 (±0,80)
P	0,00824 **	0,00254 **

3.1.2.3. Stade 50% floraison mâle et femelle

Pour la floraison, l'analyse de la variance à la date « 50% de floraison mâle et femelle » a montré une différence significative ($P < 0,05$) entre les traitements quelle que soit la variété. Les traitements T7, T5, T4 et T8 ont eu une floraison mâle et femelle plus précoce variant entre 52 et 60 JAS. Par contre, les traitements T0, T1 et T2 ont eu le stade 50% de floraison mâle et femelle plus tardivement (Tableau 8).

Tableau 8: effet des traitements sur les dates de 50% floraison mâle et femelle des plants de maïs

Traitements	Femelle		Mâle	
	Suwan_1	Panar	Suwan_1	Panar
T0	66 ($\pm 1,50$) a	66 (2,00) a	59 ($\pm 2,50$) a	57 (1,50) a
T1	67 ($\pm 0,00$) a	64 (1,15) a	58 ($\pm 0,00$) ab	56 (2,06) abc
T2	64 ($\pm 2,87$) b	64 (2,00) a	57 ($\pm 1,00$) abc	56 (1,00) ab
T3	64 ($\pm 2,87$) cd	60 (2,06) b	56 ($\pm 1,00$) bcd	54 (2,45) cd
T4	59 ($\pm 1,73$) d	60 (1,26) b	55 ($\pm 1,41$) def	54 (0,96) bcd
T5	59 ($\pm 2,22$) d	60 (2,36) b	54 ($\pm 0,96$) ef	54 (1,89) cd
T6	62 ($\pm 1,41$) bc	60 (1,91) b	56 ($\pm 0,00$) cde	54 (1,50) bcd
T7	59 ($\pm 1,50$) d	58 (1,41) b	54 ($\pm 1,15$) f	52 (1,91) d
T8	59 ($\pm 1,50$) d	58 (1,41) b	55 ($\pm 1,41$) def	52 (1,15) d
Moyenne	62 ($\pm 3,29$)	61 (3,16)	56 ($\pm 1,97$)	54 (2,16)
P	1,57e-07 ***	1,57e-06 ***	4,63e-05 ***	0,00372 **

3.1.3. Paramètres du rendement

Les traitements ont significativement influencé ($p < 0,05$) les composantes du rendement. Les longueurs d'épis les plus importantes (10,42 cm et 13,06 cm respectivement pour la variété suwan-1 et Panar) ont été enregistrées au niveau des traitements T7 et T4. Pour la variété Suwan-1, La longueur d'épis du traitement T7 n'est significativement pas différente de celle des traitements T2, T3, T4, T5 et T8. Par contre, T7 a une longueur d'épis significativement plus importante que celle des traitements T0, T1 et T6 qui ont des valeurs respectives de 5,19 et 5,49 et 7,46 cm. Pour la variété Panar, les épis du traitement T4 sont significativement plus longs que les épis du traitement T0, T1 et T5. Il n'y a pas de différence significative entre T2, T3, T4, T6, T7 et T8.

Les plants du traitement T7 ont eu un nombre de lignes de grains par épis significativement plus important que ceux des traitements T0 et T1. Les traitements T4, T5, T7 et T8 ont

sensiblement le même nombre de grains par épis qui est significativement plus important que ceux des traitements T0, T1, T2, T3 et T6. Quant aux poids grains par épis, les valeurs les plus élevés ont été enregistrés avec les traitements T7, T5, T8 et T4. Ces poids sont significativement plus importants que ceux des traitements T0, T1, T2, T3 et T6.

Enfin, pour le poids de 1000 grains, les traitements T4, T8 et T7 ont eu le poids de 1000grains les plus importants avec 272 ; 271,45 et 256 g respectivement et le poids le plus petit a été obtenu au niveau du traitement T6 avec 216 g pour la variété Panar (Tableau 10). Le traitement T5 a enregistré le poids des 1000 grains le plus important avec 185,17 g suivi du T8 avec 183,87g et du T7 avec 183,67 g. Ces traitements ont un poids des 1000 grains significativement plus important que celui du traitement T0, T1, T2, T3 et T6 pour la variété Suwan_1 (Tableau 9).

Tableau 9: effet des traitements sur les composantes du rendement de la variété Suwan_1

Traitements	Longueur épis /plant (cm)	Nbre de lignes de grains/épi	Nbre de grain/épi	Poids grain/ épi (g)	Poids 1000 grains (g)
T0	5,19 (±1,59) c	8 (±0,96) b	40 (±23,43) d	6,10 (±3,89) e	154,22 (±16,95) c
T1	5,48 (±1,11) c	8 (±1,15) b	62 (±15,20) cd	10,07 (±1,99) de	160,42 (±5,44) bc
T2	9,32 (±1,29) ab	11 (±1,15) a	118 (±28,44) bc	21,30 (±5,23) cd	168,75 (±18,40) c
T3	8,28 (±1,68) ab	11 (±0,50) a	122 (±11,90) bc	21,55 (±4,04) cd	155,97 (±6,78) c
T4	9,31 (±1,97) ab	12 (±1,26) a	190 (±23,87) a	34,65 (±7,12) abc	177,40 (±14,10) ab
T5	10,19 (±2,46) a	12 (±0,96) a	211 (±55,58) a	40,00 (±15,09) a	185,17 (±15,02) a
T6	7,46 (±1,06) bc	12 (±2,58) a	175 (±62,88) ab	24,25 (±9,62) bc	150,95 (±15,19) c
T7	10,42 (±1,67) a	12 (±1,29) a	215 (±60,59) a	42,90 (±14,15) a	183,67 (±11,72) a
T8	10,00 (±1,97) a	12 (±0,87) a	194 (±59,48) a	35,47 (±12,25) a	183,87 (±12,13) a
Moyenne	8,41 (±2,41)	11 (±2,04)	148 (±72,44)	26,26(±14,84)	168,94 (±17,85)
P	0,000412 ***	3,84e-05 ***	5,56e-06 ***	2,48e-05 ***	0,00205 **

Tableau 10: effet des traitements sur les composantes du rendement de la variété Panar

Traitements	Longueur épis /plant (cm)	Nbre de lignes de grains/épi	Nbre de grain/épi	Poids grain/ épis (g)	Poids 1000 grains (g)
T0	7,14 (3,60) d	10 (2,16) bc	113 (81,94) d	24,87 (18,97) b	229,75 (41,64) bc
T1	7,65 (2,38) cd	11 (1,26) abc	127 (44,77) cd	31,80 (12,83) b	245,12 (35,52) abc
T2	10,15 (1,23) abcd	11 (0,50) abc	172 (33,55) bcd	38,77 (6,62) b	228,02 (23,98) bc
T3	11,23 (2,87) ab	10 (1,50) c	166 (68,12) cd	37,55 (15,46) b	228,00 (25,48) bc
T4	13,06 (2,19) a	11 (0,96) abc	254 (42,54) ab	70,95 (15,07) a	272,00 (11,79) a
T5	9,05 (0,96) bcd	11 (0,96) abc	205 (62,07) abc	45,05 (17,88) b	228,10 (22,78) bc
T6	10,85 (1,53) abc	9 (1,29) c	131 (31,04) cd	28,20 (6,25) b	216,00 (8,80) c
T7	12,75 (3,07) a	12 (1,50) a	261 (89,01) a	68,70 (27,12) a	256,00 (27,33) ab
T8	12,77 (2,37) a	12 (1,26) ab	275 (8,10) a	78,30 (5,87) a	271,45 (17,38) a
Moyenne	10,52 (2,98)	11 (1,47)	190 (77,66)	47,13 (23,62)	241,61 (30,02)
P	0,0077 **	0,00988	0,000964 ***	7,11e-05 ***	0,0336 *

3.1.4. Rendements du maïs

L'ANOVA sur les rendements du maïs montre des différences significatives ($P < 0,05$) entre les traitements quelle que soit la variété. Les traitements T7 (3,31tMS/ha pour la variété Suwan_1), T4 et T8 (3,91 tMS/ha pour la variété Panar) ont obtenu les rendements en paille significativement plus élevés que ceux des traitements T0, T1, T2, T3 et T6. Les traitements T0 (0,75 et 1,12tMS/ha) et T1 (0,74 et 1,46 tMS/ha) ont obtenu les plus faibles rendements respectivement pour les variétés Suwan_1 et Panar (Figure 14).

Quant au rendement en grains, le traitement T4 a enregistré le meilleur rendement avec $1,95 \pm 0,06$ t/ha et $2,22 \pm 0,69$ t/ha respectivement pour les variétés Suwan_1 et Panar. Les traitements T4, T7 et T8 ont des rendements grains significativement plus important de ceux des traitements T5, T6, T3, T2, T1 et T0. Le traitement T7 a favorisé de manière significative le rendement en grains avec un surplus variant entre 400 et 720 kg/ha par rapport au traitement T5. Il faut noter que les traitements à faible rendement en grains sont les traitements T0, T1, T2 et T6 avec un rendement en grains qui varie entre 0,14 et 0,86t/ha (Figure 15).

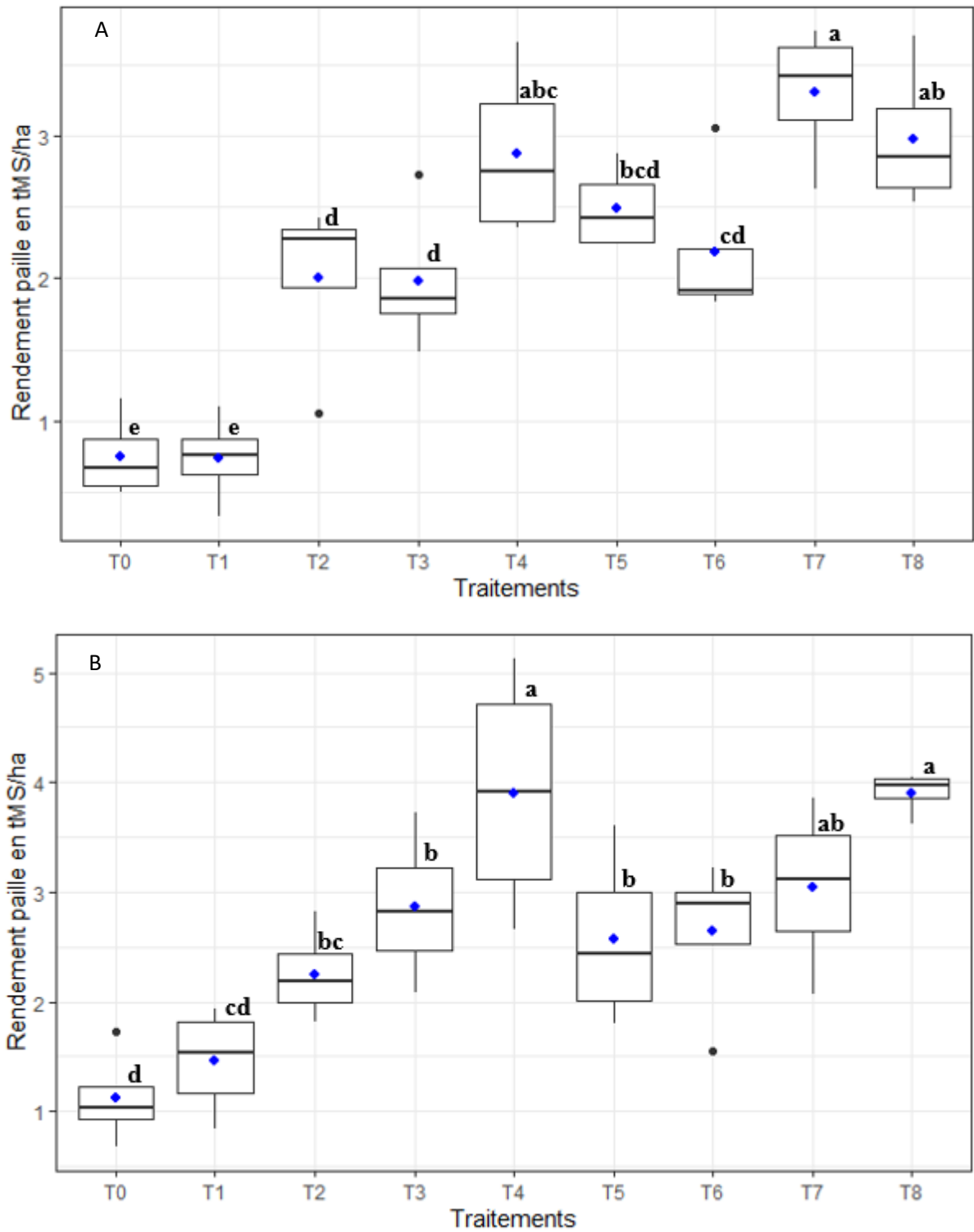


Figure 14 : rendement paille de Suwan-1 (A) et Panar (B)

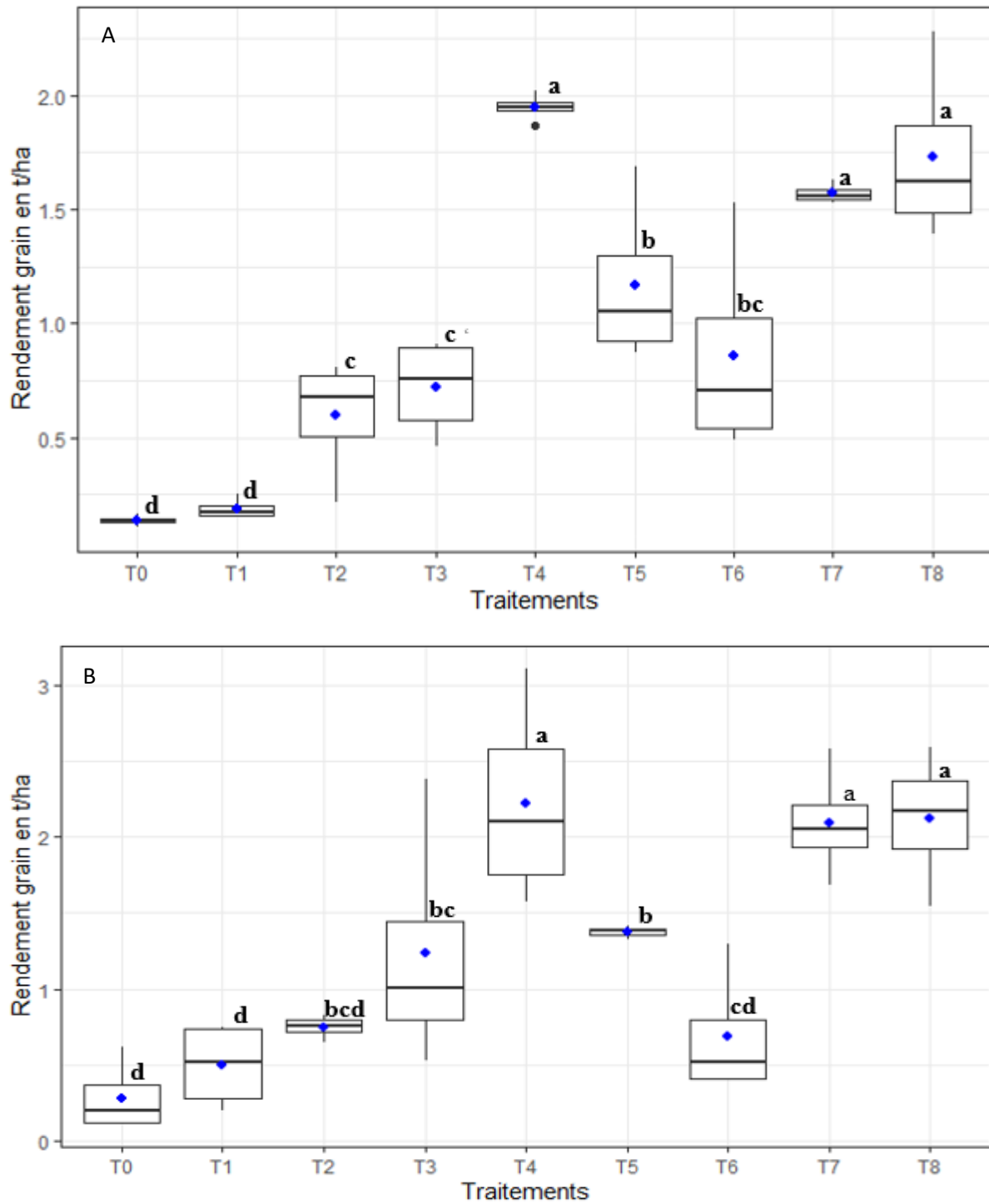


Figure 15 : rendement grains de Suwan-1 (A) et Panar (B)

3.1.5. Relation entre le rendement grains et ses composantes

Le test de corrélation entre les paramètres de rendement et le rendement a montré des corrélations significatives ($p < 0,05$). La matrice de corrélation de Pearson a indiqué des corrélations positives et négatives significatives entre les variables (Tableaux 11 et 12). Cependant, la hauteur a une corrélation positive variant entre 0,95 et 0,98 avec la longueur des épis, le nombre de grains et le poids des grains. Une forte corrélation positive est notée entre

les rendements en pailles et en grains et le poids des grains et le nombre de grains ($r > 0,85$). Cependant, une corrélation négative a été notée entre 50% de floraison mâle et femelle et les autres paramètres de rendement tels que le poids des 1000 grains, la longueur des épis, le nombre de lignes des épis, le nombre et le poids des épis.

L'analyse en composantes principales (ACP) des différents paramètres de rendement et du rendement a révélé que les axes F1 et F2 ont contribué respectivement à 95,41% (Figure 16a) et 91,08% (Figure 16b) de la variabilité étudiée. Suivant l'axe F1, les traitements présentent une hauteur, un nombre de grains/épi, une longueur d'épi, un poids grains/épi, un rendement grain et paille élevés pour la partie positive de l'axe et une date de 50% de floraison mâle et 50% de floraison femelle élevés pour la partie négative de l'axe. Cela rend compte de la forte corrélation qui existe entre ces paramètres. Par contre, suivant l'axe F2, les traitements présentent un nombre de ligne de grains/épi, un nombre de feuilles à 79 JAS et un poids de 1000 grains élevés. Ainsi, les traitements sont repartis en deux groupes (A et B). Le groupe A est constitué des traitements T4, T5, T7 et T8 caractérisés par une hauteur, un nombre de grains/épi, une longueur d'épi, un poids grains/épi, un rendement grain et paille élevé et une floraison précoce. Le groupe B quant à lui est constitué des traitements T0, T1, T2, T3 et T6 caractérisés par une floraison tardive et un rendement grain et paille faible (Figure 16).

Tableau 11: matrice de corrélation des paramètres de croissance, de rendement et le rendement de la variété suwan

Variables	Poids 1000 grains	Longueur épis	Nbre de lignes de grains/épi	Nbre de grains/épi	Poids grains/épi	50% FM	50% FF	Hauteur au 79 JAS	Nbre de feuilles au 79 jas	rdt paille	rdt grains
Poids 1000 grains	1										
Longueur épis	0,82	1,00									
Nbre de lignes de grains/épi	0,55	0,89	1,00								
Nbre de grains/épi	0,72	0,89	0,93	1,00							
Poids grains/épi	0,84	0,93	0,89	0,97	1,00						
50% FM	-0,77	-0,86	-0,87	-0,98	-0,98	1,00					
50% FF	-0,71	-0,90	-0,92	-0,95	-0,95	0,95	1,00				
Hauteur au 79 JAS	0,77	0,97	0,94	0,96	0,96	-0,93	-0,97	1,00			
Nbre de feuilles au 79 jas	0,59	0,88	0,97	0,94	0,91	-0,92	-0,97	0,95	1,00		
rdt paille	0,74	0,93	0,94	0,95	0,95	-0,92	-0,95	0,98	0,93	1,00	
rdt grains	0,76	0,81	0,80	0,88	0,89	-0,88	-0,91	0,90	0,82	0,93	1,00

Tableau 12: matrice de corrélation des paramètres de croissance, de rendement et le rendement de la variété Panar

Variables	Poids 1000 grains	Longueur épi	Nbre de lignes de grains/épi	Nbre de grains/épi	Poids grains/épi	50% FM	50% FF	Hauteur au 79 JAS	Nbre de feuilles au 79 jas	rdt paille	rdt grains
Poids 1000 grains	1										
Longueur épi	0,59	1									
Nbre de lignes de grains/épi	0,75	0,46	1								
Nbre de grains/épi	0,79	0,82	0,84	1							
Poids grains/épi	0,88	0,82	0,83	0,98	1						
50% FM	-0,51	0,75	-0,56	-0,79	-0,76	1					
50% FF	-0,45	0,84	-0,50	-0,80	-0,75	0,97	1				
Hauteur au 79 JAS	0,73	0,89	0,74	0,98	0,95	-0,79	-0,84	1			
Nbre de feuilles au 79 jas	0,75	0,75	0,78	0,83	0,85	-0,84	-0,80	0,80	1		
rdt paille	0,63	0,94	0,48	0,86	0,85	-0,80	-0,87	0,94	0,71	1	
rdt grains	0,78	0,87	0,74	0,97	0,96	-0,83	-0,86	0,98	0,83	0,91	1

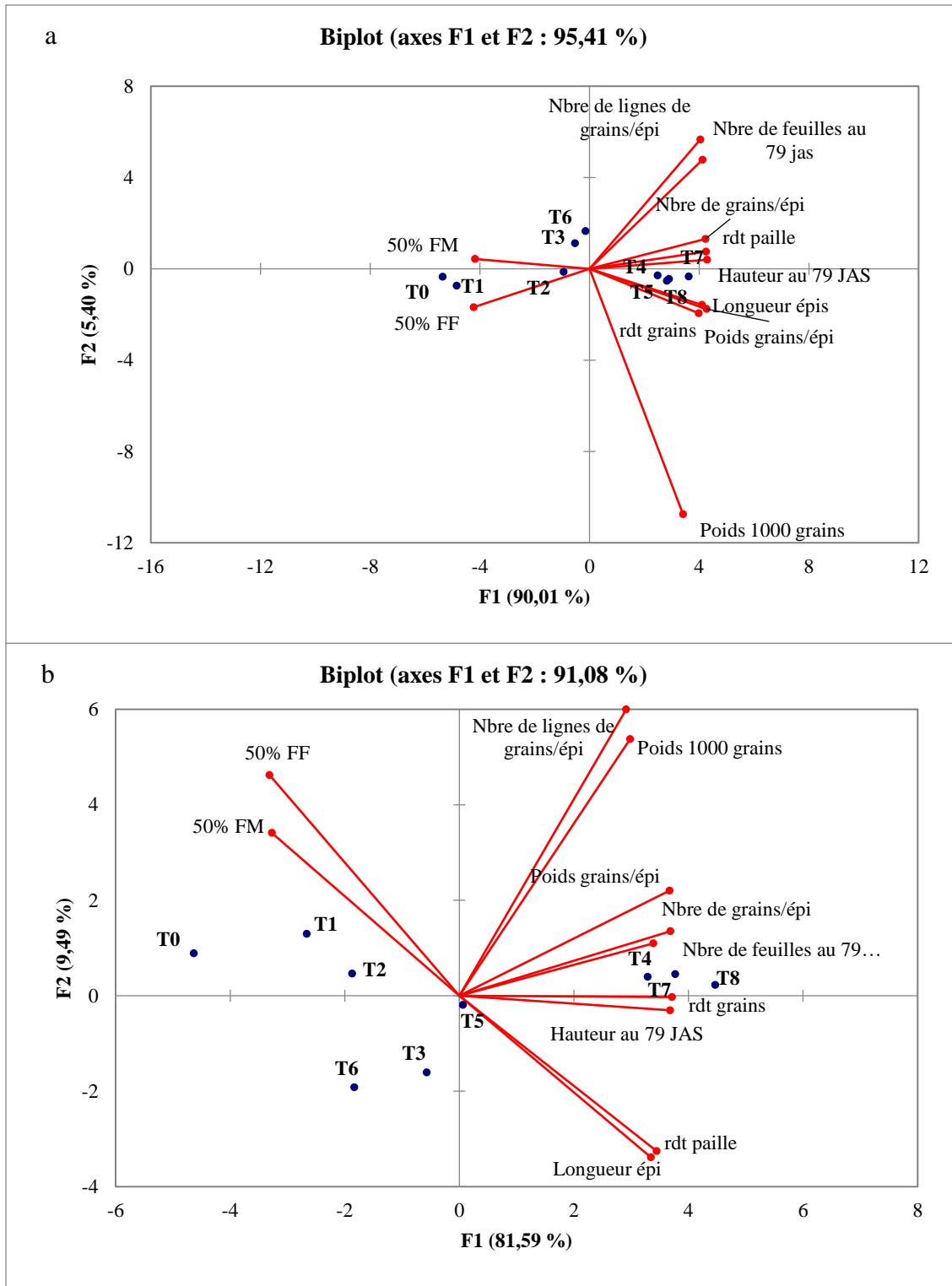


Figure 16: relation entre le rendement grains et ses composantes

3.1.6. La réponse de rendement aux nutriments N, P et K

La réponse du rendement aux nutriments est la différence de rendement entre le rendement atteignable par le traitement NPK (T4) et le rendement limité en nutriments (-N, -P et -K). Elle peut refléter dans une certaine mesure l'apport en nutriments indigènes du sol. Plus la réponse du rendement est élevée pour un nutriment donné, plus le sol est pauvre pour cet élément. L'omission de N a provoqué la plus grande perte de rendement grains de maïs suivi de l'omission de P et de l'omission de K pour les deux variétés. Ainsi, les réponses du rendement pour N, P et K sont respectivement de 1,76 t/ha, 1,35t/ha et 1,23t/ha pour la variété Suwan-1 et de 1,72t/ha, 1,47t/ha et 0,99t/ha pour la variété Panar (Figure17). Cela indique que l'azote est le premier nutriment limitant le rendement en grains du maïs suivi de P dans les conditions pédoclimatiques de Séfa.

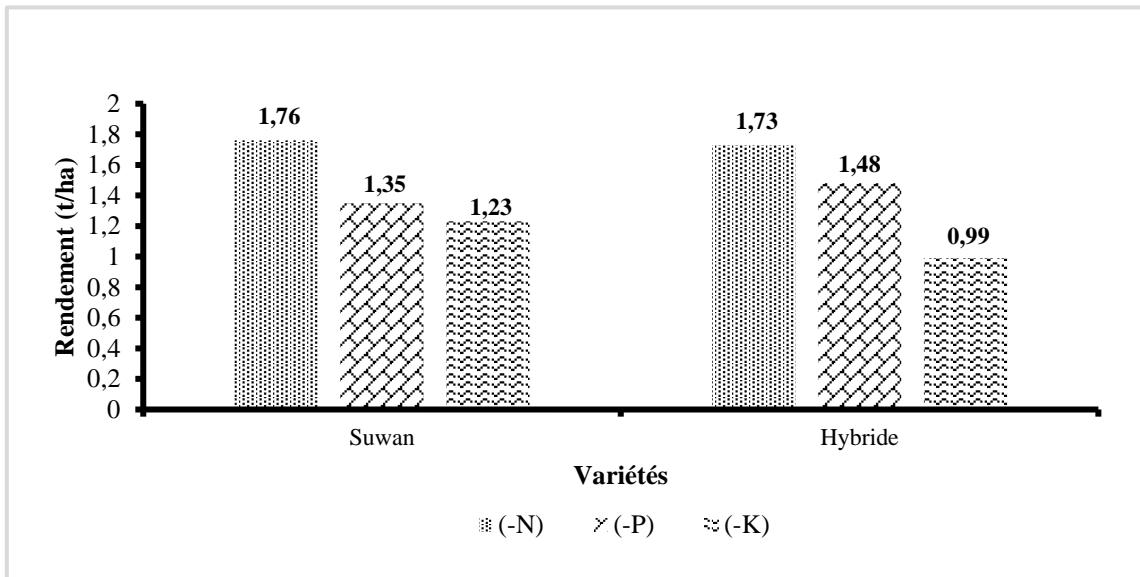


Figure 17: Réponse du rendement aux nutriments N, P et K

3.1.7. Efficacité agronomique

Une différence de rendement des traitements sur le contrôle s'explique par l'efficacité agronomique (AE) de tous les nutriments appliqués. Les efficacités agronomiques de N (AE_N), de P (AE_P) et de K (AE_K) pour le Suwan_1 et le Panar sont consignées dans le tableau 13. Une grande variation a été notée entre les traitements en ce qui concerne l' AE_N , l' AE_P et l' AE_K . EA_N varie de 2 à 13 kg de grains / kg de N appliqué, AE_P varie entre 1 à 53 kg de grains / kg de P appliqué et AE_K quant à elle varie de 1 à 53 kg de grains / kg de K appliqué. Ainsi les traitements T5, T7 et T8 ont eu les plus grandes efficacités et les traitements T1, T2 et T3 ont enregistré des efficacités plus faibles.

Tableau 13: Efficacités agronomique des engrais

Traitements	Suwan_1			Panar		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
T1		1			2	1
T2	3		5	2		3
T3	4	10		4	11	
T4	12	30	18	9	22	13
T5	9	45	45	9	47	47
T6	4	19		2	4	
T7	12	51	51	12	22	44
T8	13	53	53	11	27	27

3.1.8. Analyse économique

L'analyse de la rentabilité économique des traitements pour les variétés étudiées a montré une variabilité en fonction des variétés et des traitements. En effet, les traitements T5, T7 et T8 sont les plus rentables avec des ratios variants entre 2,8 et 5,4 comparés aux traitements T2, T3, T4 et T6 qui ont enregistré des rentabilités plus faibles caractérisées par des ratios compris entre ne 1 et 2. Les traitements T2, T3 et T6 ne sont pas rentables. De plus, une perte est notée sur le traitement T1 (Tableau 14).

Tableau 14: ratio valeur coût

Traitements	Suwan_1	Panar
T1	0,1	0,4
T2	2,0	1,4
T3	1,4	1,5
T4	3,5	2,5
T5	4,2	4,5
T6	2,2	0,6
T7	4,0	3,6
T8	5,4	2,8

3.2. Discussion

3.2.1. Caractéristiques du sol

Ce sol avec une texture sablo-limoneuse, un pH acide et une capacité d'échange cationique faible n'est pas favorable à la culture de maïs. La teneur en matière organique (MO) faible montre que le sol est peu fertile comparé au bon niveau de fertilité du sol qui est de 1,5 voire 2% de MO (Fall, 2013). Ceci s'explique par le fait que les conditions climatiques défavorisent l'accumulation de la matière organique par une importante minéralisation. En effet, avec un C/N qui est en moyenne de 12,58, la faible quantité de MO qui s'accumule est

rapidement décomposée sous l'action des paramètres physiques et chimiques (Fall, 2013). Cela conduit à une baisse du taux de carbone (Pallo et *al.*, 2009). La MO du sol, de par sa relation étroite avec la fertilité, est l'un des facteurs qui assurent une bonne production végétale durable (Zro et *al.*, 2012). Les niveaux de l'azote, du phosphore et du potassium sont faibles. Ce faible niveau du phosphore rend marginale la production du maïs (Temgoua et *al.*, 2017).

3.2.2. Effet des traitements sur les paramètres de croissance des plants de maïs

Les différents traitements ont influencé les paramètres de croissances des plants de maïs. En effet, le traitement T7 basé sur la recommandation d'engrais du *Nutrient Expert* a produit une hauteur plus élevée au 79 JAS que la hauteur du traitement T5 basé sur la pratique paysanne, la hauteur du traitement T8 basé sur la recommandation de l'Etat et la hauteur du traitement T6 basé sur l'analyse de sol. La différence est non significative pour T5 et le T8 et est significative pour le T6. Ces résultats corroborent ceux de Gupta et *al.* (2016) qui ont obtenu une hauteur du T7 plus importante que le T8 et le T5 sur le riz dans le district du Morang au Népal. Banerjee et *al.* (2014) ont obtenu une hauteur avec T7 plus élevée que la hauteur au niveau du TR et une hauteur du T7 significativement plus élevée que la hauteur du T5 au 60 JAS.

3.2.3. Effet des traitements sur les composantes du rendement

La plus grande longueur d'épi, le plus grand nombre de lignes de grains par épi, le plus grand nombre de grains par épi et le poids des grains par épi les plus importants ont été enregistrés au niveau du traitement recommandé par le *Nutrient expert* (T7) comparé aux traitements T5 (paysan), T6 (soil testing) et T8 (recommandé) pour la variété Suwan-1. En ce qui concerne la variété Panar, le traitement T7 a eu les meilleures performances que les traitements T5 et T6 pour les mêmes paramètres. Par contre, les performances du traitement T8 sont meilleures que celles du T7. Dahal et *al.*, (2018) ont eu également des résultats similaires selon lesquels la pratique du T7 sur le blé et le maïs a eu les meilleures performances par rapport à la pratique T5 au Népal en ce qui concerne la longueur d'épis, le nombre de lignes de grains par épi, le nombre de grains par épi et le poids des grains par épi. Banerjee et *al.*, (2014) ont également constaté que l'application des éléments nutritifs sur la base de recommandations obtenues du système d'aide à la décision comme «NE » (T7) donnait les meilleures valeurs de paramètres de rendement. Une plus grande taille d'épi peut être le résultat d'une activité photosynthétique améliorée suivie d'une utilisation efficace du N appliqué, d'un transfert efficace des métabolites et de l'accumulation subséquente de ces métabolites dans l'épi (Dahal et *al.*, 2018). Le traitement T5 a eu un poids de 1000 grains plus élevé par rapport aux traitements T7, T6 et T8 au niveau de la variété Suwan-1. Au niveau de la variété Panar, le

traitement T7 a eu un poids des 1000 grains plus élevé que ceux des traitements T5, T6, mais moins élevé que les traitements T8. Ces résultats sont en accord avec ceux de Dahal et *al.*, (2018) en ce qui concerne la variété Panar qui ont trouvé un poids des 1000 grains du T7 plus élevé que celui du T5, mais ils sont différents en ce qui concerne la variété Suwan-1. Le poids des 1000 grains du T7 le plus élevé pourrait s'expliquer par une augmentation de la teneur en chlorophylle dans les feuilles, ce qui conduit à une photosynthèse plus importante pendant le développement du grain (Awan et *al.*, 2006).

Les meilleures performances du traitement T7 par rapport aux traitements T5 pourraient s'expliquer par des meilleurs moments d'application de N comme l'ont signalé Bhardwaj et *al.*, (2010). Ces meilleures performances pourraient aussi être dues à une application des doses plus importantes de N par le NE ce qui a diminué la concurrence pour les nutriments qui permettent à la plante d'accumuler plus de biomasse avec une plus grande capacité de conversion, conduisant à une longueur d'épis, un nombre de lignes de grains par épi, un nombre de grains par épi et un poids des grains par épi plus important (Dahal et *al.*, 2018).

3.2.4. Effet des traitements sur le rendement du maïs

Des différences d'effets entre les traitements sur le rendement ont été notées. En effet, le traitement T7 a eu un rendement en paille plus élevé que les traitements T5, T6 et T8 pour la variété suwan_1. En ce qui concerne la variété Panar, le rendement paille du traitement T7 a été également plus important que ceux des traitements T5 et T6, mais moins que celui du T8. Ces résultats corroborent ceux de Dahal et *al.*, (2018) qui ont obtenu un rendement en paille du T7 supérieur à celui du T5 sur le maïs et le blé au Népal. Wang et *al.* (2014) et Bhuiya et *al.* (2020) ont également affirmé que le T7 a eu un rendement en pailles plus important que le T5 sur le maïs. Ces résultats pourraient s'expliquer par une gestion plus judicieuse des nutriments par le T7 (Tetarwal et *al.*, 2011 ; Xinpeng et *al.*, 2014 et Khanal et *al.*, 2017).

La gestion spécifique des éléments nutritifs par l'application d'engrais à base du *Nutrient Expert* (T7) a enregistré un rendement grain significativement plus important que l'application d'engrais basée sur la pratique paysanne (T5) et l'application d'engrais basée sur l'analyse de sols (T6). Ces résultats sont en phase avec ceux de Mirasol et *al.*, (2012) qui montrent un rendement en grains du T7 significativement plus important que le T5 dans 22 champs d'agriculteurs sur le maïs hybride répartis sur 5 sites en Indonésie. Ces résultats corroborent également ceux de Samjhana et *al.*, (2017) qui renseignent d'un rendement grain du T7 significativement plus important que celui du T5 sur le maïs hybride dans l'Est du Teraï

du Népal. Pour la variété suwan_1 l'application d'engrais basée sur la recommandation (T8) a eu un rendement en grains supérieur à celui du T7.

Le rendement grain du T7 plus élevés que celui du T5 peut être attribué à un meilleur ajustement dans l'application des éléments nutritifs pour répondre aux besoins spécifiques des cultures (Pooniya et al., 2015). Il peut être aussi attribué à un meilleur moment d'application des engrais augmentant ainsi la disponibilité des nutriments aux phases physiologiques critiques se traduisant par une meilleure croissance et enfin une augmentation du rendement grain (Vikram et al., 2015). La performance du T7 pourrait principalement être attribuée à une application équilibrée des éléments nutritifs plutôt qu'à l'augmentation des taux d'éléments nutritifs (Satyanarayana et al., 2013). Veer et al., (2017) ont trouvé contrairement aux présents résultats, un rendement en grains maïs du T7 supérieur à celui du T8 dans un système de rotation maïs-blé.

3.2.5. La réponse au rendement des nutriments

La réponse au rendement dépend de la fertilité du sol mais aussi dépend également du climat, des caractéristiques du sol et des nutriments résiduels de la culture précédente (Pampolino et al., 2012). Une grande variabilité de la réponse de rendement à l'application des nutriments N, P et K a été notée. En effet, le nutriment N a montré une réponse de rendement plus important suivi de P et de K. Cela indique que le N indigène du sol est le plus faible suivi de l'apport de P et enfin de K, ce qui est confirmé par les analyses de sol. Ces dernières ont montré des teneurs de N et de P faibles et de K plus ou moins faible. Plus la teneur d'un élément du sol est faible, plus la réponse au rendement de cet élément est importante. C'est ce qui explique cette différence de réponses au rendement de ces différents nutriments. Ces résultats sont en phase avec ceux de Xinpeng et al., (2017) qui ont trouvé une réponse au rendement de N plus élevé en chine sur le riz. Ces résultats corroborent ceux de Shehu et al., (2018) qui affirment que l'azote est le nutriment le plus limitant dans la savane nord du Nigeria et ceux de Vanlauwe et al. (2011) qui affirment que l'azote est reconnu comme le nutriment le plus limitant dans le système de culture céréalière sur de vastes zones de l'Afrique Sub-Saharienne. La carence des nutriments du sol pourrait être due à l'élimination des résidus de culture après récolte par brulage ou par transport et la culture intensive et longue du sol sans réapprovisionnement adéquat en éléments nutritifs. Ce fait a été souligné dans les travaux de Kamara, (2017) et Kwari et al., (2011). La carence du phosphore pourrait être aussi due à une capacité forte de désorption de P du sol comme l'ont signalé Osemwotai et al., (2005).

3.2.6. L'efficacité agronomique

L'efficacité agronomique (AE) est l'augmentation du rendement par unité de nutriment appliquée. Elle dépend en grande partie des pratiques de gestion des nutriments (Xinpeng et *al.*, 2017). Ainsi, les AE_N des traitements paraissent faibles comparé à l'intervalle donné par Dobermann (2005) surtout pour le T6 et le T5. Une variation de l'AE a été notée entre les différents traitements et les différents nutriments. En effet, le traitement T7 a eu des meilleurs AE pour le N, le P et le K par rapport au traitement T5 pour la variété Suwan_1. Par contre, pour la variété Panar, le traitement T7 a eu une AE_N plus importante que T5, mais avec une AE_P et AE_K moins importantes. Ces résultats corroborent, pour la variété Suwan_1, ceux de Xinpeng et *al.*, (2017) qui ont obtenu une AE du T7 plus importante que celle du T5 sur le riz en Chine. Pooniya et *al.*, (2015) ont trouvé une AE_N du T7 plus importante que celle du T5 en Inde sur le maïs et le blé, ce qui corrobore nos résultats. Banerjee et *al.*, (2014) ont constaté une AE_N plus importante sur l'application des éléments nutritifs basée sur la recommandation obtenue du système d'aide à la décision (T7) que sur l'application des éléments nutritifs basée sur la pratique paysanne (T5) en Inde sur le maïs.

Les AE_P et AE_K sont plus importantes que l' AE_N pour les traitements et sur les deux variétés. Cela pourrait s'expliquer par le fait que la quantité de N appliquée est plus importante que celle de P et de K appliquées (Pooniya et *al.*, 2015).

3.2.7. Rentabilité des engrais

Selon Kam (2016), une formule d'engrais est économiquement rentable lorsque son $RVC > 2$. Ainsi, le traitement T6 n'est pas rentable pour toutes les deux variétés. Le traitement T5 est plus rentable que le traitement T7 pour toutes les deux variétés. Ces résultats ne corroborent pas ceux de Dahal et *al.*, (2018) qui ont trouvés une rentabilité plus importante du T7 que du T5 au Népal sur le maïs et le blé. De même que pour Dahal et *al.*, (2018), Satyanarayana et *al.*, (2013) ont montré une rentabilité du T7 plus importante que celle du T5 en Inde sur le maïs. Ces résultats ne corroborent pas ceux de Xinpeng et *al.*, (2014) qui ont conclu que le T7 est plus bénéfique que le T5.

Conclusion et perspectives

Les résultats obtenus montrent que l'azote est le nutriment le plus limitant du rendement grain du maïs dans les conditions pédoclimatiques de Séfa, il est suivi par P et K. Par ailleurs, les résultats ont montré une variation considérable du rendement grain et paille en fonction des traitements et même pour les composantes du rendement. Une différence significative a été notée entre les traitements pour la hauteur des plantes, le nombre de feuilles pour la variété Panar, le nombre de jours à 50% floraison mâle et femelle, la longueur épi, nombre de ligne de grains par épi, nombre de grains par épi et poids grains par épi. Une différence significative a été également notée entre les traitements sur le rendement paille et grain. En effet, le traitement T7 a eu une hauteur, un nombre de feuilles, un nombre de jours à 50% floraison mâle et femelle, une longueur d'épi par plant, un nombre de lignes par plant, un nombre de grains par plant, un poids grains par épi et un poids des 1000 grains non significativement plus importants que le T5. Le traitement T7, avec une différence de 400 kg/ha au niveau de la variété Suwan-1 et 720 kg/ha au niveau de la variété Panar, a un rendement grain significativement plus important que le T5 au seuil de 5%. Le T7 semble être plus performant que le T5 sur les paramètres de croissance, les paramètres de rendement et sur le rendement paille et grains. L'étude de rentabilité montre que les deux traitements T7 et T5 présentent la même rentabilité.

Cependant, il serait nécessaire de :

- poursuivre cette étude sur plusieurs campagnes et sur plusieurs parcelles d'agriculteurs afin d'évaluer le NE de façon pluriannuelle et multi sites;
- combiner les engrais minéraux et la fumure organique pour évaluer la réponse du NE ;
- conduire l'étude dans d'autres zones agro-écologiques du pays pour pouvoir évaluer le NE selon les caractéristiques climatiques de chaque zone de culture.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anani C. K. S., 2016.** Effets combinés de la fertilisation azotée, des résidus de récolte et du travail du sol sur le rendement du maïs (*Zea mays sp*) et la dynamique des macroéléments du sol. Cas du dispositif expérimental d'imerintsiatosika. Mémoire de master 2, université d'Antananarivo / Madagascar. 61p.
- ANONYME, IFDC, 2010.** Les éléments nutritifs des plantes et leur rôle. Fiche technique 3. Rwanda/Kigali : 18 pp.
- ANSD, 2015.** Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie. Service Régional de la Statistique et de la Démographie de Sédhiou. Situation économique et Sociale régionale 2012. 12p
- Awan TH, Manzoor Z, Safdar ME and Ahmad M, 2006.** Studies on the influence of primary, secondary and tertiary tillers on yield and yield related traits in basmati-2000. *Pakistan J Sci* **59** (1-2) : 43-46.
- Bambara F. A. A., 2012.** Optimisation de la fertilisation azotée du maïs en culture pluviale dans l'ouest du Burkina Faso : utilisation du modèle agronomique DSSAT. Mémoire de fin de cycle à l'institut du développement rural de l'université polytechnique de Bobo-Dioulasso au Burkina Faso. 60p
- Banerjee M., Gopal S. B., Malik G.C, 2014.** Precision Nutrient Management through Use of LCC and Nutrient Expert® in Hybrid Maize Under Laterite Soil of India. *Universal Journal of Food and Nutrition Science* **2**(2): 33-36. DOI: 10.13189/ujfns.2014.020202
- Béroubé, B., 2015.** Carence dans le maïs. Dans le cadre du stage professionnel en agronomie, AGN-3500. Université Laval, Chez Société Majéco Inc. 13p
- Bhardwaj V., Yadav V. and Chauhan S., 2010.** Effect of nitrogen application timings and varieties on growth and yield of wheat grown on raised beds. *56*(2): *Archives of Agronomy and Soil Science* **56**(2): 211-22. DOI: 10.1080/03650340903092218
- Bhuiya G.S., Tanmoy S., Mahua B. and Malik G.C., 2020.** Growth, Productivity, Nutrient uptake and Economics of Hybrid maize (*Zea mays L.*) as Influenced by Precision Nutrient Management. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology* **13**(2): 213-218, DOI: 10.30954/0974-1712.02.2020.15

- Bot, A. et Benites, J., 2005.** *The Importance of Soil Organic Matter: Key to Drought-Resistant Soil and Sustained Food and Production.* FAO Soils Bulletin 80. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2005.95p
- CILSS, 2000.** Comité Inter-Etats de Lutte contre la Secheresse dans le Sahel. Proposition d'éléments d'appui à la gestion intégrée de la fertilité des sols dans les pays membres du CILSS : cas du Sénégal. Rapport définitif. 46p
- CIMMYT, 1991.** Réalités et tendances : potentiel maïsicole de l'Afrique Subsaharienne, Mexico, Mexique, 71 p.
- CIMMYT, 2000.** World Maize Facts and Trends. Meeting World Maize Needs: Technological opportunities and priorities for the public sector. Mexico, D.F: 60 p.
- Dahal S., Shrestha A., Dahal S. et Amgain L.P., 2018.** Nutrient Expert Impact on Yield and Economic In Maize and Wheat. *Int. J. Appl. Sci. Biotechnol.* Vol 6(1): 45-52. DOI: 10.3126/ijasbt.v6i1.19469
- DAPSA, 2019.** Direction de l'Analyse, la Prévision et les Statistiques agricoles. Rapport d'évaluation préliminaire des récoltes de la campagne 2018/2019 et de la sécurité alimentaire et de la nutrition. 32p
- Dembélé N. N., 2001.** Sécurité alimentaire en Afrique Sub-saharienne : Quelle Stratégie de Réalisation ? Rapport d'évaluation Michigan State University/PASIDMA/Chambre d'Agriculture du Mali, Bamako. 25p
- Dobermann, A.R., 2005.** "Nitrogen Use Efficiency – State of the Art". *Agronomy & Horticulture -- Faculty Publications.* 316.
- Dobermann A. R., 2007.** Efficacité de l'utilisation des nutriments. Mesure et gestion. Dans: Kraus, A., Isherwood, K. et Heffer, P., Eds., *Fertilizers Best Management Practices.* Actes de l'Association internationale de l'industrie des engrais, Bruxelles, Belgique, 7-9 mars 2007, 1-22.
- Doztsi A.K., 2002.** Application du modèle CERES-Maize de DSSAT à l'analyse des stratégies de semis pour le maïs (*Zea mays* L.) dans les conditions de SEVE KPOTA. Mémoire d'ingénieur agronome, IFDC Afrique/ESA -UL, Lomé, Togo, 91 p.

- Dupriez H. et Leener P., 1983.** Agriculture tropicale en milieu paysan africain. Editions Terres et vie, L'harmattan, Paris, France: 280p.
- Ellis R. H., Summerfield R. J., Edmeades G. O., et Roberts E. H., 1992.** « Photoperiod, Temperature, and the Interval from Sowing to Tassel Initiation in Diverse Cultivars of Maize ». *Crop Science* 32, n° 5 (1992): crops1992.0011183X003200050033x. p. 1225-1232 <https://doi.org/10.2135/crops1992.0011183X003200050033x>.
- Ezeh A.C., Bongaarts J., Mberu B., 2012.** Global population trends and policy options. The Lancet 380.9837 :142-148 ferralsol du Sud-Est de la RD Congo. *Journal of Applied Biosciences* 66 : 5070-5081
- Faliisse A. et Lambert J., 1994.** Fertilisation minérale et organique. In : TAYEB AMEZIANI : E.H.: PERSONS E. Agronomie moderne : Bases physiologiques et agronomiques de la production végétale. Hatier-AUPELF-UREP, pp 377-398.
- Fall T., 2013.** Production herbagère et fertilité des sols : indicateurs d'intensification écologique dans le bassin de collecte de la laiterie du berger (Nord-Sénégal). Mémoire de master 2 du département d'agroforesterie de l'université Assane Seck de Ziguinchor. 74p
- Gay J. P., 1984.** Fabuleux maïs : histoire et avenir d'une plante, AGPM, Info compo, Pau. 295 p.
- Godard C., 2005.** Modélisation de la réponse à l'azote du rendement des grandes cultures et intégration dans un modèle économique d'offre agricole à l'échelle européenne. Application à l'évaluation des impacts du changement climatique. Thèse de doctorat de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon en France. 279p
- Goebel R. 1995.** Les recherches en entomologie sur le fleuve Sénégal : bilan et perspectives dans le contexte des cultures irriguées au Sahel. In : Boivin Pascal (ed.), Dia I. (ed.), Lericollais André (ed.), Poussin Jean-Christophe (ed.), Santoir Christian (ed.), Seck S.M. (ed.). *Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal*. Paris : ORSTOM, p. 243-264. (Colloques et Séminaires). Nianga, Laboratoire de la Culture Irriguée : Atelier ORSTOM-ISRA, Saint-Louis (SEN), 1993/10/19-21. ISBN 2-7099-1272-4.

- Gueye M., 2016.** Amélioration des techniques de semis, de fertilisation et de récolte du fonio blanc (*Digitaria exilis* Stapf, Poaceae) au Sénégal. Thèse de doctorat en Biologie, Physiologie et Productions Végétales. Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal), 101 pages + Annexes.
- Gupta G., Shrestha A., Shrestha A., Amgain L.P., 2016.** Evaluation of Different Nutrient Management Practice in Yield and Growth in Rice in Morang District. *Adv Plants AgricRes* 3(6): 00119. DOI: 10.15406/apar.2016.03.00119
- Hugues I. T., John B. M., Lucky L. M., Ismael M. K., Antoine K. L., & Luciens N. K., 2018.** Influence du moment d’application du NPK sur la croissance et le rendement du maïs (*Zea mays* L.) installé sur un ferralsol ». *Journal of Applied Biosciences* 127: 12794-12803. <https://doi.org/10.4314/jab.v127i1.4>.
- Ilunga T. H., Muganguzi N. T., Kidinda K. L., Banza M. J., Nsenga N. S., Mpooyo M. G., Tshipama T. D., Lukusa M. L. and Nyembo K. L., 2015.** Evaluation of Maize Response (*Zea mays* L.) to American *Journal of Plant Nutrition and Fertilization Technology* 5 (3): 96-105
- Ilunga T.H., Sadiki M.P., Tshibuyi K.B., Nsenga N. S., Mazinga K. M., Nyembo K. L. et Baboy L. L., 2016.** Les faibles doses de biomasses vertes de légumineuses, des bons substituts des engrais minéraux dans la maïsiculture à Lubumbashi ? *Afrique Science*.12(2) : 317 – 325
- INP, 2013.** Institut National de Pédologie. Atelier de lancement du partenariat sur les sols à Accra. 15p
- IPAR, 2017.** Initiative Prospective Agricole et Rurale. Etude de la consommation des céréales de Base au Sénégal. Rapport final, 128p
- ISRA, 2008.** Institut Sénégalaise de Recherches Agricoles. État des ressources phylogénétiques pour l’alimentation, et l’agriculture dans le monde, Second rapport général du Sénégal, 45 p.
- ISRA, 2012.** Institut Sénégalaise de Recherches Agricoles. Catalogue officiel des espèces et variétés cultivées au Sénégal. Ministère de l’agriculture et de l’équipement rural 1ere édition. 172p.

- KAM K.E., 2016.** Evaluation de l'efficacité des doses d'engrais pour la production de riz pluvial à l'ouest du Burkina-Faso. Mémoire de fin de cycle à l'université polytechnique de Bobo-Bioulasso (U.P.B) au Burkina-Faso. 66p
- Kamara A.Y., 2017.** Good agricultural practices for maize cultivation: the case study of West Africa. In; Watson V. (Eds.), achieving sustainable cultivation of maize, volume: 2, pp.49-60. *Burleigh Dodds Science Publishing*.
<https://doi.org/10.4324/9781351114271-8>.
- Kambire H., Abdel-Rahman G., Bacye B. and Dembele Y., 2010.** Modeling of Maize Yields in the South-Sudanian Zone of Burkina Faso - West Africa. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. SeL*, 7 (2): 195-201.
- Khanal S., Dhakal B., Bhusal K. and Lal P. A., 2017.** Assessment of Yield and Yield Attributing Characters of Hybrid Maize using Nutrient Expert® Maize Model in Eastern Terai of Nepal. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 2(5): 2706-2709.
- Kwari J. D., Kamara A.Y., Ekeleme F., Omoigui L., 2011.** Soil fertility variability in relation to the yields of maize and soybean under intensifying cropping systems in the tropical savannas of Northeastern Nigeria, in: Bationo, A., Waswa, B., Okeyo, J.M., Maina, F., Kihara, J.M. (Eds.), *Innovations as Key to the Green Revolution in Africa: Exploring the Scientific Facts*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 457–464.
https://doi.org/10.1007/978-90-481-2543-2_47
- Lambert J., Tremblay N. et Hamel CH., 1994.** Nutrition minérale des plantes cultivées. *In: TAYEB AMEZIANE E.H.; PERSONS E.; Biologie moderne: Bases physiologiques et agronomiques de la production végétale*. Hatier-AUPELF-UREF, pp 269-292.
- Lerot, B., 2006.** Les éléments minéraux. 34p
- Lutz W., Sanderson W., Scherbov S., 2001.** The end of world population growth. *Nature*, 412 (6846) ; 543-545
- Macauley H. et Ramadjita T., 2015.** Les cultures céréalières: riz, maïs, millet, sorgho et blé. *Nourrir l'Afrique*, document de référence. 38p

- Metz P. et Nass D., 2015.** Fertilisation des grandes cultures. Guide technique 36p.
- Mirasol F., Christian W., Julie M. P., Adrian J., Myles J. F., 2012.** Development approach and evaluation of the Nutrient Expert software for nutrient management in cereal crops. *Computers and Electronics in Agriculture* 88(2012) 103-110.
- Ndiaye M. et Sidibé M., 1992.** Recherche de formules d'engrais N-P-K économiquement rentables pour la culture du maïs pluvial. Rapport. 29p
- Njoroge R., Otinga A.N., Okalebo J.R., Pepela M. and Merckx R., 2018.** Maize (*Zea mays L.*) Response to Secondary and Micronutrients for Profitable N, P and K Fertilizer Use in Poorly Responsive Soils. *Agronomy* 8, 4(49) ; 1-20
- Nyembo K. L., Banza M. J., Salima B. S. N., Tshipama T. D., Kiluba K. M., Mpoyo M. G., Muteba K. M., 2015.** Les faibles doses d'engrais azotés ne permettront pas d'optimiser le rendement des nouvelles variétés de maïs dans la région de Lubumbashi (RD Congo). *International Journal of Innovation and Applied Studies* 12 : 176-182
- Nyembo K.L., Useni S.Y., Chukiyabo K.M., Tshomba K.J., Ntumba N.F., Muyambo M.E., Kapalanga K.P., Mpundu M.M., Bugeme M.D., Baboy L.L., 2013.** Rentabilité économique du fractionnement des engrais azotés en culture de maïs (*Zea mays L.*) : cas de la ville de Lubumbashi, sud-est de la RD Congo. *Journal of Applied Biosciences* 65:4945-4956
- Nyembo K.L., Useni S.Y., Mpundu M.M., Bugeme M.D., Kasongo L.E., Baboy L.L., 2012.** Effets des apports des doses variées de fertilisants inorganiques (NPKS et Urée) sur le rendement et la rentabilité économique de nouvelles variétés de *Zea mays L.* à Lubumbashi, Sud Est de la RD Congo. *Journal of Applied Biosciences* 59: 4286-4296
- Osemwotai, O., Ogboghodo, I.A., Aghimien, E.A., 2005.** Phosphorus retention in soils of Nigeria - A review. *Agric. Rev.* 26, 148–152.
- Pallo F.J.P., Sawadogo N., Zombre N.P. & Sedogo P.M., 2009.** Statut de la matière organique des sols de la zone nord soudanienne au Burkina Faso, *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 13, 1, 139-142.
- Pampolino, M.F., Witt, C., Pasuquin, J.M., Johnston, A., Fisher, M.J., 2012.** Development approach and evaluation of the Nutrient Expert software for nutrient management in cereal crops. *Comput. Electron. Agric.* 88, 103–110.

- Pooniya V., Jat, S.L., Choudhary A.K., Singh A.K., Parihar C.M., Bana R.S., Swarnalakshmi, K., and Rana K.S. 2015.** Nutrient Expert assisted site specific nutrient management: An alternative precision fertilization technology for maize-wheat cropping system in South-Asian Indo-Gangetic Plains. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 85(8): 996-1002.
- RABAT., 2003.** Les engrais et leurs applications. Quatrième édition. 77 p.
- Rouanet G., 1984.** Le maïs : Le technicien d'Agriculture tropicale. Édition Maisonneuve et Larose, Paris, France, 142 p.
- Sagna P. 2005.** Dynamique du climat et son évolution récente dans la partie ouest de l'Afrique occidentale. Thèse de doctorat d'état ES lettre, UCAD, faculté des lettres et sciences humaines, département de Géographie, 790 pages.
- Samjhana K., Bishal D.I, Keshav B., Lal P.A., 2017.** Assessment of Yield and Yield Attributing Characters of Hybrid Maize using Nutrient Expert® Maize Model in Eastern Terai of Nepal. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*2(5) 2456-1878
- Sanchez P. A., Shepherd K. D., M. J., Place F. M., Buresh R. J. et Izac A. M. N., 1997.** Soil fertility replenishment in africa: An investment in natural resource capital: Replenishing Soil fertility in Africa. *Special Publication Number 51*: 1 - 47.
- Satyanarayana T., Majumdar K., Pampolino M., Johnston A.M., Jat M.L., Kuchanur P., Sreelatha D., Sekhar J.C., Kumar Y., Maheswaran R., Karthikeyan R., Velayutahm A., Dheebakaran Ga., Sakthivel N., Vallalkannan S., Bharathi C., Sherene T., SuganyaSJanaki., P., Baskar R., Ranjith T.H., Shivamurthy D., Aladakatti Y.R., Chiplonkar D., Gupta R., Biradar D.P., Jeyaraman S., and Patil S.G., 2013.** Nutrient Expert TM: A Tool to Optimize Nutrient Use and Improve Productivity of Maize. *Better Crops/Vol. 97*, 1-5
- Shehu, B.M., Merckx, R., Jibrin, J.M., Kamara, A.Y., Rurinda, J., 2018.** Quantifying variability of maize yield response to nutrient applications in the Northern Nigerian savanna. *Agronomy*8(2),18.<https://doi.org/10.3390/agronomy8020018>
- Smale M, Byerlee D, Jayne T, 2011.** Maize revolutions in sub-Saharan Africa. Document de travail sur la recherche politique n° 5659. Washington DC: Banque Mondiale. 47p

- Tahir M, Javed MR, Tanveer A, Nadeem MA, Wasaya A, Bukhari SAH, Rehman JU, 2009.** Effect of different herbicides on weeds, growth and yield of spring planted maize (*Zea mays L.*). *Pak. J. Life Soc. Sci.* 7(2): 168-174.
- Temgoua E., Tsafack H.N., Ngnikam E., Takuete R.G., Zena D. et Gabin R., 2017.** Fertilisation du maïs (*Zea mays L.*) à base d'urines humaines hygiénisées dans un oxisol de l'Ouest Cameroun. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 11(5): 2071-2081, ISSN 1991-8631
- Tetarwal J.P., Ram B. and Meena D.S., 2011.** Effect of integrated nutrient management on productivity, profitability, nutrient uptake and soil fertility in rainfed maize (*Zea mays*). *Indian Journal of Agronomy*, 56(4): 373- 376.
- Useni S.Y., Baboy L.L., Nyembo K.L., Mpundu M.M., 2012.** Effets des apports combinés de bio-déchets et de fertilisants inorganiques sur le rendement de trois variétés de *Zea mays L.* cultivées dans la région de Lubumbashi. *Journal of Applied Biosciences* 54 : 3935-3943
- Useni S.Y., Chukiyabo K.M., Tshomba K.J., Muyambo M.E., Kapalanga K.P., Ntumba N.F., Kasangij K.P., Kyungu K.A., Baboy L.L., Nyembo K.L. & Mpundu M.M., 2013.** Utilisation des déchets humains recyclés pour l'augmentation de la production du maïs (*Zea mays L.*) sur un ferralsol du Sud-Est de la RD Congo. *Journal of Applied Biosciences* 66 : 5070-5081
- Vandenput R., 1981.** Les principales cultures en Afrique centrale. Bruxelles : Administration général de la coopération au développement. 1252pp.
- Vanlauwe B., Kihara J., Chivenge P., Pypers P., Coe R., Six J., 2011.** Agronomic use efficiency of N fertilizer in maize-based systems in sub-Saharan Africa within the context of integrated soil fertility management. *Plant Soil* 339, 35–50
- Veer S., Anil K.P., Amit B. and Manish B. 2017.** Evaluation of Nutrient Expert Based Fertilizer Recommendation for Growth, Yield and Nutrient Uptake of Maize Hybrids and Soil Properties in Maize-Wheat Cropping System in Mollisol. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci.* 6(10): 3539-3550.
- Vikram A.P., Biradar D.P., Umesh M.R., Basavanneppa M.A., and Rao K.N.. 2015.** Effect of nutrient management techniques on growth, yield and economics of hybrid maize (*Zea mays L.*) in vertisols. *Karnataka j. Agric. Sci.* 28(4): 477-481.

- Wang Yi-Lun, Su Rui-Guang, Liu Ju, Han Yan-Lai, Lu Yan-Li, Bai You-Lu, Tan Jin-Fang, 2014.** Effects of nutrient expert recommend fertilization on yield and fertilizer efficiency of summer maize in fluvo-aquic soil. [Chinese]*Acta Agronomica Sinica*, **40**(3): 563-569.
- Xinpeng Xu, Ping He, Fuqiang Yang, Jinchuan Ma, Mirasol F. Pampolino, Adrian M. Johnston, Wei Zhou, 2017.** Methodology of fertilizer recommendation based on yield response and agronomic efficiency for rice in China. *Field Crops Research* 206, 33–42
- Xinpeng Xu, Ping He, Shaojun Qiu, Mirasol F. Pampolino, Shicheng Zhao, Adrian M. Johnston, Wei Zhou. 2014.** Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency. *Field Crops Research*, **15**(7): 27-34.
- Yannick, U. S., Alain, M. L., Luhanga, M. et Mukaz, C. M. 2014.** L’apport des faibles doses d’engrais minéraux permet-il d’accroître le rendement du maïs cultivé à forte densité ? Un exemple avec deux variétés de maïs à Lubumbashi. 10p
- Zro Bi G. F., Yao-Kouamé A. et Kouamé K. F, 2012.** Evaluation statistique et spatiale de la fertilité des sols hydromorphes (gley sols) de la région du Béliér (Côte d’Ivoire). *Tropicultura* 30, 4, 236-242