

## Modélisation des doses économiques optimales de l'azote en culture du maïs (*zea mays* L.) Sur les sols ferrallitiques au Togo

Kodjovi Sotomè DETCHINLI\*, Jean Mianikpo SOGBEDJI\*\*, Ruth ATCHOGLLO\* et Komi Agbémébia BONA\*

### Résumé

La combinaison de fertilisants minéraux et organiques est la meilleure approche de fertilisation du maïs. Cependant, en Afrique occidentale, la disponibilité limitée des fertilisants organiques favorise l'utilisation exclusive des engrais minéraux. Malheureusement, les recommandations de doses d'engrais minéraux sont obsolètes, indépendantes de la diversité des sols et des systèmes de production. Un tel contexte exige de déterminer et d'actualiser régulièrement les doses économiques optimales des engrais couramment disponibles dont les engrais azotés (N). La réponse du rendement en grain du maïs (variété *Ikenne*) à la dose d'urée ordinaire et d'urée super granule a été modélisée à partir de deux essais conduits à Lomé suivant un dispositif en blocs aléatoires complets, sur sol ferrallitique, sous climat tropical guinéen à quatre saisons. Six doses d'urée ordinaire et d'urée super granule (0, 30, 60, 90, 120 et 150 kg N ha<sup>-1</sup>) ont été étudiées sur deux saisons en 2016. Les modèles quadratiques obtenus ont servi à déterminer les doses économiques optimales. En grande saison, la dose économique optimale a été de 139 kg N ha<sup>-1</sup> et 120 kg N ha<sup>-1</sup> respectivement pour l'urée ordinaire et l'urée super granule. En petite saison, la dose économique optimale a été de 93 kg N ha<sup>-1</sup> et 118 kg N ha<sup>-1</sup> respectivement pour l'urée ordinaire et l'urée super granule. Les recommandations en vigueur pour la fertilisation azotée du maïs (76 kg N ha<sup>-1</sup>) devraient être actualisées pour aboutir à des recommandations techniquement et socio-économiquement justifiées et respectueuses de l'environnement.

**Mots clés** : Maïs, dose économique optimale, urée ordinaire, urée super granule, sol ferrallitique.

### Abstract

#### MODELLING NITROGEN ECONOMIC OPTIMUM RATES UNDER MAIZE CROP (*ZEA MAYS* L.) ON FERRALSOLS IN TOGO

In Western Africa, organic and inorganic fertilizers are rarely simultaneously available. This is a major constraint that limits the application of the Integrated Soil Fertility Management which is the best approach for maize fertilization. Maize production is often based on pan-territorial inorganic fertilizer recommendations disseminated during the Green Revolution period (1950 to 1980) despite cropping systems changes and diversity. In such a situation, there is a need of updated nitrogen (N) economic optimum rates recommendations. The IKENNE maize cultivar yield response to six N rates (0, 30, 60, 90, 120 and 150 kg N ha<sup>-1</sup>) was modeled from two field trials carried out during two growing seasons in 2016 on a ferralsol at Lomé in Togo located in the Guinea Savanna Agro Ecological Zone of West Africa. Each trial was carried out in a randomized complete block design with three replicates. The N economic optimum rates were determined by the quadratic regression yield model. Nitrogen economic optimum rate was 139 kg N ha<sup>-1</sup> and 93 kg N ha<sup>-1</sup> under ordinary urea while it was 120 kg N ha<sup>-1</sup> and 118 kg N ha<sup>-1</sup> under urea super granule in the first and the second growing season, respectively. The current N fertilizer rates recommendations (76 kg N ha<sup>-1</sup>) should be site-specifically updated according to the cropping systems diversity to achieve technically, socio-economically and environmentally justified recommendations.

**Keywords**: Maize, nitrogen economic optimum rate, ordinary urea, urea super granule, ferralsol.

\* Laboratoire Interface Sciences du Sol, Climat et Production Végétale (LISSCPV)

\*\* Contacts : (+228) 90 12 33 90 / mianikpo@yahoo.com

Département des Sciences du sol  
Ecole Supérieure d'Agronomie, Université de Lomé

### INTRODUCTION

En Afrique, en Asie et en Amérique latine, le maïs est l'une des principales céréales à la base de l'alimentation humaine. Au Togo, le maïs est la première céréale la plus cultivée. Il est la denrée alimentaire de base des populations à tel point que la question de la sécurité alimentaire semble se restreindre à sa disponibilité spatio-temporelle et à son accessibilité pour les ménages. Les superficies totales consacrées à la culture du maïs sont estimées depuis l'an 2000 à plus de 420 000

ha cultivés chaque année, soit environ 48 % des superficies totales consacrées aux cultures vivrières avec une production annuelle moyenne estimée à plus de 500 000 t (DSID, 2005 ; ITRA, 2007 ; DSID 2015). Malgré un rendement potentiel élevé, la culture du maïs est caractérisée par une faible productivité. Le rendement moyen du maïs estimé entre 1,1 à 3 t ha<sup>-1</sup> est en deçà du potentiel génétique de la culture estimé à 5 t ha<sup>-1</sup> (ITRA, 2007). Cette faible productivité de la culture serait due à plusieurs contraintes dont principalement des pratiques inappropriées de fertilisation des sols.

Plusieurs études (van Reuler and Prins, 1993 ; Adetunji, 1997 ; Sogbedji et al., 2006 ; Kombiok et al., 2012 ; Detchinli and Sogbedji, 2014, 2015a) ont conclu que la Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols (GIFS), qui implique une combinaison judicieuse des sources de nutriments organiques et inorganiques, est la stratégie appropriée pour la reconstitution des éléments nutritifs du sol et l'amélioration des rendements du maïs. Cependant, la gestion intégrée de la fertilité des sols est peu adoptée en milieu paysan du fait que les fertilisants minéraux et organiques ne sont pas simultanément disponibles. En Afrique occidentale côtière, la pratique courante de fertilisation en milieu paysan repose essentiellement sur l'utilisation d'engrais minéraux (NPK et urée perlée surtout) souvent à des doses inférieures aux recommandations établies et diffusées entre 1950 et 1980 au cours de la période de la révolution verte (Maraux et al., 2007 ; Dugue et al., 2012). Une telle pratique est une menace à l'utilisation durable des sols faiblement pourvus en matière organique et surexploités comme les terres de barre de la Côte ouest-africaine (Azontonde, 1993 ; Brabant et al., 1996 ; IFDC, 1997 ; Henao et Baanante, 1999 ; Oldeman, 1999 ; Henao and Baanante, 2006). Plusieurs chercheurs ont souligné la nécessité d'actualiser les doses d'engrais recommandées après avoir rappelé le caractère obsolète des recommandations d'engrais en Afrique subsaharienne. Ces recommandations obsolètes ne tiennent compte ni de la dégradation des sols, ni de la diversité des agroécosystèmes et des pratiques culturales (Ezui et al., 2011 ; Balogoun et al., 2013 ; Igue et al., 2013).

L'azote est indispensable à la production du maïs. Cependant, en raison de divers phénomènes de perte (lixiviation, volatilisation, adsorption sur les colloïdes du sol, immobilisation microbienne et minéralisation), la quantité d'azote du sol disponible pour la plante peut changer drastiquement sur une courte période, rendant difficile la formulation de recommandations spécifiques à chaque agroécosystème (Detchinli and Sogbedji, 2015b). D'après Richner et al. (2010), la détermination de la fumure azotée optimale est une tâche importante en raison du conflit d'intérêts entre l'augmentation du rendement par la fumure et la garantie de qualité du produit d'une part et d'autre part la minimisation des pertes d'azote dans l'environnement. La meilleure approche en vigueur pour déterminer la fumure azotée optimale est celle basée sur la recherche d'un optimum économique à partir de fonctions de production plutôt que du rendement maximal (Richner et al., 2010).

La présente étude s'inscrit dans un programme de recherche visant à déterminer des stratégies de gestion des nutriments techniquement, socialement et économiquement justifiées ayant un potentiel élevé d'amélioration durable de la production du maïs en Afrique occidentale côtière. Spécifiquement, l'étude visait à déterminer les doses économiques optimales de l'azote apporté sous forme d'urée ordinaire et d'urée super granule.

## MATERIEL ET METHODES

### Site expérimental

L'étude a été conduite à la Station d'Expérimentation Agronomique de l'Ecole Supérieure d'Agronomie à

l'Université de Lomé -Togo (6°22' N, 1°13'E ; altitude de 50 m). Le sol est de type ferrallitique communément appelé "terre de barre", formé à partir du dépôt continental. Ce type de sol couvre une partie des terres arables au Ghana, au Togo, au Bénin et au Nigeria (Raunet, 1973 ; Louette, 1988). Il est généralement utilisé pour la production du maïs dans la région côtière ouest-africaine. Il est bien drainé et possède un faible taux de matière organique ( $< 10 \text{ g kg}^{-1}$ ). Sa teneur en potassium (K) est inférieure à  $2 \text{ cmol kg}^{-1}$  ; il a un contenu en phosphore total (P total) variant de 250 à 300  $\text{mg kg}^{-1}$ , une capacité d'échange cationique de 3 à 4  $\text{még.kg}^{-1}$ , un pH de 5,2 à 6,8 (Raunet, 1973 ; Tossah, 2000). Le contenu sableux est approximativement de 800  $\text{g kg}^{-1}$  dans l'horizon 0 – 20 cm et décroît à moins de 600  $\text{g kg}^{-1}$  à partir de 50 à 120 cm de profondeur (Lamouroux, 1969). Le site expérimental a une pente de moins de 1 %. Le site est localisé dans la zone de la savane guinéenne sous climat tropical à régime pluviométrique bimodal. La précipitation annuelle varie typiquement de 800 à 1100 mm et permet deux saisons de culture de maïs, l'une d'avril à juillet et l'autre de septembre à décembre. La température moyenne annuelle est de 27 °C. Le site expérimental a été sous culture continue de maïs avec de modestes fertilisations minérales pendant trois années avant le début de la présente étude.

### Dispositif expérimental

Deux essais ont été installés chacun suivant un dispositif expérimental en blocs aléatoires complets à un facteur, trois répétitions et six traitements (0, 30, 60, 90, 120 et 150  $\text{kg N ha}^{-1}$ ). Dans le premier essai, l'azote a été apporté sous forme d'urée ordinaire tandis qu'il a été apporté sous forme d'urée super granule dans le deuxième essai. Les deux formes d'urée sont présentées à la Figure 1.



Figure 1 : Urée super granule (à gauche) et urée ordinaire (à droite) – Urea super granule (left) and ordinary urea (right).

### Gestion du sol et de la culture

Les deux essais ont porté sur la variété *Ikenne* qui est la variété de maïs la plus cultivée au Togo. Ils ont été conduits suivant des itinéraires techniques similaires reproduits pendant les deux saisons culturales. Le sol a été préparé manuellement à travers les opérations successives suivantes : défrichage, labour, délimitation des blocs puis des parcelles élémentaires.

Au total, et pour chacun des deux essais, 18 parcelles élémentaires de 9 m<sup>2</sup> (3,75 m x 2,4 m) chacune ont été installées. Le semis a été effectué manuellement à 3 grains par poquet à une profondeur d'environ 3 cm suivant un schéma cultural de 80 cm x 25 cm, vers fin avril en grande saison et vers fin août en petite saison culturale. Un démariage à un plant par poquet a été effectué au 15<sup>ème</sup> jour après le semis pour obtenir une densité de peuplement de 50 000 plants ha<sup>-1</sup>. Pour les deux essais, quatre opérations de désherbage manuel (un sarclage, un binage, un sarclo-binage puis un buttage) ont été effectuées aux 12<sup>ème</sup>, 32<sup>ème</sup>, 43<sup>ème</sup> et 52<sup>ème</sup> jours après le semis. Le triple super phosphate (TSP) et le chlorure de potassium (KCl) ont été appliqués juste après le premier sarclage, tandis que l'urée ordinaire et l'urée super granule ont été apportées un mois après le semis. Toutes les parcelles de maïs ont été fertilisées avec 60 kg ha<sup>-1</sup> de potassium (K) et 60 kg ha<sup>-1</sup> de phosphore (P). Tous les types d'engrais ont été appliqués en poquet au pied de la plante à une profondeur d'environ 8 cm. La récolte a eu lieu en juillet durant la grande saison et en décembre durant la petite saison.

### Collecte et analyse des données

Le rendement en grain du maïs sous chaque traitement a été déterminé à partir des lignes centrales de chaque parcelle élémentaire de maïs dont les grains ont été récoltés et ajustés par séchage au soleil à un taux d'humidité approximatif de 14 %. Le rendement potentiel a été calculé par extrapolation à partir du poids des grains issus des plants récoltés et sur la base de la densité de peuplement de 50 000 plants ha<sup>-1</sup>.

Les données obtenues ont été traitées à l'aide du tableur Excel pour déterminer les modèles (ou fonctions) de la réponse du rendement en grain de maïs aux différents traitements de fertilisation appliqués. L'analyse statistique a été réalisée à l'aide de la procédure MIXED du logiciel Statistical Analysis System (SAS, 2014). Les données de rendement en grain du maïs ont été analysées en utilisant le modèle linéaire général mixte avec rep et rep\*dose d'azote comme effet résiduel dû au hasard et les doses d'azote comme effets étudiés. Les effets significatifs ont été suivis de comparaisons multiples ajustées avec une correction de Bonferoni. Les doses économiques optimales de l'azote ( $N_{opt}$ ) ont été déterminées à l'aide des fonctions de production obtenues.  $N_{opt}$  est défini comme la dose d'azote pour laquelle la valeur marchande du rendement marginal correspond au coût marginal de la fumure azotée. Pour les modèles quadratiques,  $N_{opt}$  est calculé en égalant les premières dérivées des fonctions obtenues aux ratios entre les coûts unitaires des fertilisants et les prix unitaires du produit (NAS, 1961 ; Nelson et al., 1985 ; Sogbedji, 1999 ; Kyveryga et al., 2007 ; Richner et al., 2010). Le maïs a été supposé vendu au prix courant sur les marchés de Lomé, soit 220 F CFA kg<sup>-1</sup>. Les coûts des fertilisants ont été alignés sur les prix courants des engrais achetés pour l'expérimentation. Le prix d'achat de l'azote a été ainsi fixé à 652,17 F CFA kg<sup>-1</sup> pour l'urée ordinaire (soit 15 000 F CFA le sac de 50 kg d'urée ordinaire à 46 % N) et à 695,65 F CFA kg<sup>-1</sup> pour l'urée super granule (soit 16 000 F CFA le sac de 50 kg d'USG à 46 % N).

## RESULTATS ET DISCUSSION

### Rendement en grain du maïs

Les rendements en grain du maïs enregistrés dans les deux essais sont présentés au Tableau I. Le rendement en grain de maïs a été plus faible sous T1, intermédiaire sous T2 et plus élevé sous T3 à T6. Le rendement a augmenté numériquement avec la dose d'azote jusqu'à T4 avant de baisser à T5 puis d'augmenter à T6. Cette variation du rendement indique que les doses économiques optimales de l'azote sont comprises entre T4 et T6.

**Tableau I. Rendement moyen en grain de maïs suivant les doses d'azote et la saison de culture – Mean maize grain yield under different rates of nitrogen in each growing season (10<sup>3</sup> kg ha<sup>-1</sup>).**

Traitement	Essai urée ordinaire		Essai urée super granule	
	Grande saison	Petite saison	Grande saison	Petite saison
T1 = N0	1,67a	1,20a	1,67a	1,20a
T2 = N30	3,00b	2,39b	3,54b	2,78b
T3 = N60	4,50c	3,17c	5,31c	3,68c
T4 = N90	5,06d	3,46d	5,97d	4,02d
T5 = N120	5,00d	3,38d	5,78d	3,92d
T6 = N150	5,18d	3,53d	6,12e	4,09d
Moyenne	4,07	2,86	4,73	3,28
PPDS	0,6559	0,3397	0,7879	0,3641
CV %	8,9	6,5	10,3	6,9
Effet azote	**	**	**	**

Les nombres de la même colonne suivis par la même lettre ne sont pas significativement différents ( $p = 0,05$ ) PPDS = Plus Petite Différence Significative - \*\* = Significatif au seuil  $\alpha = 1\%$ .

### Modèles de la réponse du rendement en grain du maïs à la dose d'azote

Dans les deux essais, comme antérieurement rapporté par Sogbedji (1999), la réponse du rendement en grain du maïs à la dose d'azote a donné des modèles quadratiques, c'est-à-dire des fonctions de type  $Y(X) = aX^2 + bX + c$ , avec Y = rendement en maïs grain exprimé en 10<sup>3</sup> kg ha<sup>-1</sup>, X = dose d'azote exprimée en kg ha<sup>-1</sup>, a = un coefficient quadratique, b = un coefficient linéaire et c = une constante (Figures 2 à 5).

Les coefficients de détermination ( $R^2$ ) obtenus sont très élevés (0,975 à 0,987), indiquant ainsi d'une part que le rendement en grain du maïs est fortement corrélé à la dose d'azote minéral appliqué et d'autre part que tous les modèles obtenus sont valides. Bien que valides, les modèles obtenus portent les insuffisances ou limites soulignées par Godard (2005) à savoir notamment la difficulté d'interprétation agronomique des paramètres (coefficients quadratiques, coefficients linéaires et constantes). Par exemple, les constantes c des différents modèles ne correspondent pas exactement aux rendements enregistrés sous le traitement T1 (correspondant à  $x = 0$ ).

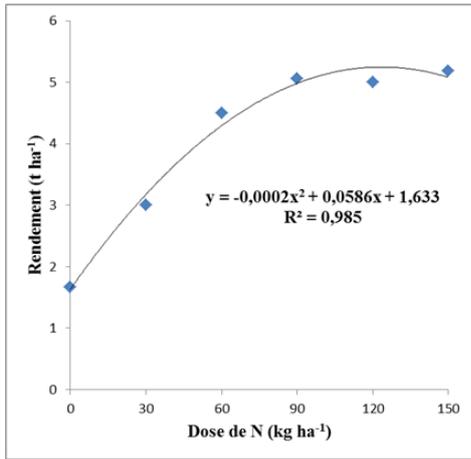


Figure 2 : Modèle quadratique du rendement en grain du maïs en fonction de la dose d'azote minéral appliqué en grande saison sous forme d'urée ordinaire - Quadratic model obtained from maize grain yield response to nitrogen rate applied in the first growing season as ordinary urea.

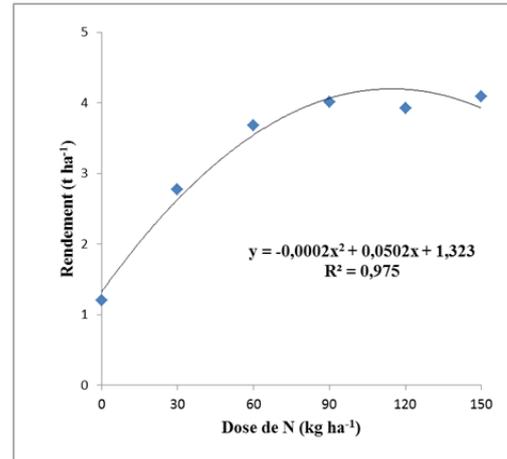


Figure 5 : Modèle quadratique du rendement en grain du maïs en fonction de la dose d'azote minéral appliqué en petite saison sous forme d'urée super granule - Quadratic model obtained from maize grain yield response to nitrogen rate applied in the second growing season as urea super granule.

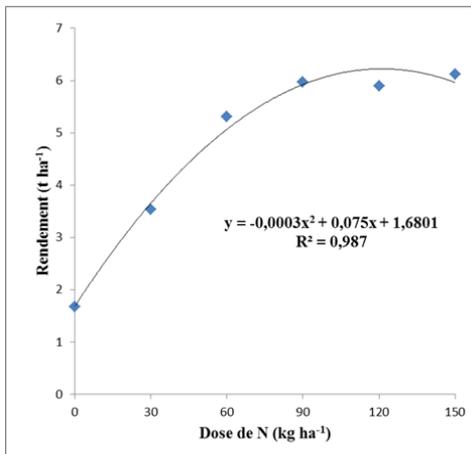


Figure 3 : Modèle quadratique du rendement en grain du maïs en fonction de la dose d'azote minéral appliqué en grande saison sous forme d'urée super granule - Quadratic model obtained from maize grain yield response to nitrogen rate applied in the first growing season as urea super granule.

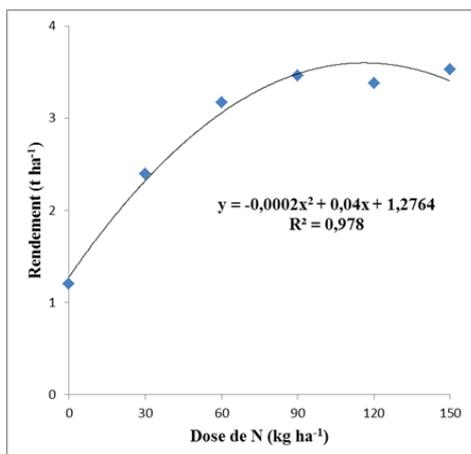


Figure 4 : Modèle quadratique du rendement en grain du maïs en fonction de la dose d'azote minéral appliqué en petite saison sous forme d'urée ordinaire - Quadratic model obtained from maize grain yield response to nitrogen rate applied in the second growing season as ordinary urea.

### Doses économiques optimales de l'azote

Les doses économiques optimales de l'azote obtenues pour l'urée ordinaire et pour l'urée super granule ont présenté différentes variations d'amplitude suivant la saison de culture (Tableau II).

Tableau II. Doses économiques optimales de l'azote sous urée ordinaire et sous USG et déficits correspondants par rapport aux recommandations en vigueur – Nitrogen economic optimum rates under ordinary urea and urea super granule and associated gaps from current recommended rates.

	Grande saison		Petite saison	
	UO	USG	UO	USG
X optimal, kg ha <sup>-1</sup>	139,09	119,73	92,59	117,59
Q optimal, kg ha <sup>-1</sup>	302,37	260,28	201,28	255,64
Y optimal, 10 <sup>3</sup> kg ha <sup>-1</sup>	5,91	6,36	3,26	4,46
X recommandé kg ha <sup>-1</sup>	76,00	76,00	76,00	76,00
Q recommandé kg ha <sup>-1</sup>	165,22	165,22	165,22	165,22
Déficit en N kg ha <sup>-1</sup>	63,09	43,73	16,59	41,59
Déficit en urée kg ha <sup>-1</sup>	137,15	95,06	36,06	90,42

Pour l'urée ordinaire, la dose optimale économique de l'azote à la petite saison a baissé de 33,1 % comparativement à la grande saison. Par contre, pour l'urée super granule, la dose optimale économique de l'azote à la petite saison a baissé de 1,7 % comparativement à la grande saison.

Comparativement aux doses économiques optimales obtenues, pour l'urée ordinaire, les recommandations en vigueur pour la fertilisation azotée du maïs (ITRA, 2007) présentent des déficits de 82,9 % en grande saison et de 22,4 % en petite saison contre des déficits de 57,9 % en grande saison et de 55,3 % en petite saison pour l'urée super granule. Les doses économiques optimales de l'azote obtenues rappellent l'étude de Sogbedji (1999) qui a trouvé dans le même agroécosystème et pour la

même variété, des doses économiques optimales de l'ordre de 125 à 134 kg N ha<sup>-1</sup> en grande saison et de 114 kg N ha<sup>-1</sup> en petite saison puis déconseillé les doses inférieures à 90 kg N ha<sup>-1</sup>. Dans des études ayant porté sur d'autres variétés de maïs et les simulations du modèle DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), Igue et al. (2013) et Balogoun et al. (2013) ont rapporté des doses optimales d'azote variant suivant les zones de 80 à 120 kg N ha<sup>-1</sup> au Sud et au Centre Bénin dont les couvertures pédologiques sont dominées respectivement par les sols ferrallitiques et les sols ferrugineux.

En grande saison, la dose économique optimale de l'urée super granule a été inférieure d'environ deux sacs (de 50 kg) à celle de l'urée ordinaire pour un rendement supérieur d'une demi-tonne environ à celui obtenu sous urée ordinaire. En petite saison, la dose économique optimale de l'urée super granule a été supérieure d'un sac (de 50 kg) à celle de l'urée ordinaire pour un rendement supérieur de plus d'une tonne à celui obtenu sous urée ordinaire. Ces données indiquent la supériorité en céréaliculture de la performance de l'urée super granule comparativement à l'urée ordinaire, supériorité rapportée par plusieurs autres études (FAO, 1985 ; Yaosse, 2009 ; Detchinli and Sogbedji, 2015b ; Laba and Sogbedji, 2015). La technologie du placement profond de l'urée (utilisation de l'urée super granule, USG) est une technologie prometteuse pour l'amélioration de la production du maïs sur les sols ferrallitiques de la Côte ouest-africaine.

En première analyse, l'applicabilité en milieu paysan des doses économiques optimales de l'azote obtenues dans la présente étude sous urée ordinaire comme sous urée super granule peut faire objet de débat. Il est évident qu'en raison du coût élevé des engrais minéraux, les paysans, qui majoritairement ne respectent pas la recommandation en vigueur, ne pourront pas appliquer des doses plus élevées. Les résultats d'études antérieures du même programme de recherche ont clairement mis en exergue les limites de l'utilisation exclusive de fortes doses de fumure minérale par rapport à la production durable du maïs dans la sous-région. L'application éventuelle de fortes doses de fumure minérale n'est envisageable que sur le court terme (une ou deux saisons) sur sol suffisamment pourvu en matière organique (par exemple sol mis en jachère pendant plusieurs années) ou en cas de contrainte incontournable d'accès à la fumure organique (Detchinli and Sogbedji, 2014, 2015a). Au final, la meilleure interprétation des résultats de la présente étude consiste à les considérer comme une alerte à la nécessité d'actualiser régulièrement les recommandations de fumure minérale ainsi qu'à la nécessité d'entretenir le bilan humique des sols par l'application de la fumure organique pour améliorer l'efficacité des engrais minéraux dont les doses s'en trouveront réduites. L'apport de la présente étude réside dans le fait qu'elle illustre à suffisance qu'il urge d'inverser la tendance actuelle de la surexploitation des sols sans entretien humique. Cela évitera une spirale insupportable d'augmentation continue des doses de fumure minérale pouvant conduire à la dégradation totale des terres cultivées. Plusieurs études ont en effet démontré que l'apport régulier d'engrais organique accroît le potentiel de minéralisation du sol, ce qui permet de diminuer les applications d'engrais azotés (Giroux et al., 2008).

## CONCLUSION

La détermination et l'actualisation régulières des doses économiques optimales de fumure azotée sont nécessaires pour une production durable du maïs sur les sols ferrallitiques de la Côte ouest-africaine, sols faiblement pourvus en matière organique et surexploités. La présente étude a révélé des doses économiques optimales supérieures aux recommandations en vigueur pour la fertilisation azotée du maïs (76 kg N ha<sup>-1</sup>). En grande saison, la dose économique optimale a été respectivement de 302 et 261 kg ha<sup>-1</sup> pour l'urée ordinaire (soit 139 kg N ha<sup>-1</sup>) et l'urée super granule (soit 120 kg N ha<sup>-1</sup>). En petite saison, la dose économique optimale a été respectivement de 201 et 257 kg ha<sup>-1</sup> pour l'urée ordinaire (soit 93 kg N ha<sup>-1</sup>) et l'urée super granule (soit 118 kg N ha<sup>-1</sup>). La révision des recommandations en vigueur pour la fertilisation azotée du maïs s'avère nécessaire. Cette révision devra se faire suivant l'approche des doses économiques optimales et non l'approche du rendement maximal. Pour être techniquement, socio-économiquement justifiées et respectueuses de l'environnement, les recommandations actualisées devront être formulées à la carte pour tenir compte de la diversité et de la dynamique des systèmes de production.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adetunji M. T. 1997. Organic residue management, soil nutrient changes and maize yield in a humid ultisol. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 47:189-195.
- Azontonde A. 1993. Dégradation et restauration des terres de barre (sols ferrallitiques faiblement désaturés argilo-sableux) au Bénin. *Cah. Orstom, sér. Pédol., vol. XXVIII, n°2, 1993 : 217 – 226*. Centre National d'Agropédologie (CENAP), Cotonou, Bénin.
- Balogoun I., Saïdou A., Ahoton L. E., Adjahoun A., Amadji G. L., Ezui G., Youl S., Mando A., Igue A. M., Sinsin B. A. 2013. Détermination des formules d'engrais minéraux et des périodes de semis pour une meilleure production du maïs (*Zea mays* L.) au Sud et au Centre Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin (BRAB). Numéro spécial Fertilisation du maïs – Janvier 2013. BRAB en ligne (on line) sur le site web <http://www.slire.net>. ISSN sur papier (on hard copy) : 1025-2355 et ISSN en ligne (on line) : 1840-7099*.
- Brabant P., Darracq S., Egue K., Simoneux V. 1996. Togo : état de dégradation des terres résultant des activités humaines. Notice explicative de la carte des Indices de dégradation. Paris: ORSTOM.
- Detchinli K. S., Sogbedji J. M. 2014. Assessment of the profitability and the effects of three maize-based cropping systems on soil health in Western Africa. *American Journal of Agriculture and Forestry. Vol. 2, No. 6, 2014, pp. 321-329*.
- Detchinli K. S., Sogbedji J. M. 2015a. Yield performance and economic return of maize as affected by nutrient management strategies on ferralsols in coastal western Africa. *European Scientific Journal, 11, 1857 – 7881*.

- Detchinli K. S., Sogbedji J. M. 2015b. Maize Nitrogen Use Efficiency and Yield As Affected by Fertilizer Nitrogen Form and Rate of Application in the Guinea Savanna Agro Ecological Zone of West Africa. *International Journal of Current Research and Academic Review. Volume 3 Number 10 (October-2015) pp. 222-233.*
- DSID (DIRECTION DES STATISTIQUES AGRICOLES DE L'INFORMATIQUE ET DE LA DOCUMENTATION). 2005. Production des principales cultures vivrières. Séries 1996 à 2005. DSID, Lomé, Togo.
- DSID (DIRECTION DES STATISTIQUES AGRICOLES DE L'INFORMATIQUE ET DE LA DOCUMENTATION). 2015. Prix des produits vivriers sur les marchés ruraux de 2011-2015. DSID, Lomé, Togo.
- Dugue P., Vayssieres J., Chia E., Ouedraogo S., Harvard M., Coulibaly D., Nacro H. B., Fagaye S., Sangare M., Valle E. 2012. L'intensification écologique : réflexions pour la mise en place de ce concept dans les zones de savanes d'Afrique de l'Ouest. *VALL E., ANDRIEUX N., CHIA E., NACRO H. B. (Ed.), 2012. Partenariat, modélisation, expérimentation : quelles leçons pour la conception de l'innovation et l'intensification écologique. Actes du séminaire ASAP, novembre 2011, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, Cédérom.*
- Ezui G., Igue A. M., Attiogbe P., Mando A., Sogbedji J. M., Pare T., Youl S., Wilkens P., Singh U., Gist O. 2011. Mise à jour des recommandations d'engrais pour la production du maïs en Afrique de l'Ouest : Cas du Bénin. Poster, IFDC, Lomé, Togo.
- FAO (ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE). 1985. Effets comparés de l'application de la perlurée et de supergranules d'urée sur riz inondé à Madagascar. Juin 1985. D'Onofrio G., Dupuy J., Gaudin R. et Ravohitrarivo P. PEM – FAO – Direction de la Vulgarisation MPARA, LRI Radioagronomie et FOFIFA. Antananarivo. Madagascar. 27p.
- Giroux M., N'dayegamiye A., Lemieux M. 2008. Effets de l'historique des épandages d'engrais minéraux et organiques et des rotations de culture sur les rendements, les besoins en engrais N du maïs-grain et la fertilité azotée des sols. *Cahiers de l'Observatoire de la qualité des sols du Québec. Cahier n° 7, 42p. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, Québec, Canada.*
- Godard C. 2005. Modélisation de la réponse 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. Institut National Agronomique Paris-Grignon, Ecole Doctorale ABIES, UMR Economie Publique, INRA - INA P-G.
- Henao J., Baanante C. 1999. L'épuisement des éléments nutritifs dans les terres agricoles de l'Afrique. Vision 2020 pour l'alimentation, l'agriculture et l'environnement. Washington DC 2006-4002, USA: IFPRI.
- Henao J., Baanante C. 2006. Agricultural production and soil nutrient mining in Africa: Implication for resource conservation and policy development. Alabama 35662, USA: IFDC, Muscle Shoals.
- IFDC (INTERNATIONAL FERTILIZER DEVELOPMENT CENTER). 1997. Annual report. Alabama, USA: IFDC, Muscle Shoals.
- Igue A. M., Adjanohoun A., Saïdou A., Ezui G., Attiogbe P., Kpagbin G., Gotoechant-Hodonou H., Youl S., Pare T., Balogoun I., Ouedraogo J., Dossa E., Mando A., Sogbedji. M. 2013. Application et adaptation de l'approche intégrée DSSAT-SIG à la formulation des doses d'engrais minéraux pour la culture du maïs au Sud et au Centre du Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin (BRAB). Numéro spécial Fertilisation du maïs – Janvier 2013. BRAB en ligne (on line) sur le site web <http://www.slire.net>. ISSN sur papier (on hard copy) : 1025-2355 et ISSN en ligne (on line) : 1840-7099.*
- ITRA (INSTITUT TOGOLAIS DE RECHERCHE AGRONOMIQUE). 2007. Situation de référence sur les principales céréales cultivées au Togo : maïs, riz, sorgho, mil. Lomé : Institut Togolais de Recherche Agronomique, pp. 9-38.
- Kombiok J. M., Buah J. S. S., Sogbedji J. M. 2012. Enhancing Soil Fertility for Cereal Crop Production Through Biological Practices and the Integration of Organic and In-Organic Fertilizers in Northern Savanna Zone of Ghana. In: Soil Fertility. R. Issaka (Ed.). *INTECH free online publication, Croatia, pp 3-31.*
- Kyveryga P. M., Blackmer A. M., Morris T. F. 2007. Desaggregating Model Bias and Variability when Calculating Economic Optimum Rates of Nitrogen Fertilization for Corn. *Agronomy Journal, Jul/Aug 2007, Vol. 99, 4, Research Library, pg 1048-1056.*
- Laba B. S., Sogbedji J. M. 2015. Identification of land degradation and climate change resilient soil and crop management strategies for maize production on West African ferralsols. *International Invention Journal of Agriculture and Soil Science. 3(2) 13-20.*
- Lamouroux M. 1969. Carte pédologique du Togo au 1/1000000. Paris, Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-mer, Centre ORSTOM de Lomé, Togo.
- Louette D. 1988. Synthèse des travaux sur la fertilité des terres de barre au Bénin et au Togo. CIRAD-DSA, 34p. Montpellier, France.
- Maraux F., Dugue P., Ganry F. 2007. Amélioration de la fertilité du sol et réhabilitation des terres dégradées : dynamiques socio-techniques en zones sèches d'Afrique de l'ouest et du centre. *Agricultural innovation in dryland Africa: What are the key drivers for success? AIDA Conference Accra, Ghana, 22-24 January 2007.*
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES - NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 1961. Statistical methods of research in economic aspects of fertilizer response and use.

Committee on economic of fertilizer use of the agricultural board, NAS-NRC pub.918, NAS-NRS, Washington, DC.

Nelson L. A., Voss R. D., Pesek J. T. 1985. Agronomic and statistical evaluation of fertilizer response. P. 53-90. In O.P. Angelstad (Ed.) Fertilizer technology and use, 3<sup>rd</sup> ed. ASA, Madison.

Oldeman L. R. 1999. Soil degradation: a threat to food security? Report 98/01, Wageningen, The Netherlands: International Soil Reference and Information Center.

Raunet M. 1973. Contribution à l'étude pédologique des terres de barre du Dahomey et du Togo. *Agron. Trop.*, Vol.28, No.11, pp.1049-1069.

Richner W., Flisch R., Sinaj S., Charles R. 2010. Détermination des normes pour la fumure azotée des grandes cultures. *Recherche Agronomique Suisse 1 (11-12): 410-415.*

Sogbedji J. M. 1999. Maize nitrogen utilization and nitrate leaching modeling in Togo and New York. Ph.D. Thesis,

Cornell University, New York, USA.

Sogbedji. M., van Es H. M., Agbeko K. L. 2006. Cover cropping and nutrient management strategies for maize production in West Africa. *Agron. J.*, Vol.98, pp. 883- 889.

Tossah B. K. 2000. Influence of soil properties and organic inputs on phosphorus cycling in herbaceous legume-based cropping systems in the West African derived savanna. Ph.D. Thesis No. 428, K.U. Leuven, Belgium.

Van Reuler H., Prins W. H. 1993. The role of plant nutrients and sustainable food production in sub-Saharan Africa. Van Reuler H. and W. H. Prins (Ed.) Plonsen&Looijen, Wageningen, Netherlands.

Yaosse G. 2009. Test de l'efficacité de la technologie du placement en profondeur de l'urée briquette (UDP) sur le périmètre rizicole irrigué de la vallée de Zio. Mémoire d'Ingénieur Agronome, Ecole Supérieure d'Agronomie, Université de Lomé. Lomé, Togo.