



REPOBLIKAN'I MADAGASIKARA
Tanindrazana - Fahafahana – Fandrosoana

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'ÉLEVAGE ET DE LA PÊCHE

PROJET DE MISE EN VALEUR ET DE PROTECTION
DES BASSINS VERSANTS AU LAC ALAOTRA
(BV ALAOTRA)



Document de travail BV lac n° 79
**Evaluation de la viabilité de l'intensification par l'utilisation
d'engrais minéraux dans les exploitations agricoles du lac
Alaotra, Madagascar n 1. Méthodologie et résultats pour les
zones Nord Est et Vallées du Sud Est**

MYRIAM CLEYETT RENAUD, ERIC PENOT ET RAPHAEL DOMAS
NOVEMBRE 2011

UMR **Innovation**
Montpellier
SupAgro - Inra - Cirad

TAFI

INP ENSAT

 **cirad**
LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
POUR LE DÉVELOPPEMENT

Evaluation de la viabilité de l'intensification par l'utilisation d'engrais minéraux dans les exploitations agricoles du lac Alaotra, Madagascar n 1. Méthodologie et résultats pour les zones Nord Est et Vallées du Sud Est

Introduction

La région du lac Alaotra, grande cuvette cernée de collines, est l'une des principales zones rizicoles de Madagascar avec plus de 100 000 hectares de rizières. Le potentiel rizicole de l'Alaotra fut mis en valeur grâce aux périmètres hydro-agricoles aménagés par la SOMALAC (Société Malgache d'Aménagement du Lac Alaotra) dans les années 60 et 70. Depuis 40 ans, l'attractivité de la Région entraîne une forte immigration à laquelle s'ajoute un taux de natalité élevé. La population a triplé depuis 1960 et cette forte croissance démographique conduit aujourd'hui à une saturation foncière et à une pression grandissante sur les ressources naturelles. L'expansion des surfaces cultivées, l'abandon de la jachère et la défriche de zones encore boisées accentuent les phénomènes naturels d'érosion, accélérant ainsi la dégradation du milieu : perte de fertilité des sols, ensablement des canaux d'irrigation en aval, chute de la production halieutique et même comblement amorcé du lac. Aujourd'hui, sur les 30 000 hectares de rizières aménagés par la SOMALAC, seulement 10 000 hectares bénéficient effectivement d'une bonne maîtrise de l'eau. (DURAND et NAVE, 2006).

Du fait de la pression démographique et des besoins d'élévation du niveau de vie des ruraux, l'intensification reste un enjeu central pour le devenir de l'agriculture malgache (GARIN, 1998). L'accroissement peut se faire marginalement par une expansion des surfaces cultivées, mais l'intensification agricole par l'augmentation de la fertilité des sols reste un élément indispensable pour atteindre cet objectif. Pour cela, l'utilisation d'engrais minéraux constitue une des solutions. Les systèmes SCV permettent de créer un cadre plus sécurisé pour l'utilisation d'intrants. Néanmoins, les agriculteurs malgaches sont exposés à une multitude de risques, d'où leur réticence à utiliser des engrais chimiques.

Le risque agricole se porte sur trois points :

- Les risques de facteurs de production comprenant principalement l'accès à l'eau, l'insécurité foncière, le manque de trésorerie et la difficulté d'obtenir du crédit.

- Les risques de production qui comprennent les aléas climatiques (inondation, sécheresse) et le risque délictueux (vol d'animaux, de récolte, les incendies de brousse et de forêt).
- Les risques de commercialisation qui renvoient notamment à toute la problématique de fluctuation de prix, d'accès au marché (taxes, transports, proximité de marchés...).

L'environnement de la production donne peu de solutions pour gérer ces risques de façon optimale. (MAEP)

Jusqu'en 2008, la diffusion des techniques de fertilisation minérale avait poussé les agriculteurs de la région du lac Alaotra à utiliser des engrais minéraux pour intensifier leurs cultures. Les techniciens conseillaient une fertilisation du type 150kg de NPK (de composition 11 ; 22 ; 16) et 80 kg d'urée ; les prix des engrais étant relativement bas (1500 Ar/kg de NPK). En 2009, le prix des intrants a fortement augmenté jusqu'à doubler en 2010 (2600 Ar/kg de NPK). Cette augmentation a entraîné une baisse du retour sur investissement¹, rapport dissuasif dans un contexte de risques élevés pour les producteurs et ne justifiant plus l'emploi des engrais d'une manière rentable. Aujourd'hui en 2011, les prix sont redescendus de façon significative (1600 Ar/kg de NPK), mais les agriculteurs restent très réticents à la fertilisation minérale.

Certes, d'un point de vue purement technique sur le rendement, l'apport d'engrais peut améliorer significativement la productivité ; mais l'analyse des comptes d'exploitation peut montrer que le gain de production généré par l'utilisation des intrants peut être faible voire avoir un impact négatif et donc apparaître comme risqué. (CAPFIDA, 2011)

Dans le contexte actuel de fluctuation du prix des intrants, quelles sont les préconisations à diffuser concernant la fertilisation minérale?

Le climat aux saisons contrastées constitue pour les agriculteurs du lac, un facteur de risque important de part :

- Son irrégularité interannuelle : une forte variabilité du niveau de précipitation est à l'origine de campagne très sèche ou très arrosée. En cours de cycle, une inondation ou une sécheresse prolongée font chuter les rendements et peuvent même conduire à la perte de toute la parcelle.
- Son irrégularité intra-annuelle: Un décalage du début de la saison des pluies entraîne un retard de la mise en place des cultures.
- Son caractère fortement érosif : En début et en fin de saison des pluies les précipitations sont du type : orages violents et courts. Elles sont particulièrement érosives, d'autant plus qu'elles ont lieu au moment de l'implantation des cultures (début de saison des pluies) où le sol est généralement laissé à nu. (BASCOU, 2010)

L'objectif de cette étude est de déterminer un seuil d'utilisation des engrais minéraux prenant en compte le gain (ou la perte) généré par l'utilisation des intrants ainsi que le risque encouru par son adoption. Les résultats développés dans ce rapport ont donc pour but d'apporter des conseils économiques concernant l'utilisation des engrais minéraux. Notre étude portera principalement sur les tanety de la zone Nord-est (ZNE) et les baibohos de la zone du versant Sud-est (VSE). La zone VSE est caractérisée par une prédominance des baibohos par rapport aux tanety, et inversement pour la zone ZNE.

¹ Rapport de la marge brute sur les charges opérationnelles

1 Méthodologie

Notre zone d'étude (Figure 1) se trouve dans la partie Nord-Est de l'île (région Alaotra-Mangoro, province de Tamatave), à 250 km d'Antananarivo.

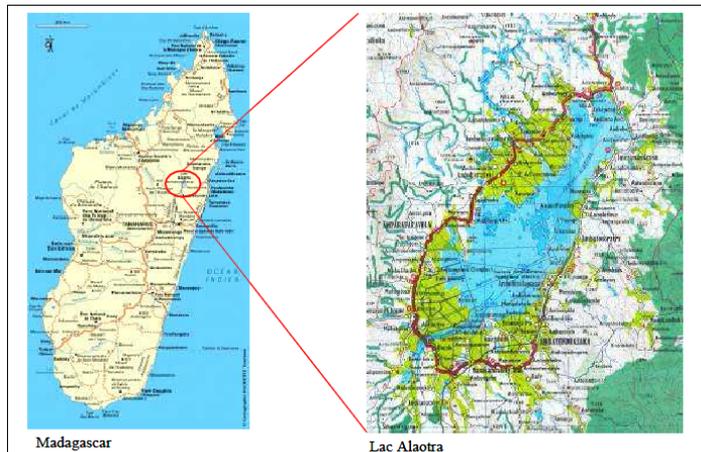


Figure 1 : Localisation du lac Alaotra, d'après Oustry, 2007

L'étude menée a pour but de déterminer les prix seuils d'utilisation des engrais minéraux pour les différentes cultures du lac Alaotra. Trois types de données sont disponibles. Elles sont présentées dans le paragraphe suivant. Plusieurs méthodes d'études seront mises en place pour étudier de façon la plus adaptée les différentes données disponibles. Un travail préliminaire visant à synthétiser les résultats économiques des cultures de maïs et de riz du lac Alaotra a été réalisé à partir des *données standards du RFR*. Ce travail est l'objet d'un document de travail spécifique..

Les données disponibles

Les données expérimentales de Tafa

Tafa, *Tany sy Fampanandrosoana* (Terre et Développement), est une ONG avec pour objectif de développer des systèmes de cultures adaptables individuellement à la situation de chaque paysan et au niveau de terroirs villageois. Elle conduit ainsi des essais techniques dans les grandes zones agro-écologiques de Madagascar, et notamment au Lac Alaotra sur différents types de sols. En 2009, Tafa a conduit des cultures expérimentales en semi direct sur différents types de sols (baibohos, tanety et rizières), pour deux types de cultures (maïs et riz) et pour plusieurs précédents culturaux. Dans chacun des cas, des essais expérimentaux suivant un même itinéraire technique ont été réalisés avec et sans engrais minéraux. Les observations obtenues permettent de déterminer l'effet sur le rendement de l'intensification des cultures par la fertilisation minérale. Les données utilisées sont extraites

du document de Tafa intitulé *Fiches technico-économiques des parcelles sur sites de références*.

Les données réelles récoltées auprès des paysans du réseau de fermes de références (RFR)

En 2007, un réseau de fermes de référence a été mis en place au lac Alaotra. (CAUVY & PENOT, 2009). Ce réseau de fermes de références est un ensemble d'exploitations agricoles réelles représentatives des différentes situations agricoles rencontrées dans la zone d'intervention du projet. Cette représentativité est basée sur la typologie des exploitations agricoles réalisées par Stéphanie Nave et Claire Durand en 2007. Les exploitations sont suivies annuellement par les opérateurs du projet et modélisées sous le logiciel Olympe (logiciel de modélisation et d'analyse économique d'exploitations agricoles). Une ferme de référence est donc une exploitation réelle représentative d'un type d'exploitation donné dans une zone donnée et modélisée sous le logiciel Olympe sur la base d'une enquête détaillée. Initialement, le RFR était constitué de 48 fermes. Actuellement, il n'en comporte plus que 15. Nos études seront effectuées sur les données de 2008 car d'une part c'est l'année où les enquêtes ont été réalisées avec le plus de précision et de rigueur, d'autre part, il serait trop long d'analyser les données de toutes les années enquêtées dans le temps imparti et enfin, 2008 correspond à l'année où le plus grand nombre de paysans utilisait des engrais minéraux du fait de leurs prix suffisamment faibles. De plus nous nous intéresserons uniquement aux cultures de maïs et de riz, des baibohos pour la zone VSE et des tanety pour la zone ZNE. En effet, d'une part, ce sont les cultures et les zones pour lesquelles nous disposons du plus grand nombre de données ; d'autre part, la zone VSE est caractérisée par une prédominance des baibohos par rapport aux tanety, et inversement pour la zone ZNE ; enfin, cela nous permettra de faire des comparaisons avec les résultats obtenus auprès des données de Tafa. Les données utilisées seront extraites du logiciel Olympe.

Les données standards calculées à partir des données réelles.

Les données standards correspondent à des moyennes de données réelles récoltées sur le terrain ayant un itinéraire technique et un rendement similaire. Les données standards utilisées ont été fournies par Raphaël Domas (assistant technique du projet).

Détermination du prix seuil d'utilisation des engrais minéraux pour les données expérimentales de Tafa.

Les observations obtenues sur les parcelles expérimentales de Tafa permettent de mesurer l'effet de la fertilisation minérale sur le rendement de la culture. L'étude a pour but de déterminer le prix seuil d'utilisation des engrais minéraux. Pour cela, deux analyses complémentaires seront réalisées : i) Une modélisation du gain dégagé par la fertilisation minérale, en fonction du prix des engrais minéraux ; ii) Une modélisation du retour sur investissement en fonction du prix des engrais minéraux. Un jeu de données correspond à deux cultures expérimentales réalisées suivant un même itinéraire technique, l'une sans fertilisation minérale et la seconde avec fertilisation minérale. Les jeux de données sont répartis comme suit :

	Tanety	Baibohos	Rizière irriguée
Culture de riz en semis direct	4	1	1
Culture de riz sur labour	1	1	1
Culture de maïs en semis direct	5	2	0

Tableau 1 : Nombre de jeux de données par culture et par sol

Les engrais utilisés par TAFE sont soit l'association *urée+NPK*, soit l'association *DAP+KCl+Urée*. Pour les deux analyses qui seront réalisées, nous détaillerons uniquement les méthodes de calculs pour l'association *Urée+NPK*, les calculs étant similaires pour l'association *DAP+KCl+Urée*.

Modélisation du gain dégagée par l'utilisation d'engrais minéraux, en fonction du prix de ceux-ci.

Notation :

MB = Matière brute, PB = Produit brut, CO = Charges opérationnelles

A = Charges opérationnelles autres que celles liées aux engrais minéraux

B = Charges opérationnelles liées aux engrais minéraux

x = prix NPK, y = prix urée, qté = quantité de

L'indice *a*, indique que l'itinéraire technique suivi utilise des engrais minéraux.

L'indice *s*, indique que l'itinéraire technique n'utilise pas des engrais minéraux.

Calcul du gain :

On a $MB = PB - CO$

Avec engrais minéraux : $MB_a = PB_a - CO_a = PB_a - (A+B)$

Sans engrais minéraux : $MB_s = PB_s - CO_s = PB_s - A$

Le prix seuil des engrais minéraux à partir duquel il est intéressant de fertiliser répond à l'équation :

$$MB_a = MB_s \Leftrightarrow PB_a - (A+B) = PB_s - A$$

$$\Leftrightarrow PB_a - PB_s = B$$

$$\Leftrightarrow PB_a - PB_s = (qté\ NPK) \cdot x + (qté\ urée) \cdot y \quad \{1\}$$

Il s'agit ensuite de déterminer une fonction exprimant le prix des engrais à partir d'une seule variable. Soit $y = k \cdot x$, avec *k* le rapport moyen *prix Urée/prix NPK* sur les années 2008 à 2011.

	2008	2009	2010	2011
Prix NPK (Ar)	1500	2000	2600	1650
Prix Urée (Ar)	1300	1400	1800	1350
Rapport	0,86	0,70	0,69	0,81

Moyenne du rapport <i>prix Urée/prix NPK</i>
$k = 0,765$

Tableau 2 : Prix des engrais NPK et Urée pour les années 2008 à 2011 et moyenne du rapport (prix urée/prix NPK)

Ainsi, l'équation précédente {1} devient $PB_a - PB_s = (\text{qté NPK} + (k*(\text{qté urée}))*x)$
 $PB_a - PB_s$ correspond au gain ou à la perte due à la fertilisation minérale.

Conclusion :

- si $PB_a - PB_s = (\text{qté NPK} + (k*(\text{qté urée}))*x) \Leftrightarrow x = (PB_a - PB_s) / (\text{qté NPK} + k*(\text{qté urée}))$

Le gain est nul donc le fait d'utiliser des intrants n'entraîne pas un gain d'argent supérieur à celui obtenu en suivant un itinéraire technique sans engrais minéraux. En revanche le risque pris par l'agriculteur est important, d'autant plus s'il a réalisé un crédit pour acheter des engrais.

- si $PB_a - PB_s > (\text{qté NPK} + (k*(\text{qté urée}))*x) \Leftrightarrow x < (PB_a - PB_s) / (\text{qté NPK} + k*(\text{qté urée}))$

Le gain est positif donc les paysans ont intérêt à utiliser des engrais minéraux.

- si $PB_a - PB_s < (\text{qté NPK} + (k*(\text{qté urée}))*x) \Leftrightarrow x > (PB_a - PB_s) / (\text{qté NPK} + k*(\text{qté urée}))$

Le gain est négatif donc la marge brute dégagée pour une parcelle cultivée avec des engrais minéraux est inférieure à celle obtenue pour une culture sans engrais minéraux. Les paysans n'ont donc pas intérêt à utiliser des engrais minéraux.

Ainsi, connaissant le prix des engrais, cette modélisation permettra de déterminer chaque année le gain susceptible d'être réalisé grâce à la une fertilisation minérale.

Modélisation du retour sur investissement en fonction du prix des engrais minéraux

Pour compléter les résultats obtenus avec la modélisation du gain dégagé par la fertilisation minérale, il est intéressant de calculer le retour sur investissement engendré dans le cas de l'itinéraire technique avec fertilisation minérale. Le calcul du retour sur investissement (RI) permet de mesurer le risque pris par l'agriculteur d'utiliser des engrais minéraux sur sa culture. Il correspond au rapport de la marge brute sur les charges opérationnelles.

Calcul du retour sur investissement :

$$RI = MB_a / CO_a \Leftrightarrow RI = (PB_a - CO_a) / CO_a$$

$$\Leftrightarrow RI = PB_a / CO_a - 1$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{RI = (PB_a / (A + (\text{qté NPK} + k*(\text{qté urée}))*x)) - 1}$$

Conclusion :

- Si RI < 1,5, le retour sur investissement est faible donc le risque est important et il n'est pas conseillé d'utiliser des engrais minéraux.

$$RI < 1,5 \Leftrightarrow (PB_a / (A + (\text{qté NPK} + k*(\text{qté urée}))*x)) - 1 < 1,5$$

$$\Leftrightarrow PB_a / (A + (\text{qté NPK} + k*(\text{qté urée}))*x) < 2,5$$

$$\Leftrightarrow PB_a < 2,5*(A + (\text{qté NPK} + k*(\text{qté urée}))*x), \text{ car } A + (\text{qté NPK} + k*(\text{qté urée}))*x > 0$$

$$\Leftrightarrow x > (PB_a - 2,5*A) / (2,5*(\text{qté NPK} + k*(\text{qté urée})))$$

- Si 1,5 < RI < 2, le retour sur investissement est correct donc le risque est modéré. Le choix de l'utilisation d'engrais minéraux dépend de la stratégie suivie par l'agriculteur.

$$1,5 < RI < 2 \Leftrightarrow (PB_a - 3*A)/(3*(qté\ NPK + k*(qté\ urée))) < x < (PB_a - 2,5*A)/(2,5*(qté\ NPK + k*(qté\ urée)))$$

- Si $RI > 2$, le retour sur investissement est élevé donc le risque est faible. Il est intéressant d'utiliser des engrais minéraux.

$$RI > 2 \Leftrightarrow x < (PB_a - 3*A)/(3*(qté\ NPK + k*(qté\ urée)))$$

➤ **Conclusion sur la détermination du prix seuil d'utilisation des engrais minéraux**

Le calcul du seuil de rentabilité du prix des engrais minéraux, ainsi que le calcul du retour sur investissement en fonction du prix des engrais, permettront d'apporter chaque année un conseil rigoureux aux paysans quant à l'utilisation ou non de fertilisation minérale.

Les prix seuil d'utilisation des engrais NPK et urée qui seront conseillés aux paysans, correspondront :

- aux prix seuils de rentabilité x_1 et y_1 si ceux-ci se situent dans la zone de prix où le retour sur investissement devient intéressant ($RI > 1,5 \Leftrightarrow x < x_3 \ \& \ y < y_3$). (cf Figure 5)

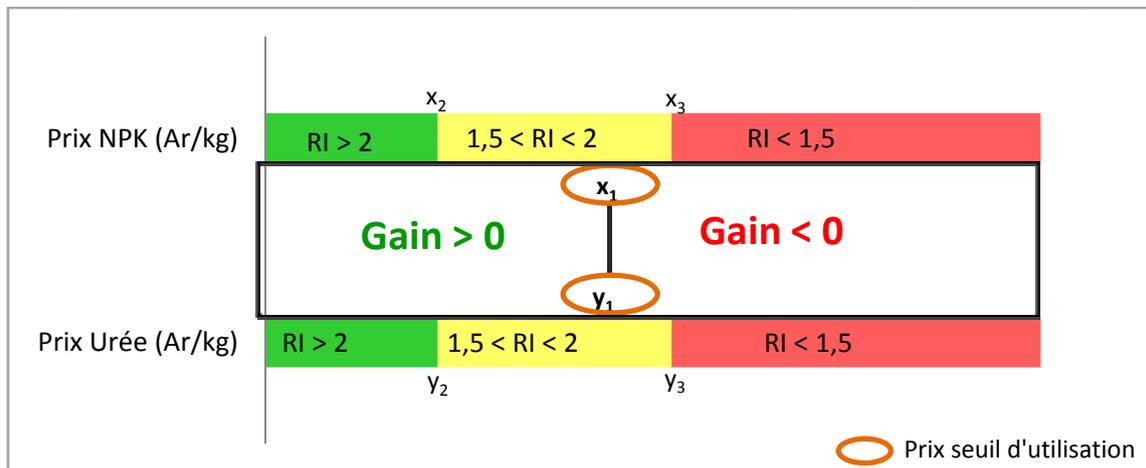


Figure 2 : Détermination visuelle du prix seuil d'utilisation des engrais NPK et urée. Cas où le prix seuil de rentabilité est supérieur au prix seuil calculé pour un $RI > 1,5$

- aux prix où le retour sur investissement devient intéressant ($RI > 1,5 \Leftrightarrow x < x_3 \ \& \ y < y_3$), si les prix seuils de rentabilité du NPK et de l'urée se situent dans la zone de prix où le retour sur investissement est faible ($RI < 1,5 \Leftrightarrow x > x_3 \ \& \ y > y_3$). (cf Figure 6)

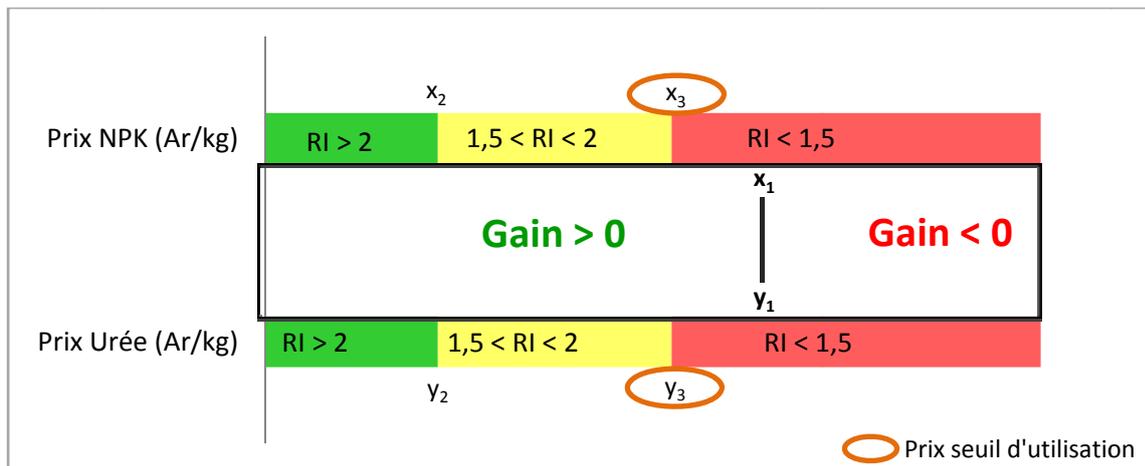


Figure 3 : Détermination visuelle du prix seuil d'utilisation des engrais NPK et urée. Cas où le prix seuil de rentabilité est inférieur au prix seuil calculé pour un RI > 1,5

Ainsi, pour la culture de l'année en cours :

- si le prix des engrais NPK et urée sont au-dessus de ces seuils d'utilisation, les préconisations qui devront être faites aux paysans seront de ne pas utiliser des engrais minéraux. En effet, soit utiliser des engrais entraînera une perte d'argent pour le paysan, soit le retour sur investissement sera trop faible et donc le risque pris trop élevé.
- si le prix des engrais NPK et urée sont au-dessous de ces seuils, il commence à être intéressant d'utiliser une fertilisation minérale pour les paysans, car le gain est positif et le retour sur investissement correct ($RI > 1,5$). Pour un retour sur investissement supérieur à 2, ($\Leftrightarrow x < x_2$ & $y < y_2$), le risque pris est encore plus faible d'où un intérêt encore plus élevé de fertiliser la culture.

Critique du modèle :

Il est important de noter que la modélisation du gain dégagé par l'utilisation d'engrais minéraux, ainsi que celle du retour sur investissement en fonction du prix des engrais minéraux ne sont parfaites. En effet, d'une part, ces modélisations ne prennent pas en compte la variabilité du prix de vente de la récolte d'une année sur l'autre (prix basés sur ceux de l'année 2008). D'autre part, le coefficient utilisé afin d'exprimer y en fonction de x est une moyenne du rapport *prix Urée/prix NPK* sur les années 2008 à 2011. Or les prix varient de façon non proportionnelle entre eux d'une année sur l'autre. L'expression du prix de l'urée en fonction du prix du NPK est donc approximative.

Détermination du prix seuil d'utilisation des engrais minéraux pour les données standards de 2008 du RFR.

Pour ces données, l'objectif est de réaliser le même type d'étude que pour les données de Tafa, c'est-à-dire de déterminer le prix seuil d'utilisation des engrais minéraux pour les itinéraires techniques standards suivis. Les données standards sont réparties comme suit :

	Tanety de la zone ZNE	Baibohos de la zone VSE
Culture de riz en semis direct	9	4

Culture de riz sur labour	14	14
Culture de maïs en semis direct	7	4
Culture de maïs sur labour	9	10

Tableau 3 : nombre de données standards par culture et par type de sol

La difficulté réside dans le fait que, contrairement aux données expérimentales de Tafa, on ne dispose pas de plusieurs données suivant le même itinéraire technique mais ayant des fertilisations différentes. Il est donc difficile de déterminer quelle est la part d'effet de la fertilisation sur le rendement obtenu.

Dans un premier temps, on réalisera un travail préliminaire sur ces données qui consistera à essayer de sélectionner pour chaque culture certains couples de données où l'itinéraire technique suivi est similaire mais où la fertilisation est différente.

Dans un second temps, les mêmes calculs que ceux réalisés pour les données de Tafa seront appliqués à ces données, à savoir : i) Une modélisation du gain dégagé par la fertilisation minérale, en fonction du prix des engrais minéraux et ii) Une modélisation du retour sur investissement en fonction du prix des engrais minéraux.

Détermination de modèles d'évolution du rendement en fonction de la fertilisation à partir des données réelles de 2008 du RFR.

L'étude a pour but de rechercher une corrélation linéaire entre le rendement et le niveau de fertilisation. En effet, les doses d'engrais minéraux administrées aux cultures n'étant pas très élevées, l'expression du rendement en fonction de la fertilisation peut être modélisée par une droite. (D'après les dires d'expert). Les données réelles sont réparties comme suit :

	Tanety de la zone ZNE	Baibohos de la zone VSE
Culture de riz en semis direct	63	320
Culture de riz sur labour	152	269
Culture de maïs en semis direct	90	14
Culture de maïs sur labour	149	38

Tableau 4 : Nombre de données réelles par culture et par type de sol

Recherche d'une relation linéaire entre le rendement et la fertilisation

Après observation des itinéraires techniques des données réelles, on constate qu'il existe de nombreux types de fertilisation :

- Aucun apport d'engrais organique ou minéral
- Apport de fumure organique
- Apport de fumure organique et de NPK
- Apport de fumure organique et d'urée
- Apport de fumure organique, d'urée et de NPK
- Apport de NPK seul
- Apport d'urée seul
- Apport d'urée et de NPK

Les éléments fertilisants majeurs sont l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K) et le magnésium (Mg). La valeur fertilisante d'un engrais s'exprime par sa teneur :

- en élément pur N pour l'azote
- en anhydride phosphorique P₂O₅ pour le phosphore
- en oxyde anhydre de potassium K₂O pour le potassium
- en oxyde anhydre de magnésium MgO pour le magnésium

D'après les dires d'expert, les baibohos sont des sols plutôt riches en phosphore et potassium et il semblerait que l'azote soit l'élément ayant l'effet le plus important sur ce type de sol. Concernant les tanety, la fertilité des sols est très variable d'une parcelle à une autre. Pour des raisons de simplification, cette étude portera uniquement sur la valeur fertilisante azotée.

Calcul de la valeur fertilisante azotée :

L'azote total administré à la parcelle correspond à la somme de l'azote (N) contenu dans chaque type d'engrais apporté sur la parcelle.

- L'engrais minéral NPK apporté aux cultures est de type 11-22-16, c'est-à-dire qu'un kilogramme d'engrais contient 11% d'azote minéral.
- L'urée contient 46% d'azote minéral.
- La fumure organique (fo) apportée à la culture est généralement de la poudrette de parc contenant 3% d'azote minéral (dires d'expert).

Unités d'azote total = (%N (NPK))*(qté NPK) + (%N (Urée))*(qté Urée) + (%N(fo))*(qté fo)

Unités d'azote total = 0,11*(qté NPK) + 0,46*(qté urée) + 0,03*(qté fo)

Cette équation permet de calculer pour chaque itinéraire technique des données réelles la valeur de fertilisation azotée apportée sur la culture. Il est important de noter que ce modèle linéaire sera applicable uniquement pour des quantités d'engrais qui correspondent à l'intervalle des valeurs de fertilisation azotée observée sur le terrain.

Graphique et statistiques :

Le nuage de point (*valeur fertilisante azotée, rendement*) sera construit sous excel. Les valeurs extrêmes pourront être retirées puis la modélisation d'une corrélation linéaire entre le rendement et la valeur fertilisante azotée sera testée. Si la régression linéaire est satisfaisante, cela nous permettra de connaître la quantité supplémentaire produite pour une unité fertilisante azotée en plus. On obtiendra une expression du type : Rendement = A*N + B {2} (avec N = unité fertilisante azotée).

A partir de cette équation {2}, on souhaite déterminer une relation liant le gain réalisé par la fertilisation azotée à la quantité d'engrais et au prix de l'engrais. Ainsi, à partir d'une telle relation on pourra définir : i) pour le prix de l'engrais de l'année en cours, quelle est la quantité seuil d'engrais minéral à apporter à la parcelle pour que la culture soit rentable et

en prenant un risque mesuré et ii) pour une quantité d'engrais fixé, quelle est le prix seuil d'utilisation des engrais minéraux.

Détermination de la quantité seuil d'engrais à apporter à la culture pour un prix de l'engrais connu

Notation :

PB = Produit brut, MB = Marge brute

a = prix d'un kilo de NPK en Ar, $a > 0$

b = prix d'un kilo d'urée en Ar, $b > 0$

y = quantité de NPK apporté sur la parcelle, $x > \text{ou} = 0$

x = quantité d'urée apportée sur la parcelle, $y > \text{ou} = 0$

z = quantité de fumure organique apportée sur la parcelle, $z > \text{ou} = 0$. Le prix de la fumure organique est estimé constant à 20 Ar/kg.

N = unité fertilisante azotée

Cl_a = Consommation intermédiaire en engrais minéraux et organiques

Cl_s = Consommation intermédiaire autres que celles liées aux engrais minéraux et organiques

Modélisation du gain dégagé par la fertilisation azotée, en fonction du prix et de la quantité des engrais utilisés.

On a $PB = (\text{prix d'un kilo de récolte}) * \text{Rendement}$

$$= (\text{prix d'un kilo de récolte}) * (A * N + B)$$

$= C * N + D$ (avec C la pente de la droite et D l'ordonnée à l'origine, c'est-à-dire le produit brut théorique obtenu sans apport de fertilisation azotée)

Or $N = 0,11 * y + 0,46 * x + 0,03 * z$ donc $PB = 0,11C * y + 0,46C * x + 0,03C * z + D$

On a $CO = Cl_s + Cl_e = Cl_s + a * y + b * x + 20 * z$

Et $MB = PB - CO$

Donc $MB = (0,11C * y + 0,46C * x + 0,03C * z + D) - (Cl_s + a * y + b * x + 20 * z)$

$$MB = (0,11C - a) * y + (0,46C - b) * x + (0,03C - 20) * z + (D - Cl_s)$$

Donc **Gain = $(0,11C - a) * y + (0,46C - b) * x + (0,03C - 20) * z$** et $D - Cl_s$ correspond à la marge brute réalisée pour une culture sans engrais.

Conclusion :

- Si $(0,11C - a) * y + (0,46C - b) * x + (0,03C - 20) * z = 0 \Leftrightarrow y = ((b - 0,46C) * x + (20 - 0,03C) * z) / (0,11C - a)$ avec $a \sim 0,11C$, alors la fertilisation apporté n'entraîne pas de gain ni de perte d'argent pour le paysan.
- Si $(0,11C - a) * y + (0,46C - b) * x + (0,03C - 20) * z < 0$ alors la fertilisation entraîne une perte d'argent pour le paysan.
 - o Si $a < 0,11C$, $\{2\} \Leftrightarrow y < ((b - 0,46C) * x + (20 - 0,03C) * z) / (0,11C - a)$
 - o Si $a > 0,11C$, $\{2\} \Leftrightarrow y > ((b - 0,46C) * x + (20 - 0,03C) * z) / (0,11C - a)$
- Si $(0,11C - a) * y + (0,46C - b) * x + (0,03C - 20) * z > 0$ alors la fertilisation entraîne un gain d'argent pour le paysan.

- Si $a < 0,11C$, $\{2\} \Leftrightarrow y > ((b - 0,46C)*x + (20 - 0,03C)*z)/(0,11C - a)$
- Si $a > 0,11C$, $\{2\} \Leftrightarrow y < ((b - 0,46C)*x + (20 - 0,03C)*z)/(0,11C - a)$

Pour une année donnée, le prix du NPK (a) et de l'urée (b) sont connus. La quantité de fumure organique apportée sur la parcelle (z) est fixée par le paysan/technicien. Ainsi, seules les quantités de NPK (y) et d'urée (x) sont variables, et on peut déterminer pour quelles quantités d'urée et de NPK le gain dégagé par la fertilisation azotée est positif, c'est-à-dire quels sont les couples (x, y) pour lesquels la fertilisation azotée est rentable.

L'interprétation du graphique représentant la droite d'équation $y = ((b - 0,46C)*x + (20 - 0,03C)*z)/(0,11C - a)$ {3} est la suivante :

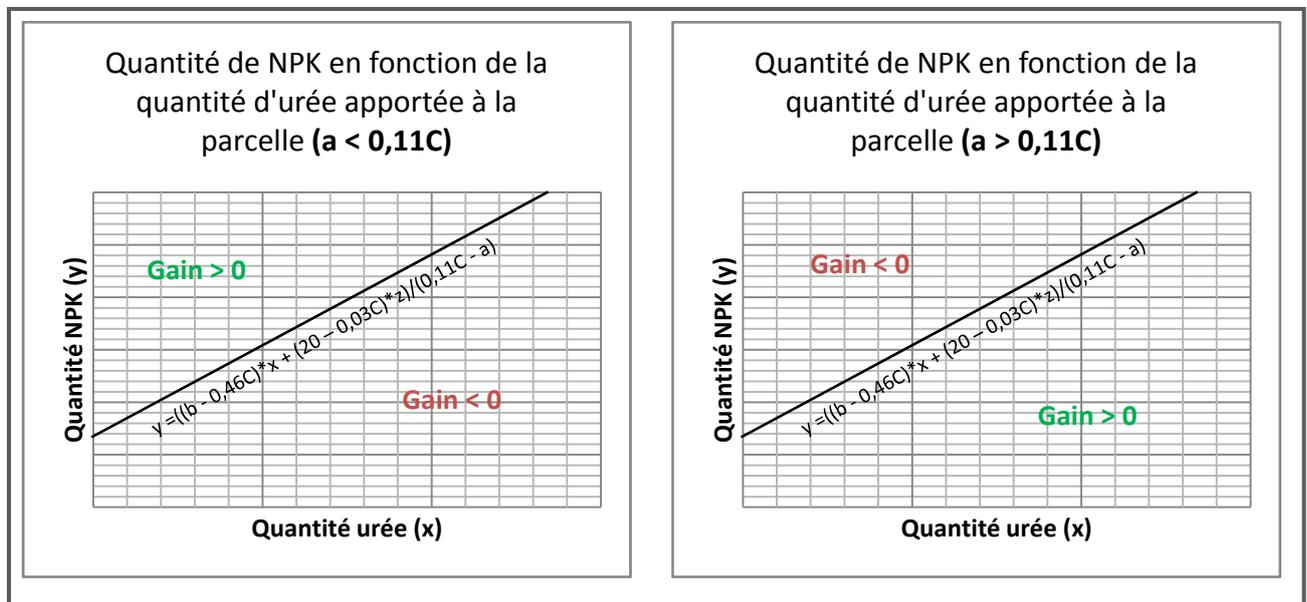


Figure 4 : Graphiques d'aide à l'interprétation des prix seuils de rentabilité des engrais NPK et urée

Modélisation du retour sur investissement en fonction du prix et de la quantité des engrais apportés à la culture

Afin de compléter les résultats, il est intéressant de calculer la quantité seuil d'engrais minéraux pour lequel le retour sur investissement devient intéressant.

- Si $RI < 1,5$, le retour sur investissement est faible donc le risque est élevé. Il n'est pas conseillé de fertiliser.
- En revanche si $RI > 1,5$, le retour sur investissement est correct et il devient intéressant d'utiliser une fertilisation sur les cultures.

$$RI = MB/CO$$

$$= ((0,11C*y + 0,46C*x + 0,03C*z + D) - (Cl_s + a*y + b*x + 20*z))/(Cl_s + a*y + b*x + 20*z)$$

$$= (0,11C*y + 0,46C*x + 0,03C*z + D)/(Cl_s + a*y + b*x + 20*z) - 1$$

$$\begin{aligned}
\text{RI} > 1,5 &\Leftrightarrow (0,11C*y + 0,46C*x + 0,03C*z + D)/(Cl_s + a*y + b*x + 20*z) - 1 > 1,5 \\
&\Leftrightarrow (0,11C*y + 0,46C*x + 0,03C*z + D)/(Cl_s + a*y + b*x + 20*z) > 2,5 \\
&\Leftrightarrow (0,11C*y + 0,46C*x + 0,03C*z + D) > 2,5*(Cl_s + a*y + b*x + 20*z), \text{ car } (Cl_s + a*y + b*x + 20*z) > 0 \\
&\Leftrightarrow (0,11C - 2,5a)*y + (0,46C - 2,5b)*x + (0,03C - 20)*z + (D - 2,5Cl_s) > 0 \\
&\Leftrightarrow (0,11C - 2,5a)*y > (2,5b - 0,46C)*x + (20 - 0,03C)*z + (2,5Cl_s - D) \\
&\quad \circ \text{ Si } a < 0,11C/2,5 \text{ alors } y > ((2,5b - 0,46C)*x + (20 - 0,03C)*z + (2,5Cl_s - D))/(0,11C - 2,5a) \\
&\quad \circ \text{ Si } a > 0,11C/2,5 \text{ alors } y < ((2,5b - 0,46C)*x + (20 - 0,03C)*z + (2,5Cl_s - D))/(0,11C - 2,5a)
\end{aligned}$$

Ainsi, sur les graphiques précédents, si on ajoute la droite d'équation $y = ((2,5b - 0,46C)*x + (20 - 0,03C)*z + (2,5Cl_s - D))/(0,11C - 2,5a)$, on obtiendra l'ensemble des couples solutions (x,y) qui correspondent à un gain positif et à un retour sur investissement supérieur à 1,5.

Détermination du prix seuil d'utilisation des engrais minéraux pour une quantité fixée d'engrais apportés à la culture.

Les calculs sont tout à fait similaires aux calculs précédents :

$$\begin{aligned}
\text{Gain} > 0 &\Leftrightarrow (0,11C - a)*y + (0,46C - b)*x + (0,03C - 20)*z > 0, \quad (\{3\} > 0) \\
&\Leftrightarrow (0,11C - a) > ((b - 0,46C)*x + (20 - 0,03C)*z)/y, \text{ car } y > 0 \text{ par définition} \\
&\Leftrightarrow a < ((0,46C - b)*x + (0,03C - 20)*z)/y + 0,11C \\
\text{RI} > 1,5 &\Leftrightarrow (0,11C - 2,5a)*y + (0,46C - 2,5b)*x + (0,03C - 20)*z + (D - 2,5Cl_s) > 0 \\
&\Leftrightarrow (0,11C - 2,5a) > ((2,5b - 0,46C)*x + (20 - 0,03C)*z + (2,5Cl_s - D))/y, \text{ car } y > 0 \text{ par définition} \\
&\Leftrightarrow a < ((0,46C - 2,5b)*x + (0,03C - 20)*z + (D - 2,5Cl_s))/2,5*y + 0,11C/2,5
\end{aligned}$$

Ainsi, pour une quantité fixée des engrais NPK(y), urée(x) et fumure organique (z), les couples (a,b) solutions du système d'équations {4} suivant correspondent aux prix des engrais NPK et urée tels que le gain soit positif et le retour sur investissement supérieur à 1,5.

$$\{4\} \begin{cases} a < ((0,46C - b)*x + (0,03C - 20)*z)/y + 0,11C \\ a < ((0,46C - 2,5b)*x + (0,03C - 20)*z + (D - 2,5Cl_s))/2,5*y + 0,11C/2,5 \end{cases}$$

Application des modèles obtenus aux données de Tafa et aux données standards

Afin de confirmer nos modèles, nous testerons les données Tafa et les données standards étudiées sur ceux-ci.

Pour chaque donnée, nous calculerons la valeur fertilisante azotée apportée à la culture et nous comparerons le produit brut théorique (obtenu à partir de l'équation de modélisation) au produit brut réel observé.

Cela nous permettra de connaître les itinéraires techniques pour lesquels nous pouvons appliquer les modèles.

2 Principaux résultats pour les données standards

Culture de riz sur baibohos zone VSE

Sur les baibohos de la zone VSE, on dispose 269 données réelles pour le riz sur labour, rassemblées en 14 données standards (A à N) ; et de 320 données réelles pour le riz en semis direct, regroupées en 4 données standards (A à D). Les données standards ne regroupent pas toujours des données réelles dont la variété du riz est la même. Ainsi, des sous classes des données standards, regroupant des données réelles dont le riz est de même variété, ont été réalisées. Ces nouvelles données standards sont notée A2, B2, etc. Après confrontation des données standards entre elles, on peut proposer plusieurs comparaisons de données où les itinéraires techniques sont semblables mais où la fertilisation est différente.

Comparaison de :

- Riz E et riz H2 en labour. La variété utilisée est le riz B22.
- Riz K2 et riz M2 en labour. La variété utilisée est le riz B22
- Riz A2 et riz B2 en semis direct. La variété utilisée est principalement le riz Sebota 68 (quelques riz Sebota 69 et 70).

Les itinéraires techniques suivis sont les suivants :

	Cas	1 : labour		2 : labour		3 : semis direct		
		Comparaison	Riz E2 (B22)	Riz H2 (B22)	Riz K2 (B22)	Riz M2 (B22)	Riz A2 (Sebota 60+)	Riz B2 (Sebota 60+)
		Date semis	23-déc	27-déc	30-déc	27-déc	22-déc	20-déc
semence	Culture (kg/ha)	69	60	66	65	64	60	
engrais	Fumier (kg/ha)	3913	3900	3201	2764	2718	3061	
	Urée (kg/ha)	68	67	0	0	54	19	
	NPK (kg/ha)	121	0	138	0	61	59	
	Gaicho (g/ha)	172	143	170	163	152	148	
Herbicide	2,4-D (L/ha)	0	0	0	0	0,9	1	
	glyphosate (L/ha)	0	0	0	0	4,3	4	
Main d'œuvre	Sarclage (h)	45	42	36	39	47	29	

Tableau 5 : Itinéraires techniques suivis pour les riz étudiés sur baibohos de la zone VSE

Dans le 1er cas, l'étude a pour but de montrer l'effet sur le produit brut de l'ajout de **121 kg/ha de NPK**, et ainsi de calculer le prix seuil d'utilisation du NPK dans le cas de cet itinéraire technique.

Dans le 2^{ème} cas, c'est également l'ajout de **138 kg/ha de NPK** qui sera observé mais pour un itinéraire technique ne comportant pas d'urée.

Dans le 3^{ème} cas, ce sera au contraire l'ajout de **35 kg/ha l'urée** qui sera testé.

Les résultats de la culture obtenus pour chaque cas sont résumés dans le tableau ci-dessous. Le prix de vente du riz est celui de l'année 2008, 550Ar/kg.

Cas	1 : labour		2 : labour		3 : semis direct	
Comparaison	Riz E2 (B22)	Riz H2 (B22)	Riz K2 (B22)	Riz M2 (B22)	Riz A2 (Sebota 60+)	Riz B2 (Sebota 60+)
Rendement (kg/ha)	4767	3623	3097	2527	4373	3703
Produit brut (Ar/ha)	2 621 850	1 992 650	1 703 350	1 389 850	2 405 150	2 036 650
Charges opérationnelles (Ar/ha)	516 402	311 605	432 867	209 389	371 750	314 680

Tableau 6 : Résultats économiques des cultures de riz étudiées sur baibohos de la zone VSE

Les charges opérationnelles prennent en compte le prix des semences, des traitements phytosanitaires, des engrais et de 50% de la main d'œuvre totale. En effet, on considèrera que 50 % de la main d'œuvre totale est salariale, ce qui correspond assez bien à la réalité paysanne.

Modélisation du gain dégagé par l'utilisation d'urée

L'équation de la modélisation du gain réalisé par la fertilisation minérale est

$PBa - PBs = \Delta(\text{qté NPK}) * x + \Delta(\text{qté urée}) * y$, avec x le prix du NPK et y le prix de l'urée.

	Cas 1	Cas 2	Cas 3
Equation modélisation	$629\ 200 = 121 * x$	$313\ 500 = 138 * x$	$368\ 500 = 35 * y$
Seuil rentabilité prix engrais (Ar/kg)	$x = 5\ 198$	$x = 2\ 271$	$y = 10\ 528$

Tableau 7 : Equation de la modélisation du gain dégagé en fonction du prix des engrais et seuil de rentabilité associé pour les cultures de riz étudiées sur baibohos de la zone VSE.

Calcul du retour sur investissement en fonction du prix des engrais minéraux

Le calcul du retour sur investissement (RI) permet de mesurer le risque pris par l'agriculteur d'utiliser des engrais minéraux sur sa culture. Il correspond au rapport de la marge brute sur les charges opérationnelles.

D'après les calculs réalisés dans la partie traitant les données de Tafa, on a :

- $RI < 1,5 \Leftrightarrow x > (PB - 2,5 * A) / (2,5 * (\Delta \text{qté NPK} + k * (\Delta \text{qté urée})))$. Le risque est important
- Si $1,5 < RI < 2 \Leftrightarrow (PB - 3 * A) / (3 * (\Delta \text{qté NPK} + k * (\Delta \text{qté urée}))) < x < (PB - 2,5 * A) / (2,5 * (\Delta \text{qté NPK} + k * (\Delta \text{qté urée})))$. Le risque est modéré.
- Si $RI > 2 \Leftrightarrow x < (PB - 3 * A) / (3 * (\Delta \text{qté NPK} + k * (\Delta \text{qté urée})))$. Le risque est faible.

Pour les trois cas étudiés on obtient les résultats suivants :

	cas 1	Cas 2	Cas 3
RI < 1,5	$x > 6\ 092$	$x > 3\ 420$	$y > 24\ 178$
$1,5 < \text{RI} < 2$	$4\ 647 < x < 6\ 092$	$2\ 597 < x < 3\ 420$	$18\ 190 < y < 24\ 178$
RI > 2	$x < 4\ 647$	$x < 2\ 597$	$y < 18\ 190$

Tableau 8 : Prix seuil des engrais, correspondant à différents niveaux de retour sur investissement, pour les cultures de riz étudiées sur baibohos de la zone VSE

➤ Conclusion

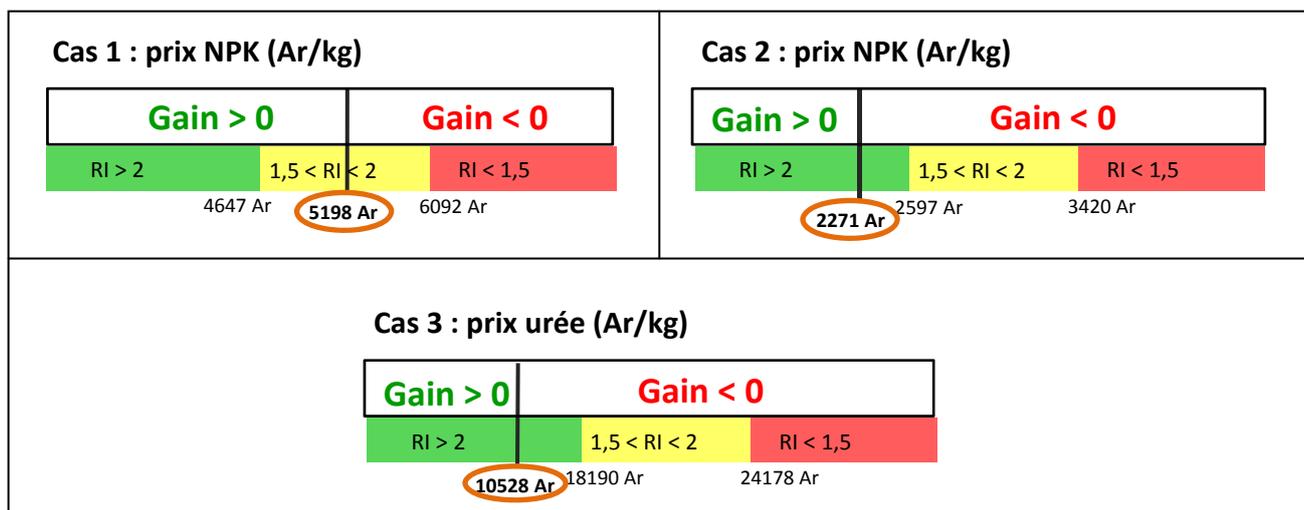


Figure 5 : Détermination visuelle du prix seuil d'utilisation des engrais minéraux pour chacune des cultures de riz étudiées sur baibohos de la zone VSE

Dans le cas de l'itinéraire technique 1, le gain est positif pour des prix du NPK inférieurs à 5198 Ar/kg. Pour ces prix, le retour sur investissement commence à être intéressant (RI > 1,5). Il est donc intéressant d'utiliser du NPK dans le cas de cet itinéraire technique quand le prix est inférieur à 5198 Ar/kg.

Dans le cas de l'itinéraire technique 2, le gain est positif pour des prix du NPK inférieurs à 2271 Ar/kg. Pour ces prix le retour sur investissement commence à être important (RI > 2) et il est donc intéressant d'utiliser du NPK. De même dans le cas de l'itinéraire technique 3, le gain est positif pour des prix de l'urée inférieurs à 10 528 Ar/kg et pour ces prix le retour sur investissement est important (RI > 2). Il est donc intéressant d'utiliser de l'urée si son prix est inférieur à 10 528 Ar/kg.

Ces résultats montrent que pour les cas 1 et 3, les paysans ont intérêt à utiliser des engrais minéraux sur leurs cultures car le prix des engrais n'a jamais excédé les seuils déterminés ci-dessus. Pour le cas 2, l'utilisation d'engrais NPK est intéressante pour le paysan si le prix du NPK est inférieur à 2271 Ar/kg. Par exemple, en 2010, le prix du NPK était de 2600 Ar/kg, ainsi, utiliser du NPK sur les parcelles suivant l'itinéraire technique du cas 2 entraînait une perte d'argent.

Il est important de noter que les cas étudiés ci-dessus ne représentent qu'une petite partie des données récoltées sur le terrain pour l'année 2008. En effet, il existe une très grande variabilité des itinéraires techniques et surtout des rendements. De plus, on constate que les rendements n'augmentent pas toujours avec la fertilisation.

Exemple 1 : Sur labour, les riz G et I suivent des itinéraires techniques semblables mise à part pour la fertilisation.

	date semis	semis (kg/ha)	gaucho (g/ha)	Engrais (kg/ha)			Main d'œuvre (heures)					Rendement (kg/ha)
				Fumier	Urée	NPK	Semis	Labour	Hersage	Sarclage	Recolte	
Riz G	24-déc	65	162	2 737	49	75	33	13	5	37	31	1 868
Riz I	29-déc	58	142	2 427	49	0	32	9	4	42	36	2 521

Tableau 9 : Comparaisons des itinéraires techniques suivis et du rendement des riz G et I sur baibohos de la zone VSE

Le riz G reçoit 75 kg/ha de NPK tandis que le riz I n'en reçoit pas. Contrairement à ce qu'on pourrait attendre, on observe que le rendement du riz G est nettement moins bon que celui du riz I. Il n'est pas possible d'expliquer ces résultats avec les seules informations que nous possédons.

Exemple 2 : En semis direct, les riz C et D suivent des itinéraires techniques similaires y compris pour la fertilisation.

	date semis	semis (kg/ha)	gaucho (g/ha)	Engrais (kg/ha)			Herbicides (L/ha)		Main d'œuvre (heures)				Rendement (kg/ha)
				Fumier	Urée	NPK	2,4-D	Glyphosate	Semis	Sarclage	Recolte	traitement phyto	
Riz C	21/12/07	60	154	1 768	31	22	1	5	36	39	37	4	2 523
Riz D	27/12/07	62	153	1 120	33	28	1,0	4,7	35	34	28	5	1 206

Tableau 10 : Comparaisons des itinéraires techniques suivis et du rendement des riz C et D sur baibohos de la zone VSE

On constate que le riz C a un rendement deux fois supérieur à celui du riz D bien que les itinéraires techniques soient semblables, y compris pour la fertilisation minérale. Certes, le semis du riz C est plus précoce que celui du riz D et 600kg/ha de fumure organique supplémentaire est apportée sur le riz C. Mais ces remarques ne peuvent pas expliquer à elles seules la grande différence de rendement observée.

Conclusion :

Ces deux exemples révèlent la principale faiblesse de nos données : la fertilité de la parcelle n'a pas été prise en compte lors de la collecte des informations. De ce fait certains résultats sont difficilement interprétables. Concernant les données standards que nous comparons, nous ne pouvons pas être certains que la différence de rendement observé est uniquement explicable par la différence de fertilisation minérale et il faut donc rester critique face aux résultats que nous obtenons.

Culture de riz sur tanety zone ZNE

Sur les tanety de la zone ZNE, on dispose de 153 données réelles pour le riz sur labour, rassemblées en 14 données standards (A à N) ; et de 63 données réelles pour le riz en semis direct, regroupées en 9 données standards (A à D). Pour les données relatives au semis direct, les itinéraires techniques sont trop différents les uns des autres pour pouvoir effectuer des comparaisons pertinentes. En revanche, pour les données standards sur labour, on peut proposer deux comparaisons de données où les itinéraires techniques sont semblables mais où la fertilisation est différente.

Comparaison de :

- Riz B et riz H en labour. La variété utilisée est le riz B22.
- Riz G et riz L en labour. La variété utilisée est le riz B22

Les itinéraires techniques suivis sont les suivants :

	Cas	1 : labour		2 : labour		
		Comparaison	Riz B (B22)	Riz H (B22)	Riz G (B22)	Riz L (B22)
		Date semis	25-déc	19-déc	26-déc	27-déc
semence	Culture (kg/ha)	55	53	54	53	
	Fumier (kg/ha)	3068	2659	3505	2387	
engrais	Urée (kg/ha)	53	0	0	0	
	NPK (kg/ha)	63	64	87	0	
	Gaucho (g/ha)	138	132	134	140	
Main d'œuvre	Sarclage (h)	40	35	36	37	

Tableau 11 : Itinéraires techniques suivis pour les cultures de riz étudiées sur tanety de la zone ZNE

Dans le premier cas, l'étude a pour but de montrer l'effet sur le rendement (produit brut) de l'ajout de **53 kg/ha d'urée**, sachant qu'il y a déjà 63 kg/ha de NPK. Dans le deuxième exemple, c'est l'effet sur le rendement de l'ajout de **87 kg/ha de NPK** qui sera étudié. Dans les deux cas, il s'agit de calculer le prix seuil d'utilisation de l'engrais pour l'itinéraire technique considéré.

Les résultats de la culture obtenus pour chaque cas sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Cas	1 : labour		2 : labour		
	Comparaison	Riz B (B22)	Riz H (B22)	Riz G (B22)	Riz L (B22)
Rendement (kg/ha)		2789	1573	2540	1817
Produit brut (Ar/ha)		1 533 950	865 150	1 397 000	999 350
Charges opérationnelles (Ar/ha)		285 674	208 280	262 801	107 287

Tableau 12 : Résultats économiques des cultures de riz étudiées sur tanety de la zone ZNE

Modélisation du gain dégagé par l'utilisation d'urée

L'équation de la modélisation du gain réalisé par la fertilisation minérale est

$PBa - PBs = \Delta(\text{qté NPK}) * x + \Delta(\text{qté urée}) * y$, avec x le prix du NPK et y le prix de l'urée.

	Cas 1	Cas 2
Equation modélisation	$668\ 800 = 53 \cdot y$	$397\ 650 = 87 \cdot x$
Seuil rentabilité prix urée (Ar/kg)	$y = 12\ 619$	$x = 4\ 571$

Tableau 13 : Equation de la modélisation du gain dégagé en fonction du prix des engrais et seuil de rentabilité associé pour les cultures de riz étudiées sur tanety de la zone ZNE.

➤ Calcul du retour sur investissement en fonction du prix des engrais minéraux

	Cas 1	Cas 2
RI < 1,5	$y > 7647$	$x > 6784$
$1,5 < \text{RI} < 2$	$6861 < y < 7647$	$5385 < x < 6784$
RI > 2	$y < 6861$	$x < 6784$

Tableau 14 : Prix seuil des engrais, correspondant à différents niveaux de retour sur investissement, pour les cultures de riz étudiées sur tanety de la zone ZNE

➤ Conclusion

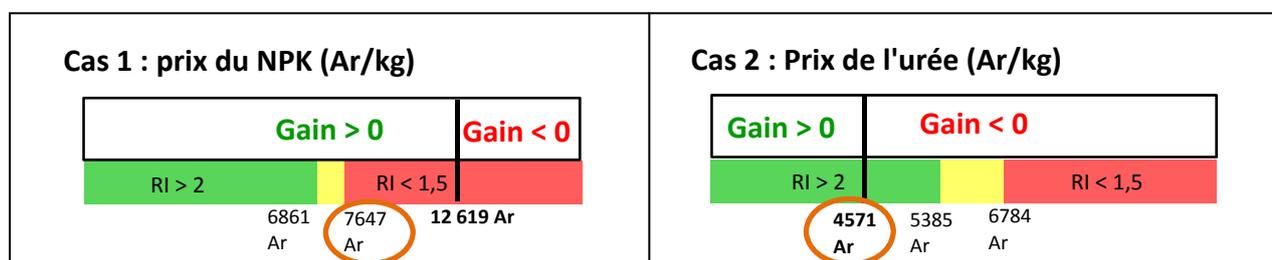


Figure 6 : Détermination visuelle du prix seuil d'utilisation des engrais minéraux pour chacune des cultures de riz étudiées sur tanety de la zone ZNE

Dans le cas de l'itinéraire technique 1, le gain est positif pour un prix de l'urée inférieur à 12 619 Ar/kg. Néanmoins, le retour sur investissement commence à être intéressant pour un prix de l'urée inférieur à 7647 Ar/kg. Ainsi, il devient intéressant d'utiliser de l'urée quand son prix est inférieur à 7647 Ar/kg. Dans le cas de l'itinéraire technique 2, le gain est positif pour un prix de l'urée inférieur à 4571 Ar/kg. Pour ces prix le retour sur investissement commence à être important (RI > 2) et il est donc intéressant d'utiliser de l'urée. Pour ces deux cas, les prix seuils sont élevés, et le prix des engrais n'a pour l'instant jamais dépassé ces prix. Il y a donc un fort intérêt à utiliser des engrais dans le cas de ces itinéraires techniques. De la même façon que l'étude du riz sur baibohos de la zone VSE, les cas présentés ici ne représentent qu'une petite partie des données récoltées sur le terrain. En effet, la fertilité des sols n'étant pas connue, de nombreuses données sont difficilement interprétables.

Culture de maïs sur baibohos zone VSE

Sur les baibohos de la zone VSE, on dispose de 14 données réelles pour la culture de maïs en semis direct, rassemblées en 4 données standards ; et de 38 données réelles pour la culture de maïs sur labour, regroupées en 10 données standards. Les itinéraires techniques des données standards étant trop différents, aucune comparaison n'est possible.

Culture de maïs sur tanety zone ZNE

Sur les tanety de la zone ZNE, on dispose de 9 données standards pour la culture de maïs sur labour (A à I) réalisées à partir de 130 données réelles ; et de 7 données standards (A à G) réalisées à partir de 90 données réelles pour la culture de maïs en semis direct. Après confrontation des données standards entre elles, on peut proposer certaines comparaisons de données où les itinéraires techniques sont semblables mais où la fertilisation est différente. Comparaison de :

- maïs+niébé C et I2 en labour. Le maïs I2 correspond au maïs+associé I reclassé en deux nouvelles données standards : maïs+associé (sans niébé) I1 et maïs+niébé I2.
- maïs+niébé D et F en semis direct

Les itinéraires techniques sont les suivants :

	Cas	1 : labour		2 : semis direct	
		maïs+niébé C	maïs+niébé I2	maïs+niébé D	maïs+niébé F
	Date semis	24-déc	30-déc	02-janv	02-janv
Semence	Culture (kg/ha)	26	25	25	24
	Plante de couverture (kg/ha)	14	14	12	15
Engrais	Fumier (kg/ha)	3054	3735	3880	2705
	Urée (kg/ha)	53	0	54	0
	NPK (kg/ha)	62	68	0	0
Insecticides et fongicides	Gaucho (g/ha)	106	78	124	120
	Lentialm (g/ha)	32	39	0	0
	Cyperméthrine (L/ha)	0	0	0,2	0
Main d'œuvre	Sarclage	32	30	35	33

Tableau 15 : Itinéraires techniques suivis pour les cultures de maïs étudiées sur tanety de la zone ZNE

Dans les deux cas, l'étude a pour but de montrer l'effet sur le produit brut de l'ajout d'**une cinquantaine de kg/ha d'urée**, et ainsi de calculer le seuil de rentabilité du prix de l'urée dans le cas de ces itinéraires techniques.

Les résultats obtenus pour chaque cas sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Cas	1 : labour		2 : semis direct	
	maïs+niébé A	maïs+niébé I2	maïs+niébé D	maïs+niébé F
Rendement (kg/ha)	2 046	1 393	2 309	2 001
Produit brut (Ar/ha)	818 400	557 200	923 600	800 400
Charges opérationnelles (Ar/ha)	390 270	278 640	252 580	164 700

Tableau 16 : Résultats économiques des cultures de maïs étudiées sur tanety de la zone ZNE

Modélisation du gain dégagé par l'utilisation d'urée

L'équation de la modélisation du gain réalisé par la fertilisation minérale est $PBa - PBs = \Delta(\text{qté NPK}) * x + \Delta(\text{qté urée}) * y$, avec x le prix du NPK et y le prix de l'urée.

Ici, seule la quantité d'urée varie, donc l'équation devient : $PBa - PBs = \Delta(\text{qté urée}) * y$

	Cas 1	Cas 2
Equation modélisation	$261\ 200 = 53 \cdot y$	$132\ 200 = 54 \cdot y$
Seuil rentabilité prix urée (Ar/kg)	$y = 4928$	$y = 2448$

Tableau 17 : Equation de la modélisation du gain dégagé en fonction du prix des engrais et seuil de rentabilité associé pour les cultures de maïs étudiées sur tanety de la zone ZNE.

Calcul du retour sur investissement en fonction du prix des engrais minéraux

	cas 1	cas 2
RI < 1,5	$y > 1225$	$y > 4956$
$1,5 < \text{RI} < 2$	$0 < y < 1225$	$3466 < y < 4956$
RI > 2	impossible	3466

Tableau 18 : Prix seuil des engrais, correspondant à différents niveaux de retour sur investissement, pour les cultures de maïs étudiées sur tanety de la zone ZNE

Conclusion

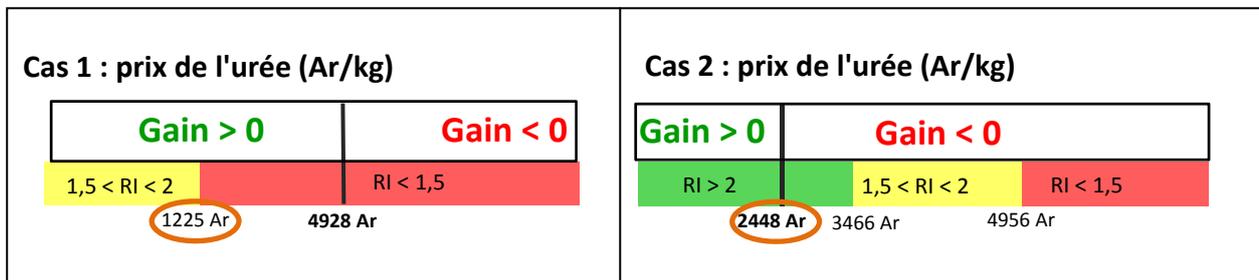


Figure 7 : Détermination visuelle du prix seuil d'utilisation des engrais minéraux pour chacune des cultures de maïs étudiées sur tanety de la zone ZNE

Dans le cas de l'itinéraire technique 1, le gain est positif à partir d'un prix de l'urée inférieur à 4928 Ar/kg, mais jusqu'à 1225 Ar/kg, le retour sur investissement est faible (RI < 1,5), donc le risque d'utiliser des engrais est important. Pour un prix de l'urée inférieur à 1225 Ar/kg, le retour sur investissement devient correct et il devient alors intéressant d'utiliser de l'urée. Ce prix seuil étant assez faible, il n'est pas intéressant d'utiliser de l'urée selon cet itinéraire technique. Dans le cas de l'itinéraire technique 2, le gain est positif pour un prix de l'urée inférieur à 2448 Ar/kg. Pour ces prix le retour sur investissement commence à être important (RI > 2) et il est donc intéressant d'utiliser de l'urée.

On peut noter que les résultats obtenus montrent également l'intérêt du semis direct. En effet, mise à part la fertilisation, les itinéraires techniques de ces deux cas sont similaires. On constate que les rendements sont meilleurs pour les systèmes en semis direct que pour ceux sur labour, bien que la fertilisation soit plus importante pour les cas sur labour.

Ici encore, les cas étudiés ici ne représentent qu'une partie des données récoltées sur le terrain, et il faut garder à l'esprit la très grande variabilité des résultats des cultures.

Résultats obtenus pour les données réelles

Culture de maïs sur baibohos de la zone VSE

Culture de maïs sur labour, sur baibohos de la zone VSE

Dans la zone VSE, sur les baibohos, on dispose de 38 données réelles pour le maïs en labour. Le graphique suivant représente le rendement en fonction de la fertilisation azotée pour l'ensemble des données réelles. On constate qu'il n'y a pas de corrélation linéaire et qu'il y a une très grande variabilité des rendements. On peut également remarquer que de très bons rendements sont obtenus sans aucune fertilisation.

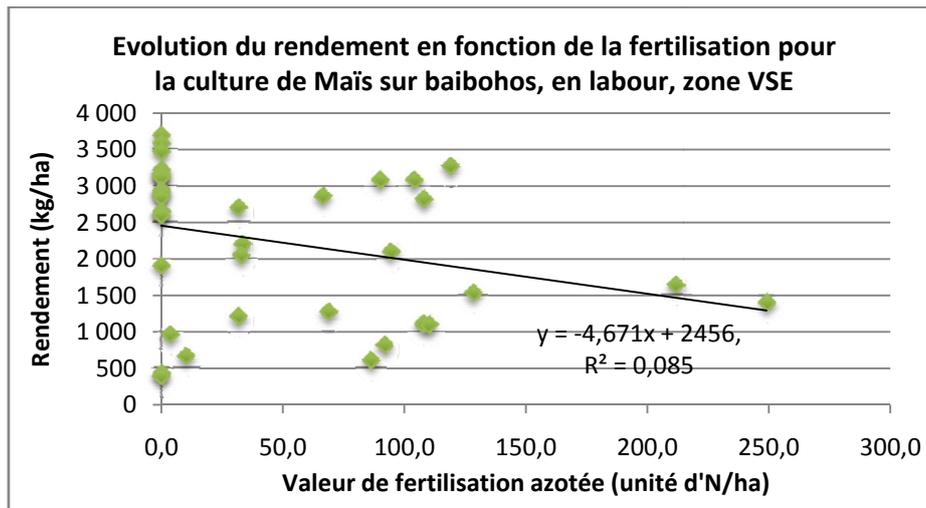


Figure 8 : Nuage de points du rendement en fonction de la fertilisation azotée pour la culture de maïs en labour, sur baibohos de la zone VSE

L'analyse peut être précisée en dissociant les 38 données réelles par catégorie d'association de cultures :

Association	Nombre de données
Maïs + niébé	9
Maïs + vigna	10
Maïs + dolique	13
Maïs + stylosanthes	3
Maïs + haricot	1
Maïs + mucuna	1
Maïs + soja	1

Tableau 19 : Nombre de données réelles par type d'association de culture pour le maïs en labour sur baibohos de la zone VSE

Pour les associations maïs+stylosanthes, maïs+mucuna, maïs+haricot et maïs+soja, le nombre de données est insuffisant pour pouvoir rechercher une relation linéaire entre le rendement et la fertilisation azotée. Pour l'association maïs+vigna, seulement deux données correspondent à des cultures ayant reçues une fertilisation, ce qui est également insuffisant pour rechercher une relation linéaire entre le rendement et la fertilisation azotée.

Concernant l'association maïs+dolique, le nuage de points suivant (*valeur fertilisation azotée, rendement*) est obtenu :

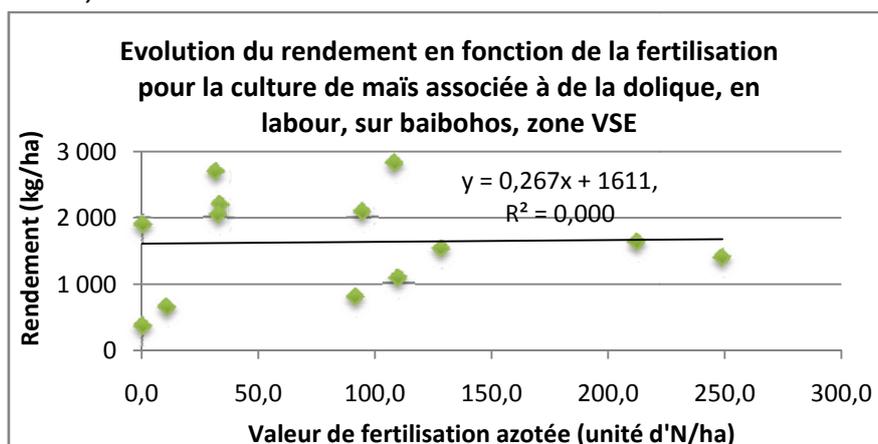


Figure 9 : Nuage de points du rendement en fonction de la fertilisation azotée pour la culture de maïs associées à de la dolique, en labour, sur baibohos de la zone VSE

Il n'y a pas de corrélation linéaire entre le rendement et la fertilisation azotée. La variabilité peut s'expliquer par les différents niveaux de fertilité du sol, donnée non prise en compte dans cette étude, mais également par le fait que l'on ne considère que l'azote pour la fertilisation.

L'association de culture maïs+niébé

En revanche, pour l'association maïs+niébé, après avoir retiré les données correspondantes à des cultures n'ayant pas reçu de fertilisation, on obtient le nuage de points suivant :

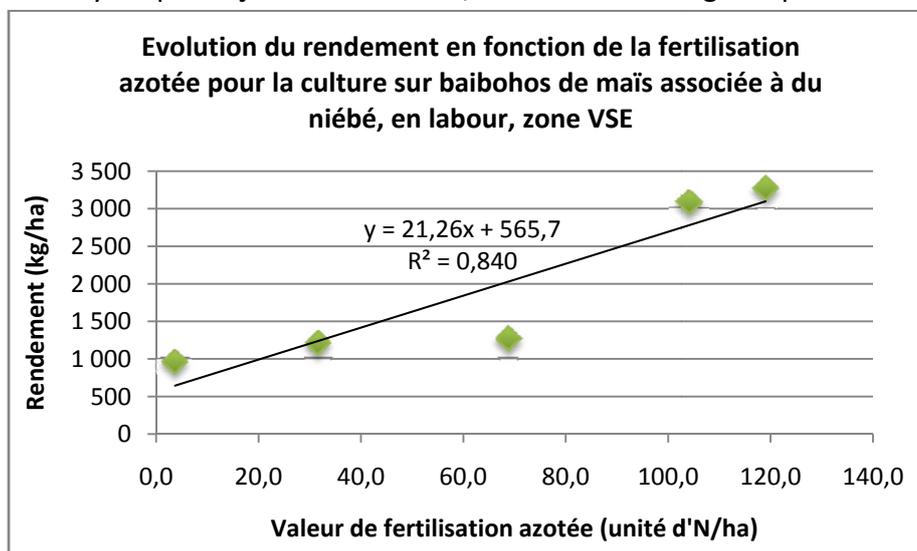


Figure 10 : Nuage de points du rendement en fonction de la fertilisation azotée pour la culture de maïs associée à du niébé, en labour, sur baibohos de la zone VSE

Régression linéaire

Le coefficient de régression linéaire étant de 0,84, on peut accepter la relation linéaire entre le rendement et la fertilisation azotée : Rendement = 21,262*N + 565,78. On considèrera que ce modèle est uniquement applicable pour des valeurs de fertilisation azotée comprises entre 0 et 119 unités d'azote/ha.

Suivant ce modèle, on peut considérer que sans fertilisation azotée, le rendement obtenu pour une culture de maïs sur labour associée à du niébé est de 566 kg/ha. De plus, pour une unité d'azote ajoutée, on obtient 21 kg de produit supplémentaire. Néanmoins, il est important de noter que le nombre de données est faible et donc les résultats suivants doivent être utilisés avec précaution.

Connaissant les prix de l'année en cours et la quantité de fumure organique apportée sur la culture, on pourra définir quelles sont les quantités d'urée (x) et de NPK(y) à apporter à la culture pour que le gain soit positif et le retour sur investissement intéressant (RI > 1,5).

Calcul du prix seuil de rentabilité

Produit brut = $400 \cdot \text{Rendement} = 8505 \cdot N + 226312$

Or $N = 0,11 \cdot y + 0,46 \cdot x + 0,03 \cdot z$ donc $PB = 935 \cdot y + 3912 \cdot x + 255 \cdot z + 226312$

On a $CO = Cl_s + Cl_e = 119607 + a \cdot y + b \cdot x + 20 \cdot z$ (Remarque = Cls est calculé en considérant 50% de main d'œuvre salariale)

Et $MB = PB - CO$

donc $MB = (935 \cdot y + 3912 \cdot x + 255 \cdot z + 226312) - (119607 + a \cdot y + b \cdot x + 20 \cdot z)$

$MB = (935 - a) \cdot y + (3912 - b) \cdot x + 235 \cdot z + 106705$

106 705 Ar correspond à la marge brute réalisée pour une culture sans engrais.

Conclusion pour le prix seuil de rentabilité :

- Si $(935 - a) \cdot y + (3912 - b) \cdot x + 235 \cdot z = 0 \Leftrightarrow y = ((b - 3912) \cdot x - 235 \cdot z) / (935 - a)$ avec $a \sim 935$, alors la fertilisation apportée n'entraîne pas de gain ni de perte d'argent pour le paysan.
- Si $(935 - a) \cdot y + (3912 - b) \cdot x + 235 \cdot z < 0$ {2} alors la fertilisation entraîne une perte d'argent pour le paysan.
 - o Si $a < 935$ Ar/kg, {2} $\Leftrightarrow y < ((b - 3912) \cdot x - 235 \cdot z) / (935 - a)$
 - o Si $a > 935$ Ar/kg, {2} $\Leftrightarrow y > ((b - 3912) \cdot x - 235 \cdot z) / (935 - a)$
- Si $(935 - a) \cdot y + (3912 - b) \cdot x + 235 \cdot z > 0$ {3} alors la fertilisation entraîne un gain d'argent pour le paysan.
 - o Si $a < 935$ Ar/kg, {2} $\Leftrightarrow y > ((b - 3912) \cdot x - 235 \cdot z) / (935 - a)$
 - o Si $a > 935$ Ar/kg, {2} $\Leftrightarrow y < ((b - 3912) \cdot x - 235 \cdot z) / (935 - a)$

Calcul du retour sur investissement

Si $RI < 1,5$, le retour sur investissement est faible donc le risque est élevé. Il n'est pas conseillé de fertiliser.

En revanche si $RI > 1,5$, le retour sur investissement est correct et il devient intéressant d'utiliser une fertilisation sur les cultures.

$RI = MB/CO = ((935 - a) \cdot y + (3912 - b) \cdot x + 235 \cdot z + 106705) / (119607 + a \cdot y + b \cdot x + 20 \cdot z)$

$RI > 1,5 \Leftrightarrow \begin{cases} \text{si } a < 374 \text{ Ar/kg, } y > (72705 + (2,5b - 3912) \cdot x - 205 \cdot z) / (935 - 2,5a) \\ \text{si } a > 374 \text{ Ar/kg, } y < (72705 + (2,5b - 3912) \cdot x - 205 \cdot z) / (935 - 2,5a) \end{cases}$

Conclusion pour la culture de maïs+niébé

- Si $a < 374$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :
$$\begin{cases} y > ((b - 3912)*x - 235*z)/(935 - a) \\ y > (72705 + (2,5b - 3912)*x - 205*z)/(935 - 2,5a) \end{cases}$$
- Si 374 Ar/kg $< a < 935$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :
$$\begin{cases} y > ((b - 3912)*x - 235*z)/(935 - a) \\ y < (72705 + (2,5b - 3912)*x - 205*z)/(935 - 2,5a) \end{cases}$$
- Si $a > 935$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :
$$\begin{cases} y < ((b - 3912)*x - 235*z)/(935 - a) \\ y < (72705 + (2,5b - 3912)*x - 205*z)/(935 - 2,5a) \end{cases}$$

Rappel : a =prix d'un kg de NPK, b =prix d'un kg d'urée et z =quantité de fumure organique apportée à la culture.

Exemple

On fixe $z = 2000$ kg

Pour l'année 2008, $a = 1500$ Ar/kg > 935 Ar/kg et $b = 1300$ Ar/kg

Le gain est positif si $y < ((1300 - 3912)*x - 235*2000)/(935 - 1500)$

$$\Leftrightarrow y < (-2612*x - 470000)/(-565)$$

$$\Leftrightarrow y < 4,6*x + 831,8.$$

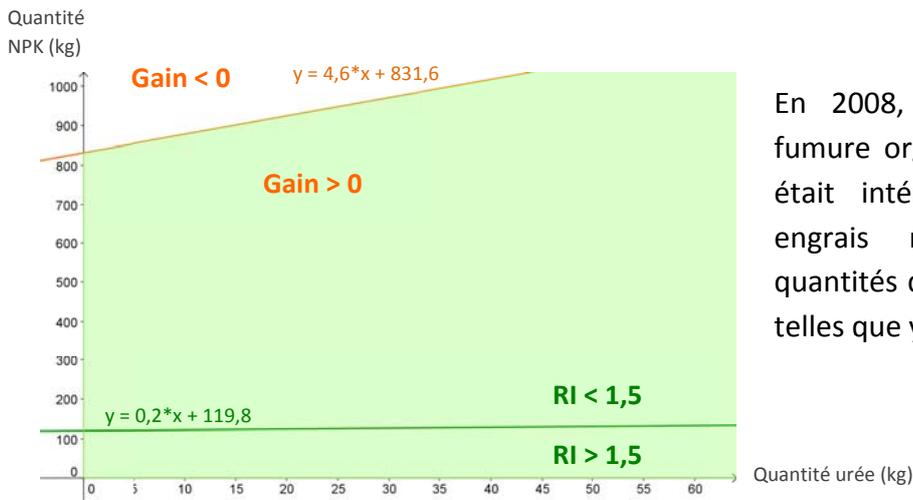
$RI > 1,5 \Leftrightarrow y < (72705 + (2,5*1300 - 3912)*x - 205*2000)/(935 - 2,5*1500)$

$$\Leftrightarrow y < (72705 - 662*x - 410000)/(-2815)$$

$$\Leftrightarrow y < (337295 + 662*x)/2815$$

$$\Leftrightarrow y < 119,8 + 0,2*x$$

Conclusion exemple :



En 2008, pour un apport de fumure organique de 2000 kg, il était intéressant d'utiliser des engrais minéraux pour des quantités de NPK (y) et d'urée (x) telles que $y < 0,2 \cdot x + 119,8$.

Figure 11 : Détermination visuelle des couples (prix urée, prix NPK) pour lesquels le gain > 0 et RI > 1,5

Culture de maïs en semis direct, sur baibohos de la zone VSE

Pour la culture de maïs en semis direct on dispose de 14 données réelles. Pour l'ensemble des données, il n'y a pas de corrélation linéaire entre le rendement et la fertilisation azotée. En revanche, en séparant les données par type d'associations de cultures, on peut déterminer des relations linéaires pour les associations de cultures maïs+dolique et maïs+vigna.

L'association de culture maïs + dolique

A partir des données réelles et après avoir éliminé les valeurs aberrantes, le nuage de points suivant est obtenu :

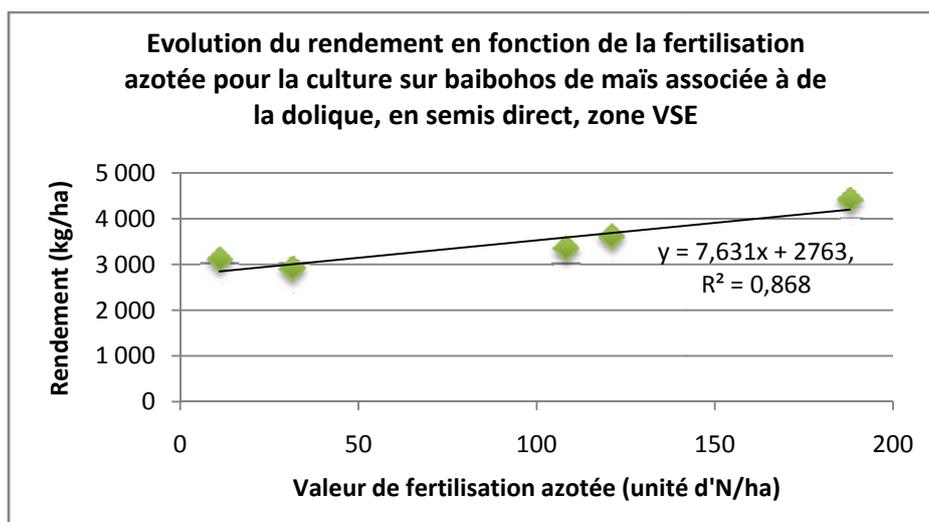


Figure 12 : Nuage de points du rendement en fonction de la fertilisation azotée pour la culture de maïs associée à de la dolique, en semis direct, sur baibohos de la zone VSE

Régression linéaire

Le coefficient de régression linéaire étant de 0,86, on peut accepter la relation linéaire entre le rendement et la fertilisation azotée : Rendement = $7,63 \cdot N + 2763,5$. On considèrera que ce modèle est uniquement applicable pour des valeurs de fertilisation azotée comprises entre 0 et 188 unités d'azote/ha. Ainsi, on peut considérer que sans fertilisation azotée, le rendement obtenu pour une culture de maïs en semis direct associée à de la dolique est de 2763 kg/ha. De plus, pour une unité d'azote ajoutée, on obtient 7,6 kg de produit supplémentaire.

Résultats des calculs du seuil de rentabilité

$$PB = 336 \cdot y + 1404 \cdot x + 92 \cdot z + 1105200$$

$$CO = 169127 + a \cdot y + b \cdot x + 20 \cdot z$$

$$MB = (336 - a) \cdot y + (1404 - b) \cdot x + 72 \cdot z + 936073$$

936 073 Ar correspond à la marge brute réalisée pour une culture sans engrais.

Conclusion :

- Si $a < 336$ Ar/kg, alors le gain est positif si $y > ((b - 1404) \cdot x - 72 \cdot z) / (336 - a)$
- Si $a > 336$ Ar/kg, alors le gain est positif si $y < ((b - 1404) \cdot x - 72 \cdot z) / (336 - a)$

Résultats des calculs du retour sur investissement

$$RI = MB/CO = ((336 - a) \cdot y + (1404 - b) \cdot x + 72 \cdot z + 936073) / (169127 + a \cdot y + b \cdot x + 20 \cdot z)$$

- Si $a < 134,4$ Ar/kg, alors $RI > 1,5$ si $y > (-682\,382 + (2,5b - 1404) \cdot x - 42 \cdot z) / (336 - 2,5a)$
- Si $a > 134,4$ Ar/kg, alors $RI > 1,5$ si $y < (-682\,382 + (2,5b - 1404) \cdot x - 42 \cdot z) / (336 - 2,5a)$

Conclusion pour la culture de maïs+dolique, en semis direct, sur baibohos de la zone VSE

- Si $a < 134,4$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :
$$\begin{cases} y > ((b - 1404) \cdot x - 72 \cdot z) / (336 - a) \\ y > (-682\,382 + (2,5b - 1404) \cdot x - 42 \cdot z) / (336 - 2,5a) \end{cases}$$
- Si $134,4$ Ar/kg $< a < 336$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :
$$\begin{cases} y > ((b - 1404) \cdot x - 72 \cdot z) / (336 - a) \\ y < (-682\,382 + (2,5b - 1404) \cdot x - 42 \cdot z) / (336 - 2,5a) \end{cases}$$
- Si $a > 336$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :
$$\begin{cases} y < ((b - 1404) \cdot x - 72 \cdot z) / (336 - a) \\ y < (-682\,382 + (2,5b - 1404) \cdot x - 42 \cdot z) / (336 - 2,5a) \end{cases}$$

Rappel : a=prix d'un kg de NPK, b=prix d'un kg d'urée et z=quantité de fumure organique apportée à la culture.

L'association de culture maïs + vigna

A partir des données réelles et après avoir éliminé les valeurs aberrantes, le nuage de points suivant est obtenu :

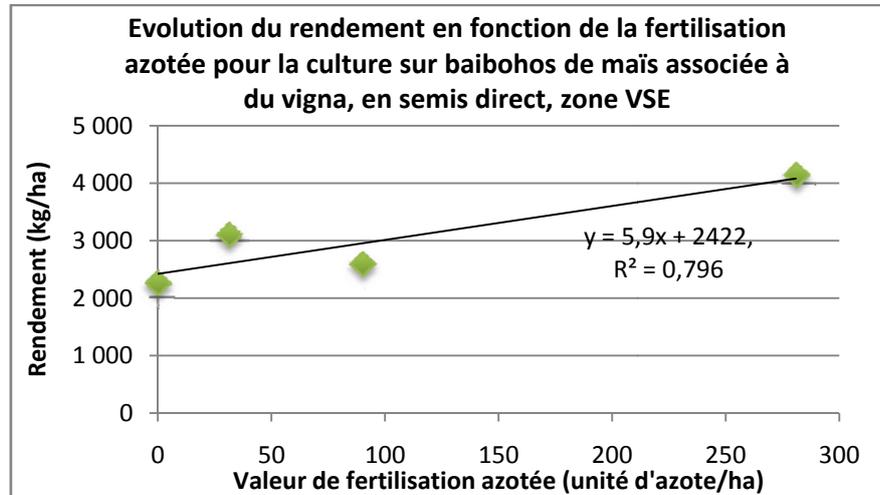


Figure 13 : Nuage de points du rendement en fonction de la fertilisation azotée pour la culture de maïs associée à du vigna, en semis direct, sur baibohos de la zone VSE

Régression linéaire

Le coefficient de régression linéaire étant de 0,79, on peut accepter la relation linéaire entre le rendement et la fertilisation azotée : Rendement = $5,9 \cdot N + 2422$. On considèrera que ce modèle est uniquement applicable pour des valeurs de fertilisation azotée comprises entre 0 et 281 unités d'azote/ha. Ainsi, on peut considérer que sans fertilisation azotée, le rendement obtenu pour une culture de maïs en semis direct associée à de la dolique est de 2422 kg/ha. De plus, pour une unité d'azote ajoutée, on obtient 5,9 kg de produit supplémentaire. Cependant, le nombre de données étant faible, il faudra rester critique face aux résultats obtenus.

Résultats des calculs du seuil de rentabilité

$$PB = 254 \cdot y + 1061 \cdot x + 69 \cdot z + 968800$$

$$CO = 135280 + a \cdot y + b \cdot x + 20 \cdot z$$

$$MB = (254 - a) \cdot y + (1061 - b) \cdot x + 69 \cdot z + 833520$$

- Si $a < 254$ Ar/kg, alors le gain est positif si $y > ((b - 1061) \cdot x - 49 \cdot z) / (254 - a)$
- Si $a > 254$ Ar/kg, alors le gain est positif si $y < ((b - 1061) \cdot x - 49 \cdot z) / (254 - a)$

Résultats des calculs du retour sur investissement

$$RI = MB/CO = ((254 - a) \cdot y + (1061 - b) \cdot x + 49 \cdot z + 833520) / (135280 + a \cdot y + b \cdot x + 20 \cdot z)$$

- Si $a < 101,6$ Ar/kg, alors $RI > 1,5$ si $y > (-630\,600 + (2,5b - 1061) \cdot x - 19 \cdot z) / (254 - 2,5a)$
- Si $a > 101,6$ Ar/kg, alors $RI > 1,5$ si $y < (-630\,600 + (2,5b - 1061) \cdot x - 19 \cdot z) / (254 - 2,5a)$

Conclusion pour la culture de maïs+vigna, en semis direct, sur baibohos de la zone VSE

- Si $a < 101,6$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :

$$\begin{cases} y > ((b - 1061)*x - 49*z)/(254 - a) \\ y > (-630\ 6000 + (2,5b - 1061)*x - 19*z)/(254 - 2,5a) \end{cases}$$

- Si $101,6$ Ar/kg $< a < 254$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :

$$\begin{cases} y > ((b - 1061)*x - 49*z)/(254 - a) \\ y < (-630\ 600 + (2,5b - 1061)*x - 19*z)/(254 - 2,5a) \end{cases}$$

- Si $a > 254$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :

$$\begin{cases} y < ((b - 1061)*x - 49*z)/(254 - a) \\ y < (-630\ 600 + (2,5b - 1061)*x - 19*z)/(254 - 2,5a) \end{cases}$$

Rappel : a=prix d'un kg de NPK, b=prix d'un kg d'urée et z=quantité de fumure organique apportée à la culture.

Culture de riz sur baibohos de la zone VSE

Culture de riz en labour, sur baibohos de la zone VSE

Dans la zone VSE, sur les baibohos, on dispose de 269 données réelles pour le riz en labour. Sur l'ensemble des données, on n'obtient pas de relation linéaire entre le rendement et la valeur de fertilisation azotée. En séparant les données par type de variété du riz, on peut déterminer une corrélation linéaire entre le rendement et la valeur de fertilisation azotée pour le riz de variété B22.

Culture de riz variété B22

Après avoir éliminé les valeurs aberrantes, le nuage de points suivant est obtenu :

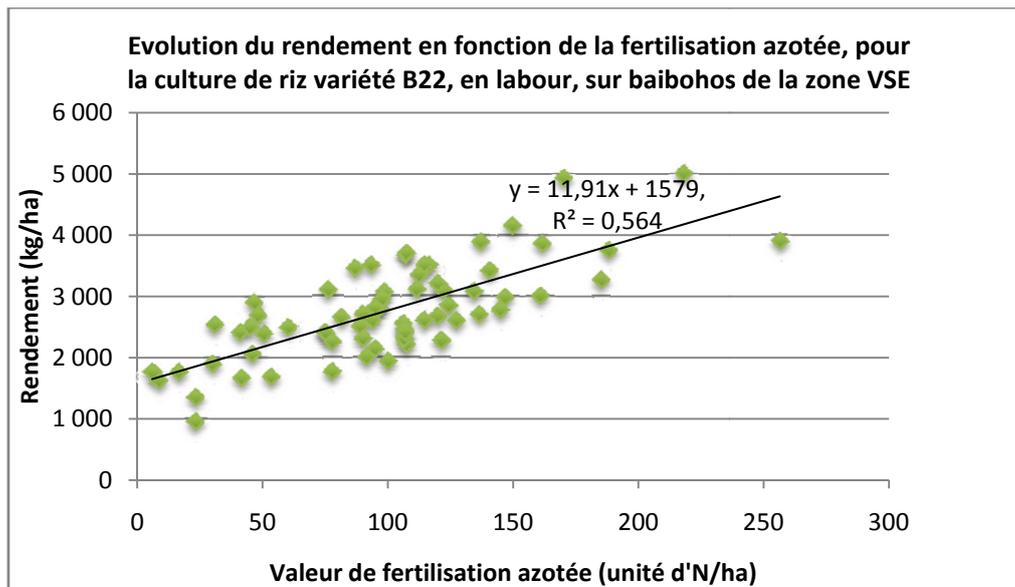


Figure 14 : Nuage de points du rendement en fonction de la fertilisation azotée pour la culture de riz variété B22, en labour, sur baibohos de la zone VSE

Régression linéaire

Le coefficient de régression linéaire étant de 0,56, on décide d'accepter la relation linéaire entre le rendement et la fertilisation azotée : Rendement = 11,9*N + 1579

On considèrera que ce modèle est uniquement applicable pour des valeurs de fertilisation azotée comprises entre 0 et 257 unités d'azote/ha.

Le coefficient de régression linéaire étant assez éloigné de 1, il faudra utiliser les résultats avec parcimonie.

Résultats des calculs du seuil de rentabilité

$$PB = 6545*N + 868\ 450 = 720*y + 3010*x + 196*z + 868\ 450$$

$$CO = 92\ 426 + a*y + b*x + 20*z$$

$$MB = (720 - a)*y + (3010 - b)*x + 176*z + 776\ 024$$

- Si $a < 720$ Ar/kg, alors le gain est positif si $y > ((b - 3010)*x - 176*z)/(720 - a)$
- Si $a > 720$ Ar/kg, alors le gain est positif si $y < ((b - 3010)*x - 176*z)/(720 - a)$

Résultats des calculs du retour sur investissement

$$RI = MB/CO = ((720 - a)*y + (3010 - b)*x + 176*z + 776\ 024)/(92\ 426 + a*y + b*x + 20*z)$$

- Si $a < 288$ Ar/kg, alors $RI > 1,5$ si $y > (-637\ 385 + (2,5b - 3010)*x - 146*z)/(720 - 2,5a)$
- Si $a > 288$ Ar/kg, alors $RI > 1,5$ si $y < (-637\ 385 + (2,5b - 3010)*x - 146*z)/(720 - 2,5a)$

Conclusion pour la culture de riz variété B22 en labour, sur baibohos de la zone VSE

- Si $a < 288$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :

$$\begin{cases} y > ((b - 3010)*x - 176*z)/(720 - a) \\ y > (-637\,385 + (2,5b - 3010)*x - 146*z)/(720 - 2,5a) \end{cases}$$
- Si $288 \text{ Ar/kg} < a < 720 \text{ Ar/kg}$, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :

$$\begin{cases} y > ((b - 3010)*x - 176*z)/(720 - a) \\ y < (-637\,385 + (2,5b - 3010)*x - 146*z)/(720 - 2,5a) \end{cases}$$
- Si $a > 720 \text{ Ar/kg}$, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :

$$\begin{cases} y < ((b - 3010)*x - 176*z)/(720 - a) \\ y < (-637\,385 + (2,5b - 3010)*x - 146*z)/(720 - 2,5a) \end{cases}$$

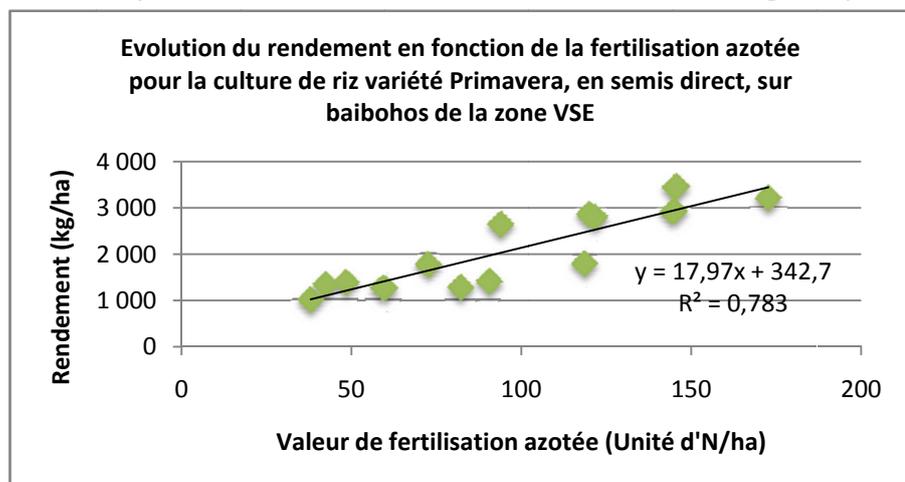
Rappel : a=prix d'un kg de NPK, b=prix d'un kg d'urée et z=quantité de fumure organique apportée à la culture.

Culture de riz en semis direct, sur baibohos de la zone VSE

Dans la zone VSE, sur les baibohos, on dispose de 320 données réelles pour le riz en en semis direct. Sur l'ensemble des données, on n'obtient pas de relation linéaire entre le rendement et la valeur de fertilisation azotée. En séparant les données par type de variété du riz, on peut déterminer une corrélation linéaire entre le rendement et la valeur de fertilisation azotée pour le riz de variété Primavera.

Culture de riz variété Primavera

A partir des données réelles et après avoir éliminé les valeurs aberrantes, le nuage de points suivant est obtenu :



Régression linéaire

Figure 13. Nuage de points du rendement en fonction de la fertilisation azotée pour la culture de riz variété Primavera, en semis direct, sur baibohos de la zone VSE

Le coefficient de régression linéaire étant de 0,78, on peut accepter la relation linéaire entre le rendement et la fertilisation azotée : $\text{Rendement} = 18 * N + 343$
 Sans fertilisation azotée, le rendement théorique obtenu d'après ce modèle est de 343 kg/ha. Or dans la réalité, les rendements obtenus sont bien supérieurs.
 Ainsi nous n'accepterons pas ce modèle.

Culture de maïs sur tanety de la zone ZNE

Culture de maïs en labour sur tanety de la zone ZNE

Pour la culture de maïs en labour on dispose de 149 données réelles. Pour l'ensemble des données, il n'y pas de corrélation linéaire entre le rendement et la fertilisation azotée. En revanche, en séparant les données par type d'associations de cultures, on peut déterminer une relation linéaire pour l'association de cultures maïs+niébé.

Association de culture maïs+niébé

A partir des données réelles et après avoir éliminé les valeurs aberrantes, le nuage de points suivant est obtenu :

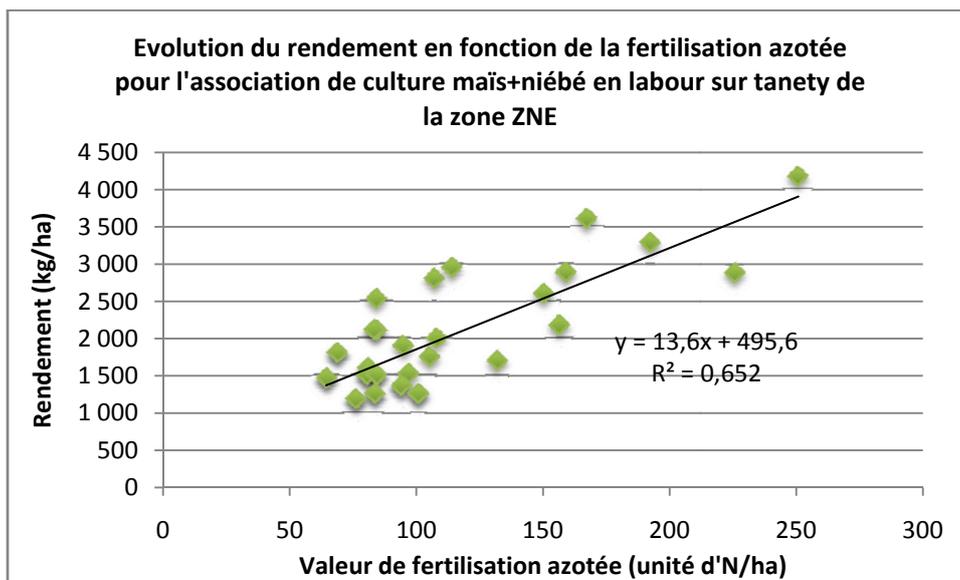


Figure 16 : Nuage de points du rendement en fonction de la fertilisation azotée pour la culture de maïs associée à du niébé, en labour, sur tanety de la zone ZNE

Régression linéaire

Le coefficient de régression linéaire étant de 0,65, on peut accepter la relation linéaire entre le rendement et la fertilisation azotée : $\text{Rendement} = 13,6 * N + 495$
 On considèrera que ce modèle est uniquement applicable pour des valeurs de fertilisation azotée comprises entre 0 et 251 unités d'azote/ha.

Résultats des calculs du seuil de rentabilité

$$PB = 5440 * N + 198\,400 = 598 * y + 2502 * x + 163 * z + 198\,400$$

$$CO = 114\,706 + a * y + b * x + 20 * z$$

$$MB = (598 - a) * y + (2502 - b) * x + 143 * z + 83\,694$$

- Si $a < 598$ Ar/kg, alors le gain est positif si $y > ((b - 2502) * x - 143 * z) / (598 - a)$
- Si $a > 598$ Ar/kg, alors le gain est positif si $y < ((b - 2502) * x - 143 * z) / (598 - a)$

Résultats des calculs du retour sur investissement

$$RI = MB/CO = ((598 - a) * y + (2502 - b) * x + 143 * z + 83\,694) / (114\,706 + a * y + b * x + 20 * z)$$

- Si $a < 239$ Ar/kg, alors $RI > 1,5$ si $y > (88\,365 + (2,5b - 2502) * x - 113 * z) / (598 - 2,5a)$
- Si $a > 239$ Ar/kg, alors $RI > 1,5$ si $y < (88\,365 + (2,5b - 2502) * x - 113 * z) / (598 - 2,5a)$

Conclusion pour l'association de culture maïs+niébé en labour, sur tanety de la zone ZNE

- Si $a < 239$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :

$$\begin{cases} y > ((b - 2502) * x - 143 * z) / (598 - a) \\ y > (88\,365 + (2,5b - 2502) * x - 113 * z) / (598 - 2,5a) \end{cases}$$

- Si $239 \text{ Ar/kg} < a < 598 \text{ Ar/kg}$, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :

$$\begin{cases} y > ((b - 2502) * x - 143 * z) / (598 - a) \\ y < (88\,365 + (2,5b - 2502) * x - 113 * z) / (598 - 2,5a) \end{cases}$$

- Si $a > 598$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :

$$\begin{cases} y < ((b - 2502) * x - 143 * z) / (598 - a) \\ y < (88\,365 + (2,5b - 2502) * x - 113 * z) / (598 - 2,5a) \end{cases}$$

Rappel : y=quantité de NPK, x=quantité d'urée, z=quantité de fumure organique, a=prix d'un kg de NPK et b=prix d'un kg d'urée.

Culture de maïs en semis direct, sur tanety de la zone ZNE

Pour la culture de maïs en semis direct on dispose de 90 données réelles. Pour l'ensemble des données, il n'y a pas de corrélation linéaire entre le rendement et la fertilisation azotée. En revanche, en séparant les données par type d'associations de cultures, on peut déterminer une relation linéaire pour l'association de cultures maïs+vigna.

Association de culture maïs+Vigna

A partir des données réelles et après avoir éliminé les valeurs aberrantes, le nuage de points suivant est obtenu :

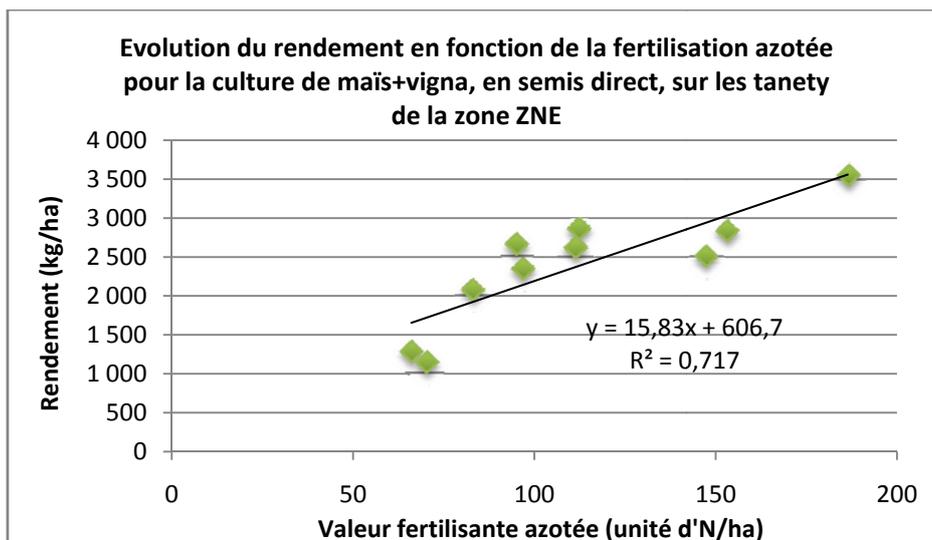


Figure 17 : Nuage de points du rendement en fonction de la fertilisation azotée pour la culture de maïs associée à du vigna, en semis direct, sur tanety de la zone ZNE

Régression linéaire

Le coefficient de régression linéaire étant de 0,71, on peut accepter la relation linéaire entre le rendement et la fertilisation azotée : Rendement = 15,8*N + 607

On considèrera que ce modèle est uniquement applicable pour des valeurs de fertilisation azotée comprises entre 0 et 186 unités d'azote/ha.

Résultats des calculs du seuil de rentabilité

$$PB = 6320*N + 242\ 800 = 695*y + 2907*x + 190*z + 242\ 800$$

$$CO = 99\ 215 + a*y + b*x + 20*z$$

$$MB = (695 - a)*y + (2907 - b)*x + 170*z + 143\ 585$$

- Si $a < 695$ Ar/kg, alors le gain est positif si $y > ((b - 2907)*x - 170*z)/(695 - a)$
- Si $a > 695$ Ar/kg, alors le gain est positif si $y < ((b - 2907)*x - 170*z)/(695 - a)$

Résultats des calculs du retour sur investissement

$$RI = MB/CO = ((695 - a)*y + (2907 - b)*x + 170*z + 143\ 585)/(99\ 215 + a*y + b*x + 20*z)$$

- Si $a < 278$ Ar/kg, alors $RI > 1,5$ si $y > (5\ 238 + (2,5b - 2907)*x - 140*z)/(695 - 2,5a)$
- Si $a > 278$ Ar/kg, alors $RI > 1,5$ si $y < (5\ 238 + (2,5b - 2907)*x - 140*z)/(695 - 2,5a)$

Conclusion pour l'association de culture de maïs+vigna en semis direct, sur tanety de la zone ZNE

- Si $a < 278$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :

$$\begin{cases} y > ((b - 2907)*x - 170*z)/(695 - a) \\ y > (5\ 238 + (2,5b - 2907)*x - 140*z)/(695 - 2,5a) \end{cases}$$
- Si 278 Ar/kg $< a < 695$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :

$$\begin{cases} y > ((b - 2907)*x - 170*z)/(695 - a) \\ y < (5\,238 + (2,5b - 2907)*x - 140*z)/(695 - 2,5a) \end{cases}$$

- Si $a > 695$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :

$$\begin{cases} y < ((b - 2907)*x - 170*z)/(695 - a) \\ y < (5\,238 + (2,5b - 2907)*x - 140*z)/(695 - 2,5a) \end{cases}$$

Rappel : y=quantité de NPK, x=quantité d'urée, z=quantité de fumure organique, a=prix d'un kg de NPK et b=prix d'un kg d'urée.

Culture de riz sur tanety de la zone ZNE

Culture de riz sur labour, sur tanety de la zone ZNE

Pour la culture de riz sur labour on dispose de 152 données réelles pour les tanety de la zone ZNE. Pour l'ensemble des données, il n'y pas de corrélation linéaire entre le rendement et la fertilisation azotée. En revanche, en séparant les données par type de variété du riz, on peut déterminer une relation linéaire pour le riz de variété B22.

Culture de riz variété B22

A partir des données réelles et après avoir éliminé les valeurs aberrantes, le nuage de points suivant est obtenu :

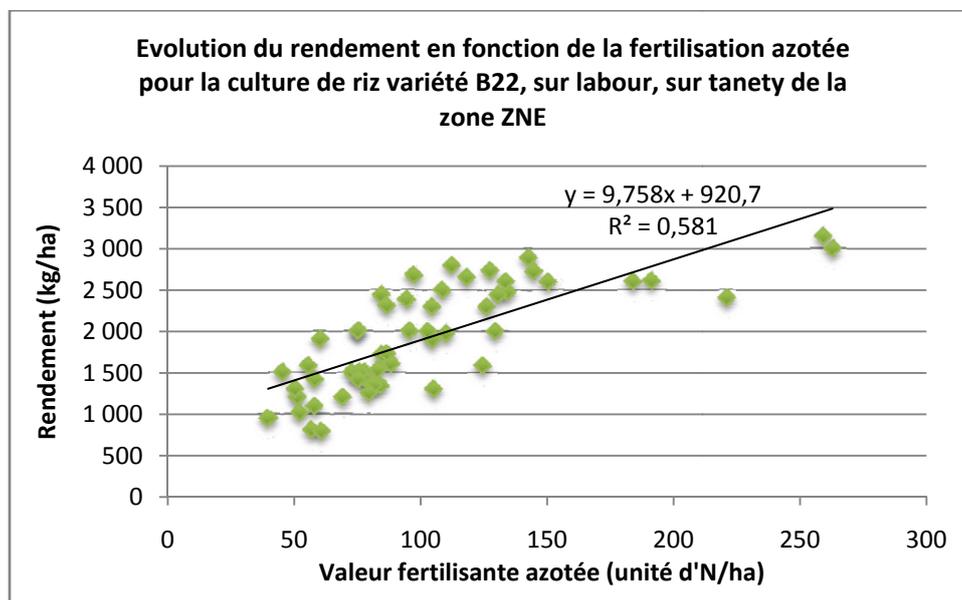


Figure 18 : Nuage de points du rendement en fonction de la fertilisation azotée pour la culture de riz variété B22, en labour, sur tanety de la zone ZNE

Régression linéaire

Le coefficient de régression linéaire étant de 0,58, on peut accepter la relation linéaire entre le rendement et la fertilisation azotée : Rendement = $9,7*N + 920$ On considèrera que ce modèle est uniquement applicable pour des valeurs de fertilisation azotée comprises entre 0 et 263 unités d'azote/ha.

Résultats des calculs du seuil de rentabilité

$$PB = 5335*N + 506\ 550 = 587*y + 2454*x + 160*z + 506\ 550$$

$$CO = 149\ 534 + a*y + b*x + 20*z$$

$$MB = (587 - a)*y + (2454 - b)*x + 140*z + 506\ 550$$

- Si $a < 587$ Ar/kg, alors le gain est positif si $y > ((b - 2454)*x - 140*z)/(587 - a)$
- Si $a > 587$ Ar/kg, alors le gain est positif si $y < ((b - 2454)*x - 140*z)/(587 - a)$

Résultats des calculs du retour sur investissement

$$RI = MB/CO = ((587 - a)*y + (2454 - b)*x + 140*z + 506\ 550)/(149\ 534 + a*y + b*x + 20*z)$$

- Si $a < 235$ Ar/kg, alors $RI > 1,5$ si $y > (-282\ 249 + (2,5b - 2454)*x - 110*z)/(587 - 2,5a)$
- Si $a > 235$ Ar/kg, alors $RI > 1,5$ si $y < (-282\ 249 + (2,5b - 2454)*x - 110*z)/(587 - 2,5a)$

Conclusion pour la culture de riz variété B22 en labour, sur tanety de la zone ZNE

- Si $a < 235$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :
$$\begin{cases} y > ((b - 2454)*x - 140*z)/(587 - a) \\ y > (-282\ 249 + (2,5b - 2454)*x - 110*z)/(587 - 2,5a) \end{cases}$$
- Si 235 Ar/kg $< a < 587$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :
$$\begin{cases} y > ((b - 2454)*x - 140*z)/(587 - a) \\ y < (-282\ 249 + (2,5b - 2454)*x - 110*z)/(587 - 2,5a) \end{cases}$$
- Si $a > 587$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :
$$\begin{cases} y < ((b - 2454)*x - 140*z)/(587 - a) \\ y < (-282\ 249 + (2,5b - 2454)*x - 110*z)/(587 - 2,5a) \end{cases}$$

Rappel : y=quantité de NPK, x=quantité d'urée, z=quantité de fumure organique, a=prix d'un kg de NPK et b=prix d'un kg d'urée.

Culture de riz en semis direct, sur tanety de la zone ZNE

Pour la culture de riz en semis direct on dispose de 63 données réelles pour les tanety de la zone ZNE. Pour l'ensemble des données, il n'y a pas de corrélation linéaire entre le rendement et la fertilisation azotée. En revanche, en séparant les données par type de variété du riz, on peut déterminer une relation linéaire pour le riz de variété B22.

Culture de riz variété B22

A partir des données réelles et après avoir retiré les points aberrants, le graphique suivant est obtenu :

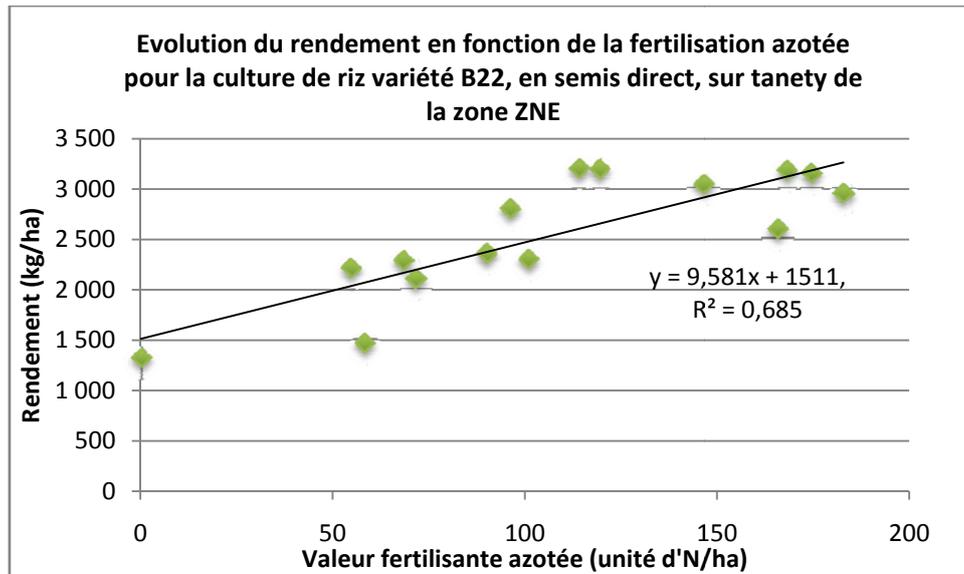


Figure 19 : Nuage de points du rendement en fonction de la fertilisation azotée pour la culture de riz variété B22, en semis direct, sur tanety de la zone ZNE

Régression linéaire

Le coefficient de régression linéaire étant de 0,68, on peut accepter la relation linéaire entre le rendement et la fertilisation azotée : Rendement = 9,5*N + 1512

On considèrera que ce modèle est uniquement applicable pour des valeurs de fertilisation azotée comprises entre 0 et 183 unités d'azote/ha.

Résultats des calculs du seuil de rentabilité

$$PB = 575*y + 2404*x + 157*z + 831600$$

$$CO = 129412 + a*y + b*x + 20*z$$

$$MB = (575 - a)*y + (2404 - b)*x + 137*z + 702188$$

- Si $a < 575$ Ar/kg, alors le gain est positif si $y > ((b - 2404)*x - 137*z)/(575 - a)$
- Si $a > 575$ Ar/kg, alors le gain est positif si $y < ((b - 2404)*x - 137*z)/(575 - a)$

Résultats des calculs du retour sur investissement

$$RI = MB/CO = ((575 - a)*y + (2404 - b)*x + 137*z + 702188)/((129412 + a*y + b*x + 20*z))$$

- Si $a < 230$ Ar/kg, alors $RI > 1,5$ si $y > (-508070 + (2,5b - 2404)*x - 107*z)/(575 - 2,5a)$
- Si $a > 230$ Ar/kg, alors $RI > 1,5$ si $y < (-508070 + (2,5b - 2404)*x - 107*z)/(575 - 2,5a)$

Conclusion pour la culture riz variété B22 CM sur tanety de la zone ZNE

- Si $a < 230$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :

$$\begin{cases} y > ((b - 2404)*x - 137*z)/(575 - a) \\ y > (-572776 + (2,5b - 2404)*x - 107*z)/(575 - 2,5a) \end{cases}$$
- Si 230 Ar/kg $< a < 575$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :

$$\begin{cases} y > ((b - 2404)*x - 137*z)/(575 - a) \\ y < (-572776 + (2,5b - 2404)*x - 107*z)/(575 - 2,5a) \end{cases}$$

- Si $a > 935$ Ar/kg, alors les quantités de NPK (y) et d'urée (x) pour lesquelles il est intéressant d'utiliser une fertilisation minérale, répondent au système d'inéquations :

$$\begin{cases} y < ((b - 2404)*x - 137*z)/(575 - a) \\ y < (-572776 + (2,5b - 2404)*x - 107*z)/(575 - 2,5a) \end{cases}$$

Rappel : y=quantité de NPK, x=quantité d'urée, z=quantité de fumure organique, a=prix d'un kg de NPK et b=prix d'un kg d'urée.

Conclusion

Cette étude a permis de déterminer des seuils d'utilisation des engrais minéraux pour plusieurs cultures et itinéraires techniques précis. Ces seuils sont intéressants car ils prennent en compte à la fois la rentabilité permise par l'utilisation d'engrais minéraux, mais également le risque financier engendré par celle-ci. Néanmoins, il faudra rester critique face à ces résultats car :

- La variabilité climatologique n'a pas été prise en compte. En effet, les calculs des seuils ont été réalisés à partir des données de 2008 pour les données du RFR, et à partir des données de 2009 pour celles de Tafa. Réaliser le même travail sur plusieurs années et confronter les résultats, aurait permis de contourner cette difficulté.
- La variabilité des prix de vente n'a pas été intégrée aux calculs. Pour les données de Tafa, le prix de vente du maïs utilisé est 350 Ar/kg et celui du riz est 480 Ar/kg. Pour les données du RFR, le prix de vente du maïs 400 Ar/kg et celui du riz est 550 Ar/kg.

De plus, comme nous l'avons fait remarquer à plusieurs reprises dans le rapport, il y a une très grande variabilité des rendements et de la fertilisation. Ceci est dû au fait que la fertilité des sols est un paramètre qui n'a pas été pris en compte lors de la récolte des données et ceci constitue la plus grande faiblesse de notre travail. En effet, nous avons basés nos calculs sur l'hypothèse que les sols possédaient tous la même fertilité et ainsi que les différences de rendements constatées étaient dues à l'apport d'engrais minéraux. En réalité, on ne peut pas être certain qu'une augmentation de la fertilisation minérale est la seule source explicative de l'augmentation du rendement par comparaison des données. Nous avons d'ailleurs donné des exemples illustrant cette remarque : dans les résultats des données standards, pour un même itinéraire technique et une même fertilisation on a constaté des rendements très différents ; dans les résultats des données réelles, nous n'avons pas toujours réussi à corréler l'augmentation du rendement à l'augmentation de la fertilisation. De plus, nous avons constaté que souvent, en pratique, les paysans avaient pour stratégie d'apporter des engrais minéraux sur les parcelles peu fertiles afin d'obtenir des rendements similaires à ceux réalisés sur sols fertiles.

Néanmoins, notre travail reste une base intéressante pour apporter des conseils adaptés aux paysans. Les itinéraires techniques étant extrêmement variables d'une parcelle à une autre

et ce sera aux opérateurs d'ajuster les recommandations à chaque particulier rencontré sur le terrain.

Bibliographie

BASCOU P.D., (2010), *Analyse du fonctionnement des exploitations polyculture élevage à travers la mise en place d'une démarche d'accompagnement des producteurs*, Rapport de stage 3^{ème} année Sup-agro Montpellier, CIRAD, 138 p +annexes

CAUVY S., PENOT E., (2009), *Mise au point des scénarios en analyse prospective et des simulations sur les exploitations agricoles du réseau de fermes de référence*, Document de travail n°43, BV-Lac, 28p.

Cellule d'Appui au Programme pays du Fonds International pour le Développement Agricole à Madagascar (CAPFIDA). *Appui à la mise en place d'un système de production et de distribution d'intrants (engrais et produits phytosanitaires) dans les zones d'interventions de PARECAM*. Rapport d'état de lieu février 2011. 42 p.

Cellule d'Appui au Programme pays du Fonds International pour le Développement Agricole à Madagascar (CAPFIDA). *Rapport d'analyse régionale – Région Alaotra Mangoro*. 2006.

DEVEZE. J. (2008), « Evolutions des agricultures familiales du Lac Alaotra (Madagascar) », in *Défis agricoles africains*, Karthala, Paris

DURAND, C. ; NAVE.S, (2007). *Les paysans de l'Alaotra, entre rizières et tanety. Étude des dynamiques agraires et des stratégies paysannes dans un contexte de pression foncière, Lac Alaotra, Madagascar*, Rapport de stage ESAT 1, IRC, 123 p.

GARIN P., (1998), *Dynamiques agraires autour de grands périmètres irrigués : le cas du lac Alaotra à Madagascar*, Thèse, Université de Paris X Nanterre (Géographie), Cemagref, CIRAD, 374 p.

FABRE J., (2011). *Evaluation technico-économique des effets des systèmes de culture sous couverture végétale dans les exploitations agricoles du lac Alaotra, Madagascar*. Rapport de stage 3^{ème} année Sup-agro Montpellier, CIRAD, 102 p + annexes.

Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche (MAEP), mai 2006. *Stratégie nationale pour le développement de l'utilisation de l'engrais*. 48 p.

OUSTRY M., (2007), *Analyse des causes de non remboursement des crédits au lac Alaotra à Madagascar, quelles implications pour les groupements de crédits à caution solidaire, les institutions financières et le projet BV-Lac ?*, Mémoire diplôme d'ingénieur de spécialisation en agronomie tropicale, ESAT 2, IRC SupAgro, France, Montpellier, 146p.

PENOT E. (Janvier 2008). Document de travail BV Lac n°5, *Harmonisation des calculs économiques et correspondance avec le logiciel Olympe*.

TERRIER M., (2008), *Mise en place du réseau de fermes de références dans la zone d'intervention du projet BV/Lac, lac Aloatra, Madagascar. Méthodologie, conventions et règles d'utilisation*, Rapport de stage 3^{ème} année Sup-agro Montpellier, CIRAD, 90 p + annexes