



ANALYSE DE L'APPLICATION D'ENGRAIS PAR LE DIAGRAMME A TROIS QUADRANTS

N. van Duivenbooden

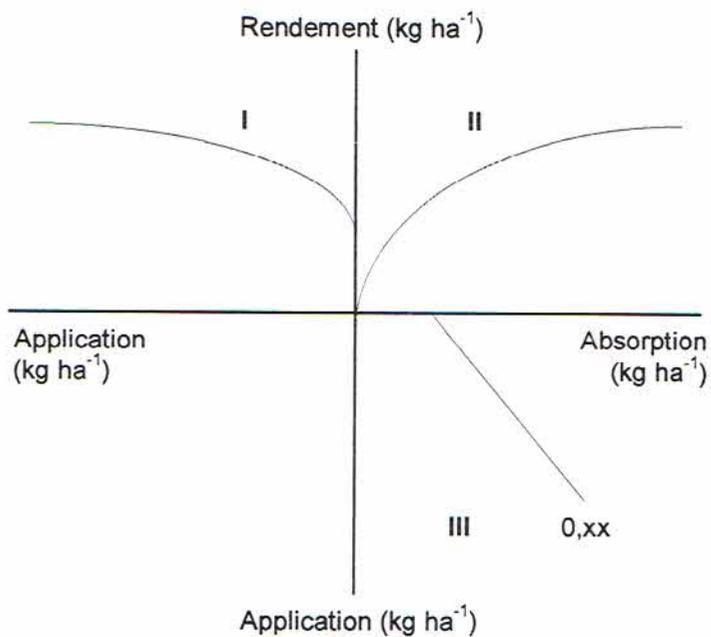


Table de matière

	Page
RÉSUMÉ	iii
1. INTRODUCTION	1
2. AMÉLIORATION PAR LA FERTILISATION	3
2.1 Action des engrais chimiques	3
2.2 Présentation des résultats: le diagramme à trois quadrants	4
2.3 Relation application - absorption	7
2.3.1 Généralités	7
2.3.2 Azote	9
2.3.3 Phosphore	13
2.4 Relation absorption - rendement	17
3. UTILISATION DU CONCEPT DANS LA PLANIFICATION DES EXPÉRIMENTATIONS ET LA GESTION DES RESSOURCES NATURELLES	20
3.1 Effet de la composition et de la quantité de fumure	20
3.2 Calcul des apports nécessaires pour une culture durable avec un bilan nutritif équilibré	21

	Page
4. EXERCICES	23
4.1 Exercice 1.	23
4.2 Exercice 2.	23
4.3 Exercice 3.	23
4.4 Exercice 4.	24
5. CONCLUSIONS	25
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	26
ANNEX 1. SOLUTIONS	28
Exercice 1.	28
Exercice 2.	28
Exercice 3.	28
Exercice 4.	29

Résumé

Ce document a pour objet de démontrer que les résultats des expériences d'applications d'engrais peuvent être interprétés de manière plus significative si les données d'absorption des éléments nutritifs, notamment l'azote et le phosphore, par les cultures sont disponibles. Il traite les relations de l'application-absorption et de l'absorption-rendement de l'azote et du phosphore. Les résultats de telles analyses nous permettent de nous prononcer sur les quantités d'éléments nutritifs disponibles de sources naturelles, de juger de l'efficacité des engrais chimiques et de déterminer si l'élément a été vraiment limitant pour la production primaire.

1. Introduction

Au Sahel, à la fin de la saison des cultures, on peut encore trouver jusqu'à 20% de l'eau des pluies dans le sol au niveau des racines des plantes alors que celles-ci n'ont utilisé que 10 à 20% de cette eau pour leur croissance. Ceci veut dire que ce n'est pas toujours le manque d'eau qui est à la base de la faible vitesse de croissance, et d'un éventuel arrêt de la croissance de la culture. Il apparaît qu'en améliorant la disponibilité en éléments nutritifs (notamment l'azote et le phosphore) par l'application d'engrais, la culture peut utiliser plus d'eau (jusqu'à 50% de l'eau des pluies) et la production pourrait quintupler avec les précipitations naturelles (Penning de Vries & Djitéye, 1982). Ce phénomène est illustré par la Figure 1, qui montre la relation entre les précipitations et la production sous conditions naturelles.

En outre, l'eau joue un double rôle. D'abord, sans eau il n'y a pas de disponibilité en éléments nutritifs (par son influence sur les processus de minéralisation et d'absorption même), et sans éléments nutritifs la culture meurt. Ensuite, le besoin en eau est fonction de la variété. Parfois, la vitesse de croissance de la culture semble être limitée par la disponibilité en eau, mais en réalité ceci dénote un mauvais choix de variété et/ou une carence en éléments nutritifs. En d'autres termes, il faut trouver le facteur le plus déterminant (l'eau ou les éléments nutritifs) dans le système de production. Les éléments nutritifs le plus souvent limitants dans les pays sahéliens sont l'azote (N) et le phosphore (P) (Penning de Vries & Djitéye, 1982; Bationo & Mokwunye, 1991).

Les éléments N et P sont essentiels pour les cellules actives; ils sont des constituants des acides nucléiques, N des enzymes et P des molécules qui transportent l'énergie pour les réactions enzymatiques. Les besoins des plantes en N et P dépendent de leur stade de développement. Il existe pour chaque stade de développement un taux maximal et un taux minimal (Penning de Vries & Djitéye, 1982). Lorsque ces taux sont faibles, la croissance est réduite; elle est de zéro lorsque les taux sont minimaux.

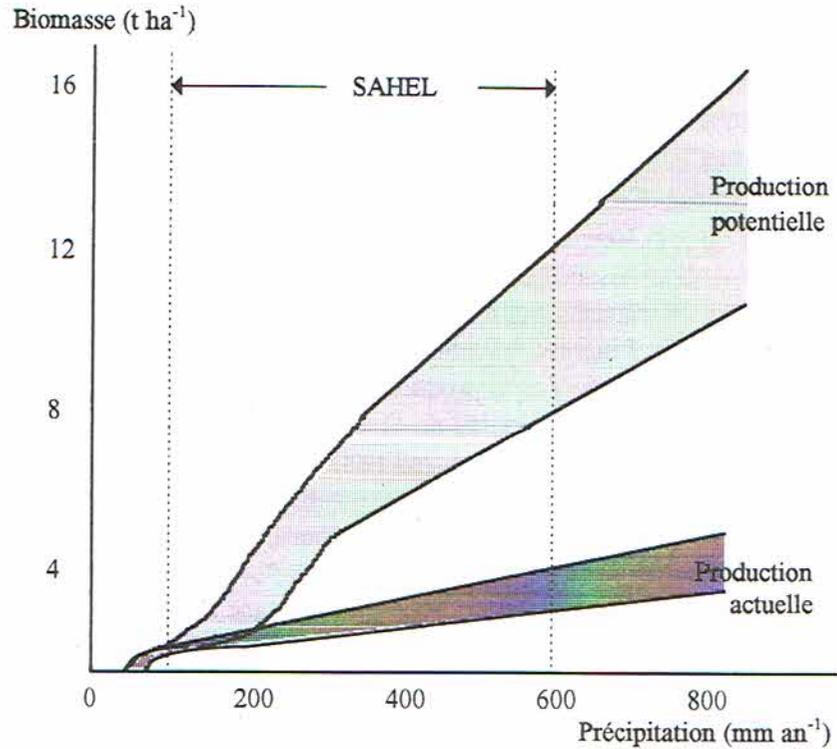


Figure 1. Production potentielle et production actuelle dans les pays sahé-
liens en fonction de la pluviométrie (Penning de Vries & Djitéye, 1982).

Les deux éléments sont étroitement liés; ils sont impliqués dans les mêmes processus au sein des cellules actives des plantes. Ceci signifie que le rapport P/N dans les plantes, est d'une importance capitale pour la croissance. Ce rapport est en moyenne de 0,12 pour le sorgho, 0,14 pour le mil et 0,15 pour le maïs (van Duivenbooden *et al.*, 1996).

L'objectif de ce document est d'expliquer l'importance des éléments nutritifs dans le système agricole, de présenter l'importance du suivi minéral ainsi qu'une méthode d'analyse des expériences d'applications d'engrais permettant une meilleure compréhension des résultats et contribuant à leur applicabilité.

2. Amélioration par la fertilisation

Les conditions nutritives des cultures peuvent être améliorées en appliquant des engrais chimiques et beaucoup d'expériences ont été menées pour déterminer la relation entre la quantité d'engrais appliquée et le rendement. Malheureusement les "courbes de réponse" obtenues ne sont pas identiques en années différentes, dans des environnements différents ou des traitements différents; ce qui rend difficile l'utilisation des résultats pour la prédiction et l'extrapolation.

2.1 Action des engrais chimiques

Pour contribuer à l'augmentation du rendement, l'élément appliqué sous forme d'engrais chimique doit en premier lieu être absorbé par la culture et en deuxième lieu être utilisé pour former les organes recherchés. Un manque de réponse à l'application d'engrais peut donc être la conséquence: de la non-absorption de l'élément par la culture, parce que l'engrais n'a pas été appliqué au bon moment, à l'endroit convenable ou sous la forme voulue; ou après absorption, de la non-utilisation pour augmenter la production des produits recherchés. Le phénomène peut être aussi dû à une carence en d'autres éléments nutritifs, à un manque d'eau, à une action des mauvaises herbes ou des maladies.

La présentation des résultats des expériences d'application d'engrais sous forme de courbes de réponse ne permet pas de distinguer entre les causes de l'absence de réponse. La valeur de telles expériences et leur utilité pour une prédiction et une extrapolation peut être considérablement améliorée, en déterminant la composition chimique du matériel récolté. Ceci permet de calculer la quantité absorbée de l'élément appliqué et sa répartition dans la culture.

2.2 Présentation des résultats: le diagramme à trois quadrants

Lorsque les résultats d'expériences d'application d'engrais (ou de matière organique) incluent la composition chimique du matériel récolté, en plus du rendement, l'interprétation est facilitée par une représentation graphique avec trois quadrants (Figure 2) comme suggéré par de Wit (1953), van Keulen (1977) et van Duivenbooden *et al.* (1996). Dans cette figure, les quantités d'engrais efficaces sont présentées en kg de N, P (et non en P_2O_5 ; $P = P_2O_5/2,29$) et K (et non en K_2O ; $K = K_2O/1,205$).

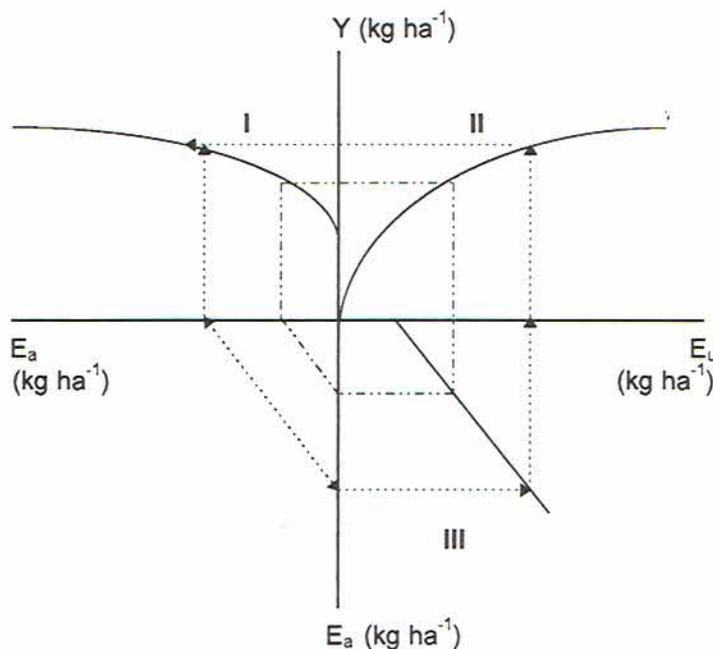


Figure 2. Relation entre l'apport d'engrais d'élément E (E_a) et le rendement en grains (Y , quadrant I), entre l'absorption d'engrais (E_u) et le rendement en grains (quadrant II), et entre l'apport d'engrais et son absorption par la culture (quadrant III).

- Le quadrant I montre la relation entre la quantité totale d'engrais appliquée (E_a) et le rendement économique (Y). C'est la figure "courbe de réponse" qui est généralement présentée dans la littérature. Il n'est pas traité séparément parce qu'il découle de la combinaison des deux autres relations.
- Le quadrant II montre la relation entre la quantité totale d'engrais absorbée par la culture (E_u) et le rendement économique (Y).
- Le quadrant III donne la relation entre la quantité d'élément appliquée (E_s) et son absorption par la culture (E_a ; voir sections 1.3 pour le N et 1.4 pour le P).

Van Duivenbooden (1992, 1996) a fait une revue de plusieurs expériences d'application d'engrais pour les principales cultures d'Afrique de l'Ouest en utilisant cette approche. La Figure 3 montre un exemple pour le mil.

Un logiciel récemment développé par Drenth (Université Agronomique de Wageningen, non publié) peut aider dans la construction et la présentation du diagramme à trois quadrants. Le logiciel, 3QD, écrit en EXCEL-5.0 sur Windows, est disponible sur demande au Centre Sahélien de l'ICRISAT.

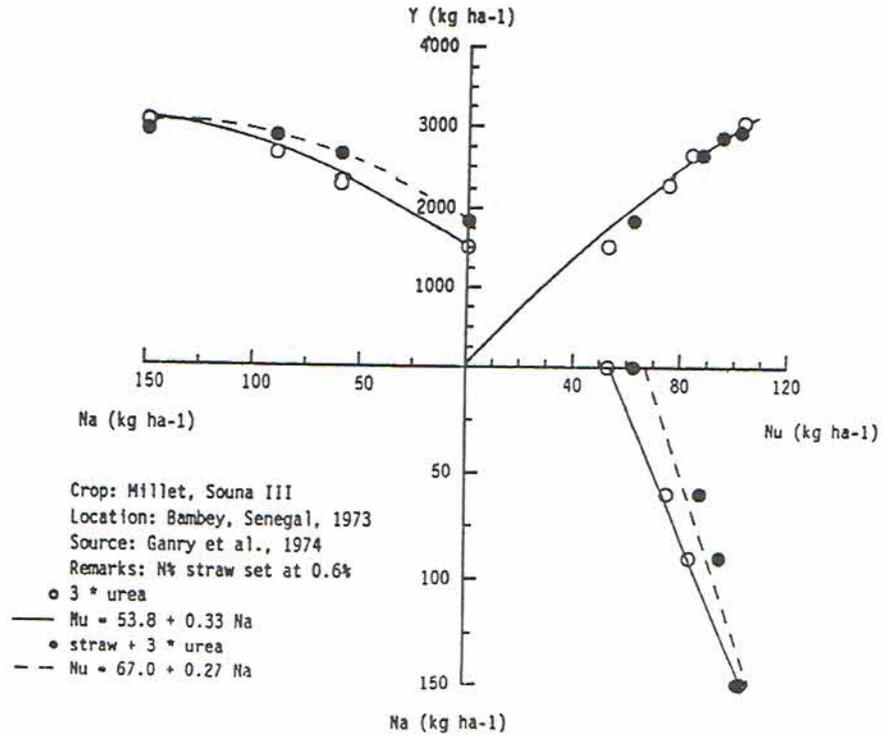


Figure 3. Relation entre l'absorption d'azote (Nu) et le rendement en grains (Y), entre l'apport d'azote (Na) et son absorption par le mil et l'apport d'engrais et le rendement en grains.

2.3 Relation application - absorption

2.3.1 Généralités

En général, la relation application - absorption peut être caractérisée par deux paramètres: le point d'intersection avec l'axe horizontal et la pente. Les valeurs des deux paramètres montrent des variations importantes. Le premier (l'intersection avec l'axe horizontal) représente la fertilité naturelle du sol, c'est-à-dire la quantité d'élément nutritif de sources naturelles, comme la matière organique du sol, les précipitations, etc. L'absorption sans application d'engrais dépend d'une part de la caractéristique du sol, déterminée par la quantité et la qualité de la matière organique. D'autre part, elle est fonction des conditions environnementales, notamment la température et l'humidité du sol qui déterminent la vitesse de la décomposition de la matière organique et la minéralisation ou immobilisation associée. En outre, la gestion joue un rôle à travers le niveau d'amélioration du sol, la rotation des cultures et l'application préalable d'engrais (l'ensemble de ces points constituant "l'historique du champ").

Pour mieux distinguer les différences entre l'engrais chimique et les apports organiques (fumier, paillage) comme source d'éléments nutritifs, les traitements sans et avec apport organique seront présentés séparément dans le diagramme à trois quadrants (Figure 3). La différence sur l'axe horizontal est donc l'effet de l'application organique.

Le deuxième paramètre (la pente) représente le taux de recouvrement apparente de l'engrais, c'est-à-dire le rapport entre la quantité absorbée par la plante et la dose appliquée. Le taux de recouvrement apparente de l'engrais (REC, 'Apparent Recovery Fraction' en anglais), est définie comme suit:

$$\text{REC} = (E_{ux} - E_{u0})/E_a \quad (\text{Eq. 1})$$

où,

E_{ux} = Absorption d'élément E à l'application de x kg d'engrais d'élément E [kg ha^{-1}];

E_{u0} = Absorption d'élément E sans application d'engrais, également appelée la fertilité naturelle du sol [kg ha^{-1}];

E_a = Quantité d'engrais appliquée, en terme d'élément E pure [kg ha^{-1}].

Cet indice montre les pertes par lessivage, volatilisation, et autres. La valeur dépend également du type d'engrais, de la méthode et du moment de l'application, et des conditions environnementales (van Keulen, 1982). L'application fractionnée d'engrais (surtout l'azote) a généralement pour effet une augmentation du recouvrement, puisque l'élément séjournant moins longtemps dans le sol, il y a moins de risques de pertes. Le Tableau 1 montre les valeurs moyens en Afrique de l'Ouest selon une revue de la littérature.

Tableau 1. Valeur moyen de taux de recouvrement des céréales (van Duivenbooden et al., 1996).

espèce	N	P	K
Mil	0,40	0,17	0,38
Sorgho	0,35	0,15	-
Maïs	0,36	0,12	0,34
Riz	0,39	0,12	0,34

2.3.2 Azote

La relation entre la quantité d'azote appliquée par engrais chimiques et l'absorption par la culture est une ligne droite pour toutes les doses appliquées. Une telle relation est représentative de la majorité des expériences d'application d'engrais azoté (van Keulen, 1977; van Keulen & van Heemst, 1981; van Duivenbooden, 1992, 1996). Une telle proportionnalité montre que les processus en jeu dans le sol où l'azote est appliquée sont de premier ordre, c'est-à-dire que leurs vitesses sont proportionnelles aux concentrations de N dans la solution du sol. Lorsque des quantités d'engrais extrêmement élevées sont appliquées, la capacité d'absorption et de synthèse de la végétation devient limitante, et la relation entre l'application et l'absorption présente une discontinuité (Figure 4). La Figure 4 montre également l'effet du type de sol. Un autre exemple est présenté en Figure 5 sur le riz au Sénégal. La Figure 6 montre l'effet de la variété sur l'absorption de l'azote.

Les exemples donnés montrent que la quantité d'azote de sources naturelles, disponible pour la culture pendant son cycle de croissance, peut varier fortement. Une prédiction de cette quantité demande une connaissance détaillée des caractéristiques du sol, notamment le taux et la qualité de la matière organique, les conditions environnementales (la pluviosité et la température) et les pratiques culturales dans chaque situation.

La fraction d'engrais azoté absorbée par la culture est influencée partiellement par les mêmes conditions que pour l'absorption de l'azote de sources naturelles, parce que les processus responsables des pertes d'azote influencent l'azote de l'engrais de la même façon que l'azote "naturel". Il y a des exemples qui montrent bien ce phénomène: une absorption plus élevée de l'azote naturel est accompagnée par un recouvrement plus élevé de l'engrais.

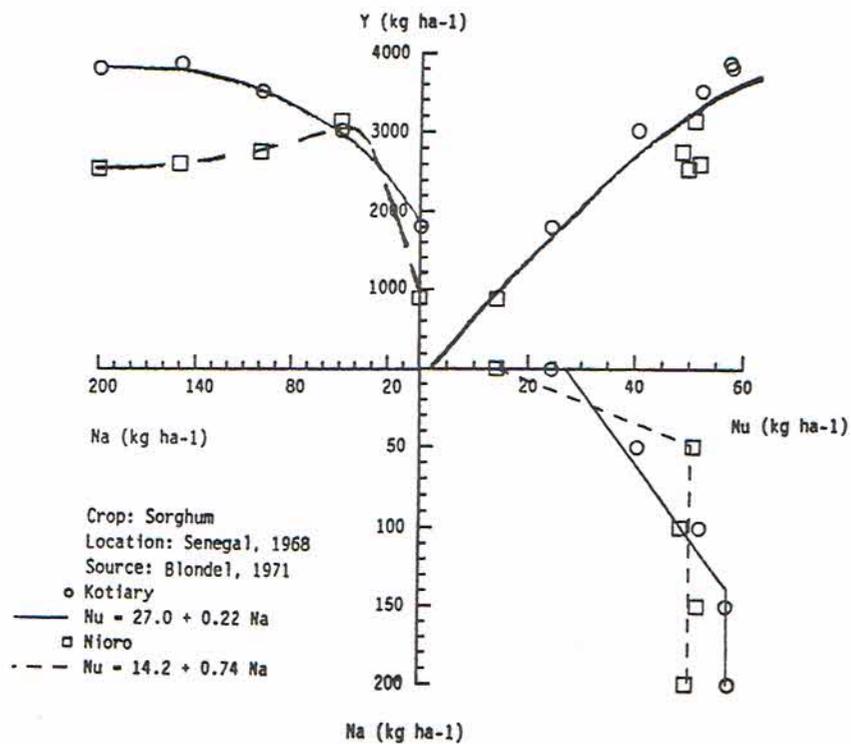


Figure 4. Relation entre l'absorption d'azote (Nu) et le rendement en grains (Y), entre l'apport d'azote (Na) et son absorption par le sorgho et l'apport d'engrais et le rendement en grains.

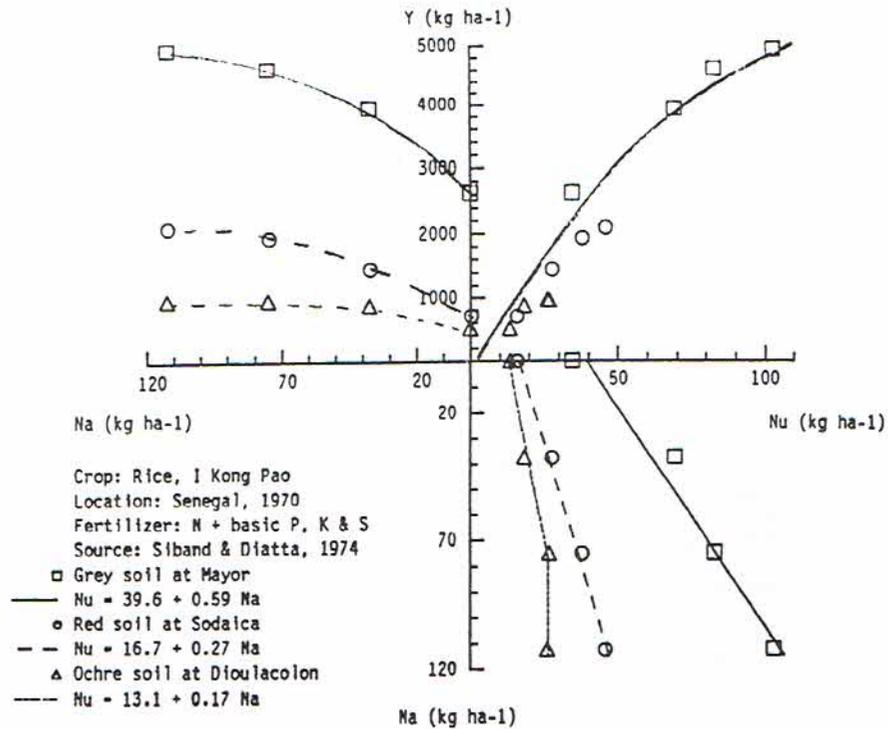


Figure 5. Relation entre l'absorption d'azote (Nu) et le rendement en grains (Y), entre l'apport d'azote (Na) et son absorption par le riz et l'apport d'engrais et le rendement en grains.

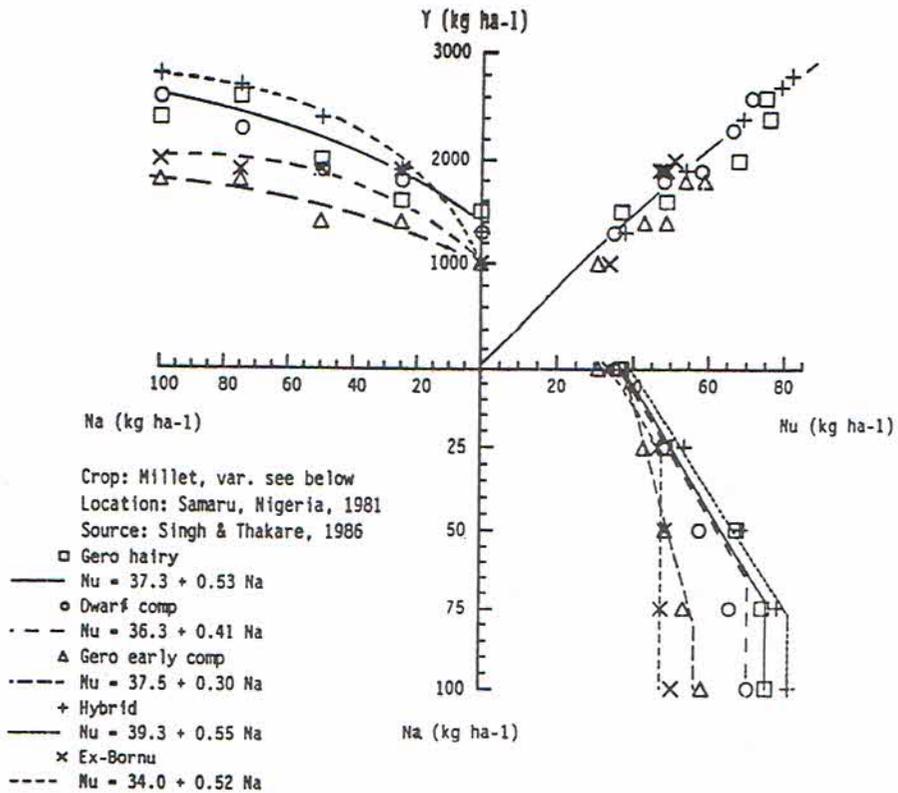


Figure 6. Relation entre l'absorption d'azote (Nu) et le rendement en grains (Y), entre l'apport d'azote (Na) et son absorption par le mil et l'apport d'engrais et le rendement en grains.

2.3.3 Phosphore

Comme pour l'azote, la relation entre l'application et l'absorption du phosphore est caractérisée par une absorption en l'absence d'application d'engrais (phosphore de sources naturelles) et le recouvrement de l'engrais chimique appliqué. L'offre minérale est en partie une caractéristique du sol, déterminée par la composition minéralogique et la quantité et qualité de la matière organique. Des différences existent entre espèces et même entre variétés. Elles sont probablement liées à des caractéristiques racinaires. Le phosphore est relativement immobile dans le sol, donc c'est l'interception fortement liée à la vitesse de croissance en profondeur des racines et leur densité qui conditionne une proportion élevée d'absorption.

La quantité totale de phosphore du sol se trouve dans différentes composantes et des transformations ont lieu continuellement. Les vitesses de transformation et le niveau d'équilibre sont déterminés par les conditions du sol, notamment la teneur en eau, la température et le pH. Les variations entre les années peuvent être attribuées à des conditions environnementales variables comme les précipitations et la température (Figure 7).

Pour les engrais phosphatés, la situation est plus complexe que pour les engrais azotés. Apparemment, les processus qui jouent un rôle dans la disponibilité de l'élément pour la culture, ne suivent pas les dynamiques de premier ordre, c'est-à-dire que les vitesses des processus ne sont pas proportionnelles à la concentration de l'élément dans la solution. La conséquence est que la fraction d'élément appliquée et absorbée par la culture varie selon la dose appliquée. Les processus d'absorption, de précipitations et d'immobilisation enlèvent des ions de la solution du sol et la concentration n'est pas proportionnelle à la quantité appliquée. En conséquence, le recouvrement d'engrais phosphaté est généralement bas, et diminue en fonction de la quantité appliquée, en raison du séjour plus long dans le sol qui a pour effet des pertes plus fortes à travers les précipitations et l'immobilisation. Dans une telle situation, il est possible d'améliorer le recouvrement par

placement de l'engrais dans un volume de sol limité, comme démontré par de Wit (1953). Il y a des cas où l'on obtient une augmentation du recouvrement grâce à une application d'azote (Figure 8), ou suite à des fortes doses de P. Ce dernier phénomène est typique sur des sols fixateurs de phosphate, qui peuvent former des associations chimiques entre les particules de la phase solide (des minéraux argileux, des oxydes d'aluminium et du fer) et les ions phosphatés. Dans ces sols il faut d'abord "saturer" les sites potentiels d'absorption, ainsi, la concentration de phosphate dans la solution du sol pour que l'efficacité d'absorption augmentent.

Une autre situation est celle où le recouvrement diminue d'abord, puis augmente suite à des doses plus élevées. Ce phénomène est probablement lié à la précipitation des phosphates insolubles (Fe, Al, Ca), qui augmentent dans un premier temps. Lorsque tous les cations sont écartés, à des doses d'application très fortes, le recouvrement augmente. Il est aussi possible qu'il s'agisse d'absorption sur la phase solide du sol. Pour distinguer les deux phénomènes il faut étudier en détails la dynamique des phosphates. Mais, cette distinction n'est pas importante pour les besoins de notre analyse.

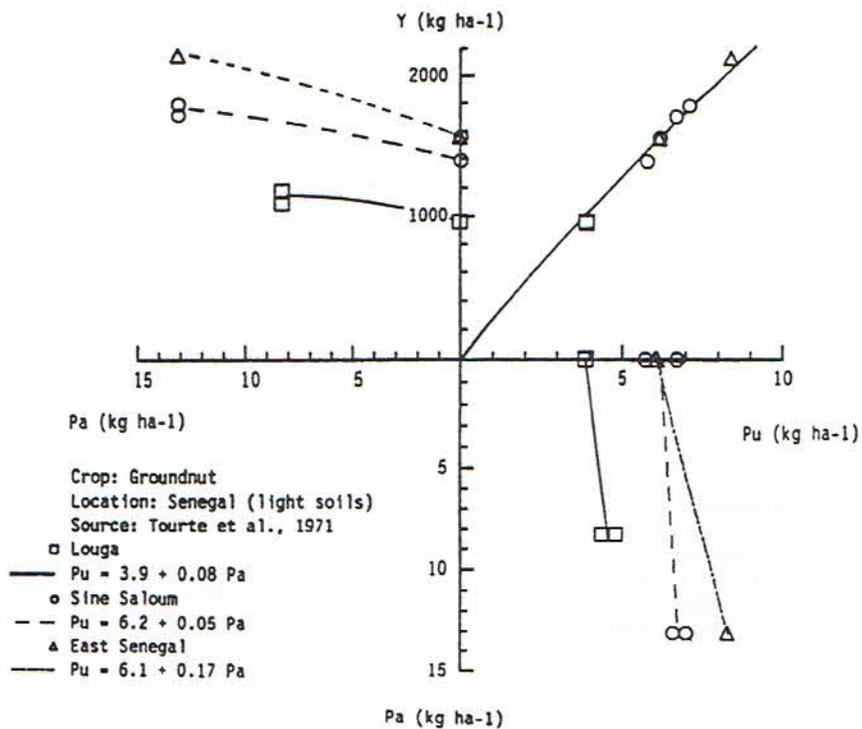


Figure 7. Relation entre l'absorption de phosphore (P_u) et le rendement en grains (Y), entre l'apport de phosphore (P_a) et son absorption par l'arachide et l'apport d'engrais et le rendement en grains.

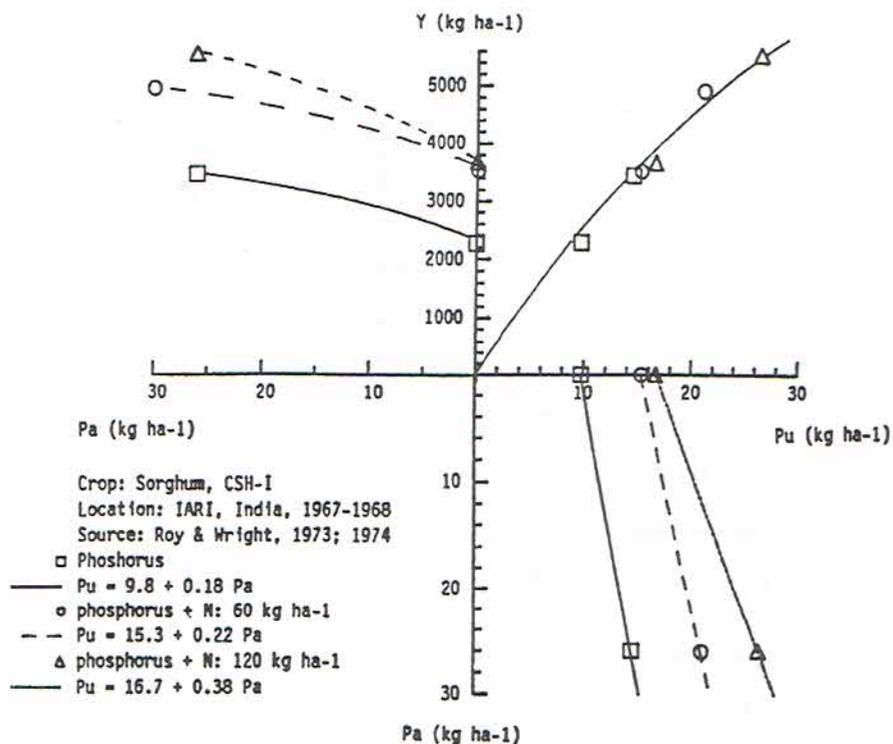


Figure 8. Relation entre l'absorption de phosphore (Pu) et le rendement en grains (Y), entre l'apport de phosphore (Pa) et son absorption par le sorgho et l'apport d'engrais et le rendement en grains.

2.4 Relation absorption - rendement

L'exemple de la Figure 3, représentatif de la majorité des expériences d'application d'engrais, montre qu'il existe une relation proportionnelle entre l'absorption et le rendement sous conditions d'absorption faible. Cette proportionnalité est la conséquence du fait que sous conditions de disponibilité limitée d'un élément nutritif, son taux dans le tissu aboutit à une valeur limitante. Donc, il est impossible d'arriver à des taux inférieurs à moins de remobiliser l'élément des structures végétatives. Donc, chaque unité de N ou de P absorbée augmente le rendement de la même valeur.

Pour une végétation naturelle constituée d'espèces annuelles et de céréales, la relation entre l'absorption des éléments N et P et le rendement en matière sèche dépend du stade phénologique de la végétation. Au cours du développement phénologique la concentration limitante d'un élément diminue et en conséquence l'efficacité de son utilisation par la plante augmente (Figure 9).

Lorsque l'absorption des éléments nutritifs augmente, la relation entre l'absorption et le rendement s'écarte du linéaire et aboutit à des concentrations plus élevées dans les organes de la culture: aussi bien les organes économiques que les résidus. Finalement, la courbe atteint un niveau constant, indiquant que l'élément considéré n'est plus le facteur limitant pour la croissance. La valeur de ce plateau est déterminée par le facteur le plus limitant. Donc sous conditions de "croissance potentielle" (c'est-à-dire aucune restriction pour la croissance), elle est fonction de la disponibilité en énergie solaire (van Keulen, 1982).

Les paramètres qui décrivent donc cette relation entre absorption et rendement sont la pente, le niveau maximum et le point de déclinaison. La pente est fonction de l'espèce, de l'indice de récolte et de l'élément nutritif considéré, mais elle est indépendante du type d'engrais et du type d'application. Pour ce qui est des indices de récolte, les céréales cultivées en Afrique de l'Ouest ont des valeurs différentes (Tableau 2).

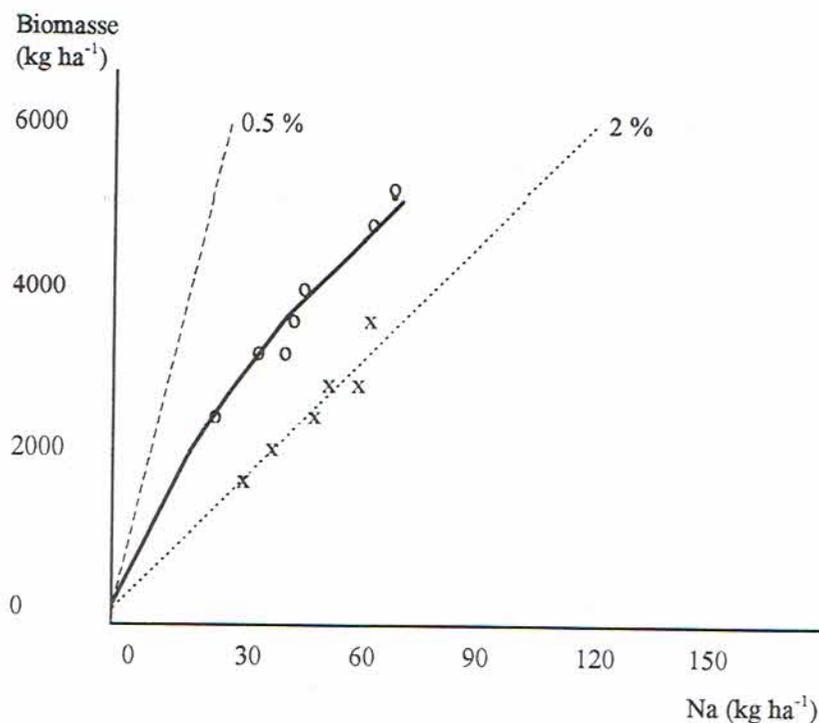


Figure 9. Relation entre la quantité de N absorbée (Na) et la production de biomasse formée de *Schoenefeldia gracilis* avec une fumure azotée, Mali, 1978, avec les récoltes au stade x: de la floraison (5 sept.) et o: de maturité (20 sept.) (adapté de Penning de Vries & Djitèye, 1982).

Tableau 2. Valeurs de 12.5% quantile (min), moyens (m) et 87.5% quantile (max) de l'indice de récolte des céréales à partir de n observations (van Duivenbooden, 1992; van Duivenbooden et al., 1996).

espèce	HI _{min}	HI _{moyen}	HI _{max}	(n)
Mil	0,16	0,26	0,40	(480)
Sorgho	0,25	0,27	0,56	(306)
Mais	0,25	0,42	0,56	(344)
Riz	0,34	0,44	0,55	(392)

Des analyses extensives des relations entre l'absorption des éléments nutritifs et le rendement pour les principales céréales d'Afrique de l'Ouest (van Duivenbooden, 1992) montrent que pour chaque culture, l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs (exprimée comme la pente de la relation absorption-rendement) est une caractéristique spécifique d'une espèce. En effet, il se caractérise par trois valeurs: la valeur minimale (c'est-à-dire une absorption maximale), la valeur moyenne (pour des raisons pratiques), et la valeur maximale (c'est-à-dire une diffusion d'élément nutritif maximale). Ces valeurs typiques sont présentées en Tableau 3. L'efficacité d'absorption pour ces cultures est exprimée en termes de rendements économiques, c'est-à-dire, par rapport aux organes de stockage.

Tableau 3. Valeurs de 25% quantile (min), moyens (m) et 75% quantile (max) de l'efficacité d'utilisation des éléments N et P pour les céréales en Afrique de l'Ouest (augmentation de poids matière sèche du rendement économique par kg d'éléments absorbés; van Duivenbooden, 1992;1996).

espèce	N			P		
	min	moyen	max	min	moyen	max
Mil	21	26	31	139	194	237
Sorgho	29	39	46	204	249	297
Maïs	35	41	48	202	279	336
Riz	45	54	63	250	363	412

3. Utilisation du concept dans la planification des expérimentations et la gestion des ressources naturelles

3.1 *Effet de la composition et de la quantité de fumure*

Avant d'effectuer des expérimentations, il faut bien réfléchir aux objectifs recherchés: faut-il une expérimentation pour montrer l'importance des apports d'engrais (augmentation du rendement, etc.) ou pour chercher un paquet d'interventions qui diminue les coûts? Pour ce dernier but, une expérimentation a été effectuée au Mali. Les interventions concernent une variation de la composition et de la quantité de fumure. Les résultats sont présentés en Tableau 4. Ces résultats permettent de faire les remarques suivantes:

- 7 kg de N et 4,8 kg de P n'ont pas eu l'effet attendu et la saturation n'a pas été atteinte à une dose de 100 kg ha⁻¹;
- 16 kg de N en plus, n'ont eu aucun effet, ce qui est un peu surprenant. Les causes possibles sont: (i) application incorrecte de l'engrais, (ii) maladies ou adversités en jeu, et (iii) autres éléments nutritifs limitants;
- Le manque des résultats de consommation de N et de P ne permet pas d'expliquer les phénomènes observés.
- En conséquence, l'essai n'a pas atteint le niveau potentiel et le paquet d'interventions ne permet pas de tirer des conclusions sur la composition et la quantité de fumure nécessaire. En général, on peut conclure que les résultats d'une expérimentation sans un suivi complet (N & P ici) seraient difficilement utilisables.

Tableau 4. Essais de fumure minérale par complexe NPK, 14-22-12 et d'urée sur un mil au Mali (apport et rendement en kg ha⁻¹).

Année	Apport		N	P	Rende- ment	Rendement/Apport	
	complexe	urée				N	P
'85-'87	50	0	7	4,8	210	30,0	43,8
'85-'87	100	0	14	9,6	360	25,7	37,5
1987	100	0	14	9,6	390	27,9	40,6
1987	50	50	30	4,8	380	12,7	79,2

3.2 Calcul des apports nécessaires pour une culture durable avec un bilan nutritif équilibré

Pour établir le bilan nutritif les composantes doivent être connues.

Il s'agit de:

- IN1 Engrais chimique
- IN2 Fumier
- IN3 Résidues de récolte (entier)
- IN4 Résidues de récolte brûlés
- IN5 Déposition aérienne et par l'eau (run-on)
- IN6 Mineralization de la matière organique de sol
- IN7 Fixation biologique
- OUT1 Absorption par les grains
- OUT2 Absorption par la paille et la reste d'epis
- OUT3 Absorption par les mauvaises herbes
- OUT4 Erosion
- OUT5 Denitrification
- OUT6 Volatilization
- OUT7 Fixation dans le sol
- OUT8 Lessivage

Le bilan est donc:

$$\text{BILAN} = \text{SUM}[\text{IN1}, \dots, \text{IN7}] - \text{SUM}[\text{OUT1}, \dots, \text{OUT8}] \quad (\text{Eq. 2})$$

Pour une estimation grossière de l'engrais chimique, il est supposé que les taux de recouvrement de fumier et d'engrais chimique sont égale ($E\text{-IN} = \text{IN1} + \text{IN2}$). En suite, pour les céréales l'IN7 est zero, et pour simplicier les choses, l'effet nette des IN3-6 et des OUT4-8 peut être estimé par le taux de recouvrement (REC) et la fertilité de sol apparemment (E-SOL). Finalement, l'absorption par les mauvaise herbes a été exclu, et $E\text{-ABS} = \text{OUT1} + \text{OUT2}$. Pour avoir un bilan en équilibre ont retient donc:

$$E\text{-IN} * \text{REC} + E\text{-SOL} = E\text{-ABS} \quad (\text{Eq. 3})$$

En conséquence, pour un bilan nutritif équilibré, la quantité d'engrais nécessaire est calculée comme suit:

$$E\text{-IN} = (E\text{-ABS} / \text{REC}) - E\text{-SOL} \quad (\text{Eq. 4})$$

Avec l'équation 4, il est facile de calculer les besoins (grossiers) en engrais pour un rendement cible.

4. Exercices

4.1 Exercice 1.

Calculez le taux de recouvrement d'engrais phosphaté lorsque l'absorption par la culture est de $6,9 \text{ kg P ha}^{-1}$ et l'application de 18 kg ha^{-1} . L'absorption par le témoin est de $3,9 \text{ kg P ha}^{-1}$.

4.2 Exercice 2.

Calculez le taux de recouvrement d'engrais azoté pour l'expérience de Ganry et al. (1974) avec les données suivantes:

<u>Nappl</u>	<u>Rend grains</u>	<u>Taux N grains</u>	<u>Rendement de paille</u>
0	1515	1.28	5575
60	2295	1.57	6557
90	2658	1.63	6787
150	3055	1.92	7439

Le taux de N de la paille a été fixé à 0,6%. Construisez le diagramme à trois quadrants.

4.3 Exercice 3.

Calculez les besoins d'engrais chimiques pour un système de production durable (en terme de bilan nutritif équilibré) de riz avec une exportation aux champs de 60 kg N , 7 kg P et 65 kg K ha^{-1} . La fertilité du sol est de 30 kg ha^{-1} pour N, $2,6$ pour P et 12 pour K. L'apport des autres sources est de 14 kg ha^{-1} pour N, $1,5$ pour P et 20 pour K. Le recouvrement est de $0,20$ pour N, $0,25$ pour P et $0,60$ pour K.

4.4 Exercice 4.

Un paysan espère un rendement de 1000 kg de maïs par hectare et un indice de récolte de 0,33. Quelle quantité d'engrais chimiques et de fumier faudra-t-il apporter lorsqu'on sait que 20% des besoins en éléments nutritifs seront fournis par le fumier.

Pour votre information: les teneurs minimales [%]:

	N	P	K
grains	1,21	0,18	0,31
paille	0,50	0,03	0,79

Mais, en général, les teneurs sont de 20% plus hautes.

Dans une expérimentation sur le même type de sol, les résultats suivants sont obtenus pour une culture de maïs:

N_{appl} de 0, 50, 100, 150 kg ha⁻¹, donne une N_u de 29, 46, 59, 73 kg ha⁻¹

P_{appl} de 0, 6, 12, 18 kg ha⁻¹, donne une P_u de 3,9, 5,5, 6,3, 6,9 kg ha⁻¹

K_{ap} de 0, 50, 100, 150 kg ha⁻¹, donne une K_u de 34, 59, 86, 109 kg ha⁻¹

Les apports de la pluie et des résidus de récolte en N, P et K sont 9, 1,0 et 9 kg ha⁻¹, respectivement. Les taux de N, P et K du fumier sont de 1,27, 0,28 et 1,30%, respectivement.

5. Conclusions

L'analyse présentée dans ce document montre que les résultats des expériences d'engrais peuvent être interprétés plus significativement si l'absorption des éléments nutritifs par les cultures est connue. Il est donc important de procéder à des analyses chimiques du sol et du matériel organique apporté. De telles analyses nous permettent de nous prononcer sur les quantités des éléments nutritifs de sources naturelles, de juger de l'efficacité des engrais chimiques et de déterminer si l'élément a été vraiment limitant pour la production primaire. Cette connaissance facilite l'utilisation des données pour l'extrapolation et la prédiction en général, mais aussi pour éventuellement ajuster le rapport de N et P dans la dose d'engrais à appliquer. En outre, la dose d'engrais est importante. Ce n'est pas la peine d'étudier les effets des apports d'engrais si la dose pour atteindre le rendement potentiel n'est pas testée.

Références bibliographiques

- Bationo, A. & U.A. Mokwunye, 1991. Alleviating soil fertility constraints to increased crop production in West Africa. The experience in the Sahel. *Fertilizer Research* 29: 95-115.
- Blondel, D., 1971. New results on increasing the protein content of the grain millet (*Pennisetum typhoides*) and sorghum (*Sorghum vulgare*) by nitrogen fertilization in Senegal. CNRA Report, Bambey, Senegal.
- de Wit, C.T., 1953. A physical theory on placement of fertilizers. *Agricultural Research Reports* no 59.4, Staatsdrukkerij, 's-Gravenhage, 71 p.
- Ganry, F., J. Bideau & J. Nicoli, 1974. Action de la fertilisation azotée et de l'amendement organique sur le rendement et la valeur nutritionnelle d'un mil Souna III. *Agronomie Tropicale* 29: 1006-1015.
- Penning de Vries, F.W.T. & M.A. Djitéye (Eds), 1982. La productivité des pâturages sahéliers. Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle. *Agric. Research Reports* No 918, PUDOC, Wageningen, 525 p.
- Roy, R.N. & B.C. Wright, 1973. Sorghum growth and nutrient uptake in relation to soil fertility. I. Dry matter accumulation patterns, yield and N content of grain. *Agronomy Journal* 65: 707-711.
- Roy, R.N. & B.C. Wright, 1974. Sorghum growth and nutrient uptake in relation to soil fertility. II. N, P, and K uptake pattern by various plant parts. *Agronomy Journal* 66: 5-10.
- Siband, P. & S. Diatta, 1974. Contribution à l'étude de la fertilisation du riz pluvial en Casamance. IRAT/CNRA, Bambey, 29 p.
- Singh, L. & R. B. Thakare, 1986. Yield response and nitrogen uptake of pearl millet (*P. americanum*) cultivars to nitrogen application in the savanna region of Nigeria. *Fertilizer Research* 10: 113-118.
- Tourte, R., M. G. Pochier, C. Ramond, J. Monnier, R. Nicou, J.F. Poulain, R. Hamon & C. Charreau, 1971. Thèmes légers thèmes lourds, systèmes intensifs, voies différentes ouvertes au développement agricole du Sénégal. *Agronomie Tropicale* 26: 632-669.

- van Duivenbooden, N., 1992. Sustainability in terms of nutrient elements with special reference to West Africa. CABO-DLO, Wageningen, 260 p. + 18 p. annexes.
- van Duivenbooden, N., 1996. Durabilité en terme des éléments nutritifs avec une attention spéciale pour l'Afrique de l'Ouest. PSS Report x, AB-DLO, Wageningen (in prep).
- van Duivenbooden, N., C.T. de Wit & H. van Keulen, 1996. Nitrogen, phosphorus and potassium relations in five major cereals reviewed in respect to fertilizer recommendations using simulation modeling. *Fertilizer Research* 44: 37-49.
- van Keulen, H., 1977. Nitrogen requirements of rice with special reference to Java. *Contr. Centr. Res. Inst. Agric. Bogor*, No 30, 67 p.
- van Keulen, H., 1982. Graphical analysis of annual crop response to fertilizer application. *Agricultural Systems* 9: 113-126.
- van Keulen, H. & H.D.J. Van Heemst, 1981. Crop response to the supply of macronutrients. *Agricultural Research Reports* no 916, PUDOC, Wageningen, 46 p.

Annex 1. Solutions

Exercice 1.

$$\text{Taux de recouvrement} = (Eu_x - Eu_0) / (Ea_x - Ea_0) = 6,9 - 3,9 / 18 = 0,17.$$

Exercice 2.

Etape 1. Les absorptions sont:

$$\begin{aligned} N_u &= Nu_{\text{grain}} + Nu_{\text{paille}} \\ &= (1515 * 1,28\%) + (5575 * 0,6\%) = 52.9 \text{ kg N ha}^{-1}. \end{aligned}$$

pour les autres les chiffres devient: 75.3, 84.0 et 103.3 kg N ha⁻¹.

Etape 2. La relation linéaire avec une machine devient:

$$N_u = 53,8 + 0,33 * N_a \quad (r^2 = 1,0).$$

Etape 3. Voir pour les résultats, Figure 3 dans le texte.

Exercice 3.

En utilisant la formule 4:

$$N_{\text{besoin}} = (60/0,20) - 30 - 14 = 256 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$P_{\text{besoin}} = (7/0,25) - 2.6 - 1,5 = 23,9 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$K_{\text{besoin}} = (65/0,60) - 12 - 20 = 76 \text{ kg ha}^{-1}$$

Exercice 4.

Etape 1. Calcul de la quantité de paille

L'indice de récolte est $0,33 = 1000/x$,

donc la quantité de paille est $(0,33 * 1000) - 1000 = 2000 \text{ kg ha}^{-1}$

Etape 2. Calcul de l'absorption

$$N_u = (1,21\% * 1,2 * 1000) + (0,50\% * 1,2 * 2000) = 26,5 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$P_u = (0,18\% * 1,2 * 1000) + (0,03\% * 1,2 * 2000) = 2,9 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$K_u = (0,31\% * 1,2 * 1000) + (0,79\% * 1,2 * 2000) = 22,7 \text{ kg ha}^{-1}$$

Etape 3. Calcul de la fertilité de sol et du taux de recouvrement par les relations linéaires:

$$N_u = 30 + 0,29 * N_{\text{appliqué}}$$

$$P_u = 4,2 + 0,16 * P_{\text{appliqué}}$$

$$K_u = 12 + 0,50 * K_{\text{appliqué}}$$

La fertilité du sol est donc de 30 kg ha^{-1} pour N, $4,2$ pour P et 12 pour K et le taux de recouvrement est de $0,29$ pour N, $0,16$ pour P et $0,50$ pour K.

Avec ces données:

$$N_{\text{besoins}} = (26,5/0,29) - 30 - 9 = 52,3 \text{ kg ha}^{-1},$$

donc la quantité de fumier à apporter est

$$(0,2 * 52,3)/1,27\% = 824 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$P_{\text{besoins}} = (2,9/0,16) - 4,2 - 1,0 = 12,9 \text{ kg ha}^{-1},$$

donc la quantité de fumier à apporter est

$$(0,2 * 12,9)/0,28\% = 921 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$K_{\text{besoins}} = (22,7/0,50) - 12 - 9 = 24,4 \text{ kg ha}^{-1},$$

donc la quantité de fumier à apporter est

$$(0,2 * 24,4)/1,30\% = 375 \text{ kg ha}^{-1}.$$

Comme les besoins en fumier sont différents pour les différents éléments nutritifs, on retient une valeur maximale de fumier (920 kg ha^{-1}), la quantité d'engrais chimiques est donc:

$$N_{\text{chim}} = 52,3 - (920 * 1,27\%) = 40,6 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$P_{\text{chim}} = 12,9 - (920 * 0,28\%) = 10,3 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$K_{\text{chim}} = 24,4 - (920 * 1,30\%) = 12,4 \text{ kg ha}^{-1}$$