

Rapports PSS N° 15

Production Soudano-Sahélienne (PSS)
Exploitation optimale des éléments nutritifs en élevage

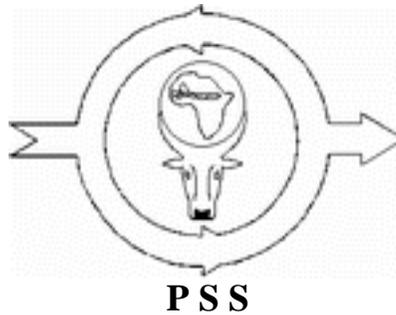
Projet de coopération scientifique

Simulation des risques de l'intensification dans la zone soudano-sahélienne au Mali

G.H. Dijksterhuis, AB-DLO ¹⁾

¹⁾ Adresse : B.P. 129, 9750 AC Haren, les Pays-Bas

IER, Bamako
AB-DLO, Wageningen, Haren
DAN-UAW, Wageningen



Rapports PSS N° 15

Wageningen, 1996

Rapports du projet Production Soudano-Sahélienne (PSS)

Numéro 15

Table des matières

- [1. Introduction](#)
- [2. Méthodologie](#)
 - [2.1. Simulation de la production](#)
 - [2.2. Risque de la fertilisation](#)
 - [2.3. Extrapolations](#)
- [3. Résultats](#)
 - [3.1. Résultats intermédiaires](#)
 - [3.2. La production limitée par leau](#)

- [3.3. L'efficacité des billons cloisonnés](#)
- [3.4. La réponse sur engrais](#)
- [3.5. Dose optimale économique de lazote](#)
- [3.6. Risques de l'utilisation de lazote](#)
- [3.7. Extrapolation de la production du Sorgho](#)
- [4. Discussion](#)
- [5. Conclusions](#)
- [Bibliographie](#)

« The research for this publication was financed by the Netherlands' Minister for Development Co-operation. Citation is encouraged. Short excerpts may be translated and/or reproduced without prior permission, on the condition that the source is indicated. For translation and/or reproduction in whole the Section DST/SO of the aforementioned Minister should be notified in advance (P.O. Box 20061, 2500 EB The Hague). Responsibility for the contents and for the opinions expressed rests solely with the authors; publication does not constitute an endorsement by the Netherlands' Minister for Development Co-operation ».

1. Introduction

En de nombreux pays du Sahel, la situation alimentaire est telle que la production agricole ne suffit pas à nourrir la population. De grosses quantités de produits alimentaires sont donc importées parce qu'une grande partie de la population demeure sous-alimentée (Instituto del Tercer Mundo, 1994).

La cause de cette faiblesse de production est complexe, mais les facteurs principaux résident dans la basse fertilité des sols, la variabilité du climat et le faible taux de commercialisation des produits agricoles. Pour pouvoir garantir la sécurité alimentaire, il est nécessaire d'accroître la production agricole de façon durable, c.-à-d. en augmentant structurellement cette production sans qu'elle nuise à l'environnement.

Les paysans ont essayé d'accroître leur production en étendant la surface d'exploitation, ce qui a accentué la dégradation de sols fragiles. Les sols parfaitement appropriés subissent souvent une surexploitation, provoquant aussi une dégradation constante. La situation agricole actuelle n'est donc ni productive, ni durable.

Il ne reste donc qu'une seule solution : intensifier les systèmes d'agriculture via des intrants extérieurs. Bien qu'il soit possible d'accroître la production par l'intensification, il est indispensable aux paysans de connaître les risques accompagnant la dite intensification. Eu égard à la situation économique, les paysans visent principalement à minimiser les risques ; une augmentation de la production végétale les intéresse seulement dans la mesure où les risques n'en sont pas accrus.

Avant de commencer à étudier les possibilités d'intensification dans la zone Soudano-Sahélienne, il

convient de bien en définir les risques connexes. Généralement parlant, deux types de risques existent. Le premier type de risque - et le plus important - se situe au niveau alimentaire. Le second est de type économique.

En ce qui concerne le risque alimentaire, il est clair que la production alimentaire devrait être suffisante à nourrir la population et que la variabilité de production est faible. Des mauvaises récoltes constituent une menace directe pour la population. Les décennies précédentes nous ont montré les conséquences tragiques d'un tel échec. Pourtant, la production alimentaire actuelle est tellement peu élevée que le grand risque alimentaire subsiste.

Le risque économique n'est pas du même ordre que le risque alimentaire. Néanmoins, ces deux types de risque sont étroitement liés. Lorsqu'on évoque le danger économique, on sous-entend le risque de ne pas pouvoir récupérer ses investissements. Un tel risque peut empêcher les paysans d'adopter un système de production intensifié, en particulier dans les conditions actuelles où aucun système ne peut pallier de tels risques. La présente situation implique donc une augmentation de la production agricole mais les obstacles à un système intensifié sont multiples. Conséquemment, le problème à résoudre réside dans la façon dont on peut augmenter la production et en minimiser les risques de manière concomitante.

Pour une telle étude, il faut connaître les facteurs clefs de la production. Bien que beaucoup agissent sur la production, la présence de l'eau et des éléments nutritifs est supposée constituer le facteur prioritaire. Dans la majeure partie de la zone Soudano-Sahélienne, la pluviométrie est très hétérogène du point de vue de sa répartition spatiale et de sa quantité. En ce qui concerne la fertilité des sols, la situation est telle que le niveau correspondant diminue du fait de la surexploitation. Il paraît judicieux, pour cette raison-là, de trouver une solution au problème existant en ce domaine.

Les modèles de simulation se sont avérés des outils utiles pour une étude de ce type. A l'aide de ces modèles, il est possible de prévoir l'effet d'une mesure donnée sur la production, sans avoir à procéder à un essai en milieu réel. Ceci permet d'étudier la conséquence de très nombreuses mesures en un minimum de temps. L'avantage secondaire se situe dans la réduction des coûts d'une telle étude.

Cela semble trivial, mais pour faire l'étude d'un problème du type de celui mentionné ci-dessus, il est nécessaire de disposer d'un modèle de simulation suffisamment rodé et suffisamment sensible à la détection de l'effet que peut avoir sur des cultures une petite modification. Des modèles existent pour évaluer les risques des variations pluvieuses de la région ainsi que l'efficacité des mesures agronomiques pour faire face à ces variations. (Reyniers & Forest, 1990 ; Reyniers & Netoyo, 1994). Ces modèles paient cependant relativement peu d'attention à l'influence de la fertilité du sol et de la fertilisation, facteur clef de l'intensification, sur le risque hydrique. Le modèle que le PSS voudrait utiliser devrait bien décrire et simuler la relation entre la disponibilité en eau et en éléments nutritifs. Un tel modèle est difficile à mettre au point en raison du manque d'éléments disponibles (Dijksterhuis & Neeteson, 1995), et de la complexité du système de production.

La présente étude a exploré le potentiel d'un modèle de la croissance céréalière sahélienne. Les résultats

obtenus pourront être utilisés pour se prononcer des risques de l'intensification des cultures fourragères (voir [3.7](#)).

2. Méthodologie

2.1. Simulation de la production

Pour étudier l'effet de l'intensification, on a utilisé le modèle CPBKF3. Ce modèle a été développé par l'AB-DLO en coopération avec le Bureau National des Sols et l'Institut des Etudes et des Recherches Agricoles du Burkina Faso (Verberne *et al.*, 1995). Il peut simuler la croissance des cultures céréalières pluviales dans les conditions de la zone Soudano-Sahélienne de l'Afrique Occidentale. Ce modèle est partiellement validé pour la simulation de la croissance du sorgho dans la zone Soudano-Sahélienne du Burkina Faso (Dijksterhuis, 1995).

En ce qui concerne l'étude des potentialités de l'intensification dans la zone correspondante au Mali, nous avons utilisé le sorgho en tant que culture représentative. Sur la base des résultats obtenus avec le sorgho comme culture représentative, il serait possible de faire une extrapolation en faveur d'autres cultures telles que le niébé et les graminées.

L'effet de l'apport d'engrais est étudié sur 7 doses d'urée : 0, 15, 30, 45, 60, 90, et 120 kg de N sur 12 différents types de sol (Tableau 1) au sein de 4 sites : Nara, Niono, Ségou et Koutiala, dont la pluviosité moyenne est respectivement 460, 590, 720, et 1000 mm an⁻¹. Le Tableau 1 caractérise les sols suivant leur textures et suivant des propriétés qui déterminent la disponibilité en eau. La profondeur et la capacité d'absorption ont été dérivées des observations du terrain au Mali (PIRT, 1983). Le ruissellement présenté concerne les moyennes calculées pour 30 années en allant de Nara à Koutiala. L'eau utile maximale est une dérivée de la texture et de la profondeur; il s'agit de la quantité à stocker au maximum à un moment donné. Les sols GR-su, GR et SA seront très sensibles pour des périodes de sécheresse au cours de la saison de croissance. La pluviosité annuelle d'une année moyenne à Koutiala ne suffit pas pour remplir le sol LI. Celle de Ségou suffit juste pour LIAR, mais elle est insuffisante pour IN-ar. Mais localisés dans des dépressions comme est la réalité de IN-ar (et IN-li), une pluviosité moindre suffira; l'eau de ruissellement d'ailleurs y se concentre.

En ce qui concerne le niveau de fertilité des sols, les pourcentages de C_{total} et de N_{total} demeurent constants, à 0,75% et 0,05% respectivement. Ces niveaux-là ne sont pas les niveaux actuels mais ceux correspondant à une situation après quelques années avec des forts apports de fumure organique. La quantité initiale d'azote était de 5 kg ha⁻¹. Les conséquences sont que les résultats des simulations sans engrais n'ont qu'une valeur théorique, et que la fertilisation avec de l'engrais chimique doit rester accompagnée d'une fertilisation avec du fumier. La quantité d'azote qui deviendra ainsi disponible a été négligée. En supposant que l'azote d'urée est plus chère que celle du fumier, nous surestimons les besoins d'urée et ainsi les risques des paysans liés à son utilisation.

De plus, la conséquence des mesures anti-érosives sur la production et les risques est simulée en utilisant des billons cloisonnés. Ces billons cloisonnés diminuent le ruissellement quasi totalement pour les sols SA, SALI, GR et IN-li. Il restera le plus élevé, c.-à-d. de l'ordre de 5 à 10 % (de Nara à Koutiala) pour IN-ar, SU, SU-inc, LI et LIAR, mais au moins IN-ar aura plutôt des problèmes d'apport hydrique que de ruissellement en général (voir ci-dessus). Ce dernier risque existe aussi pour le sol IN-li et LIAR, la gestion d'eau sera aussi dans ce cas un devoir.

Tableau 1. Caractéristiques des sols utilisés.

Nom de sol	Texture	Profondeur (cm)	Ruissellement (%)*	Capacité d'absorption d'eau (mm min ^{-1/2})**	Eau utile maximale (mm)
IN-ar	Limon argileux sableux	200	(20-45)	5,0	480
IN-li	Limon sableux	200	(15-25)	5,0	368
SU	Limon argileux sableux	75	20-40	5,0	147
SU-inc	Limon argileux sableux	38	20-45	5,0	107
GR	Limon argileux sableux	44	20-20	5,0	42
GR-su	Limon	18	20-25	3,1	10
SA	Sable	200	0-5	7,0	52
SALI	Sable limoneux	200	5-15	5,9	148
LISA-g	Limon sableux	200	15-30	5,0	294
LISA-f	Limon sableux	44	15-35	5,0	172
LI	Limon	200	30-45	3,1	556
LIAR	Limon sableux	200	(20-45)	4,6	448

* Ruissellement augmente avec la pluviosité; valeurs entre parenthèses en général hypothétique, car ces sols seront souvent inondés (IN) ou reçoivent un apport hydrique des substrats avoisinants ;

** Source : Driessen, 1986;

Les variétés de sorgho utilisées dépendent de la région, mais elles sont toutes photosensibles et de type amélioré. La durée du cycle dépend de la région : pour Nara on utilise une variété de 90 jours, pour Niono deux variétés, de 90 et 110 jours, pour Ségou ces deux mêmes variétés, et pour Koutiala deux variétés, de 110 et 125 jours. Le moment de la germination dépend du taux d'humidité du sol, et du volume des précipitations. Dans le cadre de ce modèle, la germination débute si la quantité d'eau - tombée sur deux jours successivement - excède 25 mm, et si la charge hydraulique (pF) dans la couche de semis est supérieure à pF 4. Le choix de la variété est fonction de la date de germination ; si la date de germination est ultérieure à une date seuil, le modèle sélectionnera la variété courte. Les dates seuils sont : le 30 Juin pour Niono et Ségou, le 15 Juin pour Koutiala.

La période de simulation s'étend sur 31 années (de 1950 à 1980), à l'exception de Nara où les données météorologiques de l'année 1968 étaient manquantes. Pour chaque dose d'engrais appliquée, on obtient donc 31 résultats sur la base desquels s'établissent les distributions cumulatives fréquentielles de la probabilité. Ces résultats concernent la biomasse aérienne totale, les graines plus la paille, car le modèle est utilisé ici pour se prononcer du risque de la fertilisation des cultures fourragères.

La réponse de la culture aux doses d'engrais est calculée sur la base des moyennes des 31 résultats, par analyse de régression en utilisant la courbe de Mitscherlich (Eq. 1).

$$MS = a - b * e^{-k * N} \quad (\text{Equation 1})$$

où

MS = la production totale (graines et paille) en matière sèche (kg ha^{-1}) ;

a = la production maximale (kg ha^{-1}) ;

b = la réponse (kg ha^{-1}) ;

N = la quantité d'azote (kg ha^{-1}) ;

k = coefficient d'extinction (ha kg^{-1}).

L'analyse de la régression linéaire des rendements via la courbe de Mitscherlich donne d'excellentes corrélations. Dans tous les cas, le coefficient de corrélation atteint presque 1, ce qui signifie que l'ensemble de la variation observée est expliquée par la courbe Mitscherlich.

2.2. Risque de la fertilisation

Les résultats des simulations expliquées ci-dessus ont servi pour se prononcer du risque que l'utilisation de l'engrais ne sera pas rentable à cause des variations de la quantité et de la distribution des pluies. A partir des rapports moyens entre dose et rendement par site et par sol sur 30 ans, la dose optimale économique de l'azote a été déterminée pour quelques valeurs du RVC (rapport valeur de fourrage et coût d'engrais). Ensuite le risque a été estimé que cette dose ne serait pas rentable. L'estimation se base sur la variation de rendement. La complexité de la matière a mené à la décision d'expliquer l'approche d'avantage dans le chapitre résultats (voir [3.3](#) à [3.5](#)).

2.3. Extrapolations

Les résultats obtenus avec la biomasse aérienne totale du sorgho pourraient être utilisés pour d'autres cultures si les différences en valeur énergétique sont connues (voir [3.7](#)).

Tableau 2. Effet des billons cloisonnés en kg ha^{-1} sur les différents sols de Nara, Niono, Ségou et Koutiala.

Type de sol	Nara	Niono	Ségou	Koutiala
IN-ar	2935*	6292*	6763*	9521*
INLI	1291p.s.	1427p.s.	625p.s.	480p.s.
SU	2198*	5287*	5811*	5517*
SU-inc	2499*	5780*	8102*	9903*
GR	453p.s.	178p.s.	209p.s.	138p.s.
GR-su	-85p.s.	-257p.s.	-354p.s.	-751p.s.
SA	0	1p.s.	-11p.s.	-62p.s.
SALI	37p.s.	-4p.s.	-155p.s.	-194p.s.
LISA-g	1901*	2089*	1373*	612p.s.
LISA-f	1086*	1070p.s.	2005*	612p.s.
LI	4261*	7551*	8879*	8063*
LIAR	3287*	5449*	5509*	3793*

* différence significatif ($P < 0,05$); p.s.= pas significatif

3. Résultats

3.1. Résultats intermédiaires

Quelques résultats intermédiaires seront présentés et analysés pour deux raisons : les différences entre les aptitudes des douze sols utilisés de réagir sur la fertilisation deviendront un peu compréhensibles, et la nécessité des simulations est illustrée.

Un des résultats intermédiaire a été présenté déjà; il s'agit du ruissellement (Tableau 1). Le Tableau 2 ajoute par sol et par site, sans et avec l'utilisation des billons cloisonnés, le nombre d'années avec une germination efficace (suivie d'une installation), les dates d'émergence et les longueurs de cycle. Les deux tableaux montrent des propriétés des substrats, mais celles du Tableau 2 peuvent être regardées comme dérivées du premier. Il s'agit des propriétés qui influenceront l'efficacité de la fertilisation positivement ou bien négativement. Les propriétés qui mènent à une utilisation maximale de l'eau pluvieuse mèneront aussi à une utilisation maximale des éléments nutritifs. C'est ainsi que les sols profonds, ayant une capacité d'infiltration élevée, un ruissellement bas et une quantité maximale d'eau utile élevée (différence entre capacité au champs et point de flétrissement, et profondeur du sol) seraient les plus intéressants. Mais l'infiltration rapide s'oppose dans la pratique à une différence importante entre la capacité au champs et le point de flétrissement, et les sols ayant une telle différence notable sont souvent peu profonds.

C'est ainsi que les sols lourds et profonds, IN-ar, LI et LIAR, ont en principe la valeur de la quantité maximale d'eau utile la plus élevée. Mais si ils ne se trouvent pas dans des dépressions où ils reçoivent un apport hydrique important, le ruissellement risque d'être si fort que le maximum ne sera jamais atteint dans la région sans de billons cloisonnés efficaces. De l'autre côté il y a les sols SU-inc, GR, GR-su et SA, avec la quantité maximale d'eau utile la plus basse ; les premiers trois notamment par leur profondeur restreinte, le dernier par sa texture grossière.

La comparaison des Tableaux 1 et 2 montre les conséquences. Pour le faire il faut encore savoir que l'efficacité de germination (Tableau 2) est fortement déterminée par la force avec laquelle l'eau est tenue par le substrat : le nombre d'années avec une germination efficace du tableau est en gros inversement proportionnel à cette force. Elle est déterminée par la pente de la courbe de charge hydraulique (pF) en dessous du point de flétrissement. Le reste du Tableau 2 montre l'importance de ce facteur : les sols avec un nombre d'années élevé d'une germination efficace montrent en général aussi une installation rapide et ainsi un cycle de croissance longue. Il y a d'autres facteurs en jeu; le ruissellement joue par exemple également un rôle : en dessus d'un ruissellement de 20% à peu près, l'installation est de plus en plus retardée par une augmentation du ruissellement.

Il y a donc pour chaque sol une série de propriétés dont les conséquences pour le potentiel d'utilisation d'eau pluvieuse et ainsi des éléments nutritifs par les plantes peuvent se renforcer et s'opposer. Comme meilleurs sols se présentent, vu le nombre d'années à germination efficace, l'installation tôt et le cycle long, IN-li, GR, GR-su, SALI et LISA-g. Surtout la présence de GR et GR-su dans cette série étonne, car leur quantité d'eau utile maximale est très limitée. Pour les autres c'est plus logique, mais il devrait être clair que sans simulation il est presque impossible d'escompter l'influence d'une série si longue de propriétés différentes pour évaluer les potentiels des substrats.

3.2. La production limitée par l'eau

La production limitée par l'eau donne une idée de la potentialité de la zone Soudano-Sahélienne. Les facteurs déterminant cette production peuvent être étudiés par analyse de la régression multiple. Une telle analyse est réalisée sur la base des productions totales simulées, obtenues avec une dose de 120 kg N ha⁻¹, pour chacun des 4 sites et des 12 sols, sans et avec utilisation de billons cloisonnés. On dispose ainsi de 96 observations pour la régression multiple. La Fig. 1 en donne une illustration, pour le cas de l'utilisation des billons cloisonnés. On suppose qu'une telle dose serait suffisante pour une croissance non limitée par l'azote, ce qui n'est pas entièrement vrai pour les sites humides et les années très pluvieuses.

Figure 1. Les rendements moyens de la biomasse aérienne totale (matière sèche) sur 31 ans par site et par sol après fertilisation avec 120 kg ha⁻¹ d'azote en utilisant des billons cloisonnés.

Il résulte de cette analyse 5 facteurs différents - statistiquement significatifs - qui jouent un rôle sur la production globale (Eq. 2). Le coefficient de corrélation est de 83,2%, ce qui signifie que 83,2% de la variation observée dans la production totale est expliquée par ces 5 facteurs. L'analyse montre par

ailleurs que les facteurs « eau utile », « pluviosité totale » et « durée du cycle » ont un effet positif sur la production totale, et que le « ruissellement » et la « date d'émergence » ont un effet négatif sur la production globale.

C'est ainsi que les sols SALI, IN-li, LISA-g et GR produisent bien avec la fertilisation, où SA, GR-su, LISA-f et SU produisent peu et ceci en particulier sur les sites secs.

$$MS = 5,59 * EU - 64,40 * RU - 45,53 * DE + 4,36 * PT + 140,00 * DC \quad (\text{Equation 2})$$

où

MS = la production totale (graines et paille) en matière sèche (kg ha^{-1}) ;

EU = l'eau utile ($\text{mm H}_2\text{O}$) ;

RU = la pourcentage de ruissellement (%) ;

DE = la date de l'émergence (jour julien) ;

PT = la pluviométrie dans la période de croissance (mm) ;

DC = la durée du cycle (jours).

Cette analyse montre que la production n'est pas seulement déterminée par la pluviométrie, mais avant tout par l'efficacité et l'utilisation de la pluviométrie. Une telle observation n'est pas nouvelle (Wadleigh *et al.*, 1965 ; Sivakumar & Wallace, 1991). L'efficacité peut être exprimée par la quantité d'eau utile et le taux de ruissellement.

La quantité d'eau utile est avant tout une caractéristique du sol et elle peut être difficilement modifiée ; le taux de ruissellement peut néanmoins être minimisé en appliquant des mesures anti-érosives. Si l'on peut maximiser l'efficacité de l'eau, la date d'émergence peut être avancée, permettant ainsi d'utiliser la période de croissance maximale. Conséquemment, la durée du cycle même peut être également étendue.

3.3. L'efficacité des billons cloisonnés

En utilisant des billons cloisonnés, on vise principalement à minimiser la perte en eau causée par le ruissellement. La mise en place de ces billons exige cependant beaucoup de travail ; il convient donc d'étudier l'efficacité d'une telle mesure. On peut supposer que l'efficacité dépend largement du type de sol, et de la pluviométrie totale. On analyse l'effet des billons grâce à la méthode d'analyse de la variation (ANOVA), en utilisant les productions totales simulées pour une dose de 120 kg N ha^{-1} .

Les résultats montrent clairement qu'il existe effectivement une forte dépendance par rapport au type de sol et à la pluviométrie. L'effet est surtout significatif pour les sols IN-ar, SU, SU-inc, LI et LIAR. Sur ces sols-là, les plantules ne survivaient pas sans l'utilisation des billons cloisonnés, dans les années de sécheresse. La survie des plantules en soi n'est pas une indication que les billons seraient efficaces, car sur sable (SA) ils n'ont pas d'influence notable.

L'effet sur LISA-g et LISA-f est significatif si la pluviométrie est peu élevée. Dans toutes les localisations, l'effet des billons cloisonnés n'est pas significatif sur les sols suivants : INLI, GR, GR-su, SA et SALI. L'effet moyen des billons cloisonnés sur les sols où la germination n'est pas limitative est conforme aux résultats obtenus dans la région par des tiers (Nicou *et al.*, 1990 ; Kouyaté & Wendt, 1991).

L'influence d'une augmentation notable de la disponibilité en eau (à cause d'une pluviosité supérieure; comparaison de Koutiala et Nara) n'est pas égale à celle des billons cloisonnés. Ceci n'est pas étonnant vu le fait que cette augmentation concerne plus de 100%, tandis que les billons donnent une augmentation de 45% au maximum. La différence de production entre Koutiala et Nara avec fertilisation et sans billons cloisonnés est la plus élevée, dans l'ordre descendante, pour LISA-f, LISA-g, GR et IN-li; avec billons pour LISA-f, SU et SU-inc.

3.4. La réponse sur l'engrais

La réponse de la culture sur les différentes doses d'engrais dépend aussi bien du site que du type de sol. Les sols qui réagissent le mieux sur la fertilisation, si on n'utilise pas des billons cloisonnés, sont, dans l'ordre descendante SALI, IN-li, GR et LISA-g; ceux qui réagissent le moins SU-inc, LI, IN-ar et SU. En diminuant le ruissellement par l'utilisation des billons, trois sols restent bien efficace en ce qui concerne l'utilisation d'engrais par les plantes, mais GR apparaît comme sol avec une réponse moyenne; LI devient assez efficace (4ème place). Pour les sols qui réagissent le moins il y a des changements profonds : la réponse la plus restreinte est trouvée pour SA, suivi de GR-su, Su-inc et LISA-f respectivement. Le Tableau 3 illustre pour chaque site, sans et avec les billons cloisonnés, la variation au niveau de la différence de production entre 0 et 120 kg N ha⁻¹, pour les sols qui réagissent respectivement le plus et le moins.

Tableau 3. Variation de la différence de production en kg ha⁻¹ entre 0 et 120 kg N ha⁻¹, et le sol réagissant le plus et le moins, avec et sans billons cloisonnés.

Site	Billons cloisonnés					
	Sans			Avec		
	Différence	Sol réagissant le moins	Sol réagissant le plus	Différence	Sol réagissant le moins	Sol réagissant le plus
Nara	2-3062	LI	SALI	381-3311	SA	SALI
Niono	44-4701	LI	SALI	335-4956	SA	SALI
Ségou	235-5696	SU-inc	SALI	1494-5855	SA	SALI
Koutiala	741-6989	SU-inc	SALI	3481-7229	SA	SALI

Il est clair qu'il existe une grande variation de l'effet d'application d'azote sur les différents sols. Cette

variation ne provient que partiellement de la fertilité de base; l'importance des caractéristiques physiques des sols a été soulignée dans 3.1. Dans le cas où l'on n'utilise pas les billons cloisonnés et où la pluviométrie est faible, la variation est principalement causée par le ruissellement, par d'autres facteurs qui causent une situation défavorable pour la germination et/ou par une insuffisance d'eau pour une croissance optimale. C'est ainsi qu'à Nara et Niono sur le sol LI, où le pourcentage de ruissellement a varié entre 28 et 30% et la durée de croissance entre 44 et 66 jours, la production avec 120 kg ha⁻¹ d'azote ne serait que 0,2 et 0,6 t ha⁻¹. La variation du ruissellement sur le sol SALI n'a varié que de 7 à 10%, et la durée du cycle de croissance a oscillé entre 86 et 91 jours; en conséquence, c'est ce sol qui réagira le plus à la donne de 120 kg de N : la production de la biomasse aérienne deviendrait 6,7 et 8,7 t ha⁻¹.

A Ségou et Koutiala, où la pluviométrie est bien supérieure à Nara et Niono, la réponse sur l'azote dans la situation où l'on n'utilise pas les billons cloisonnés est essentiellement déterminée par la date de germination. La date de germination est partiellement déterminée par le taux de ruissellement. La variation du taux de ruissellement sur le sol réagissant le moins (SU-inc) s'est située entre 34 et 43%, et celle de la date de germination entre le 20 et le 31 juillet. La variation du taux de ruissellement sur le sol SALI s'est située entre 11 et 14% tandis que celle de la date de germination entre le 11 juin et le 3 juillet. Ce n'est pas étonnant ainsi que la production sur SALI après une donne de 120 kg de N dépasse celle de SU-inc par hectare avec 9,6 et 12,1 t à Ségou et Koutiala respectivement.

Dans le cas où on utilise les billons cloisonnés, la variation de l'effet d'azote sur la production totale est essentiellement déterminée par la date d'émergence. Il existe une excellente corrélation entre la date d'émergence (DE, jour julien) et la réponse sur l'azote (RN, kg ha⁻¹; Eq. 3), avec laquelle 78,6% de la variation de RN peut être expliquée.

$$RN = 19294,11 - 82,9609 * DE \quad (\text{Equation 3})$$

Sur le sol SA, la date d'émergence est la plus tardive dans tous les sites et c'est la raison pour laquelle il réagit le moins, tandis que la date d'émergence est la plus précoce sur le sol SALI, qui réagit le plus.

3.5. Dose optimale économique de l'azote

La dose optimale économique de l'azote est la dose au-dessus de laquelle l'application d'azote n'est plus rentable. On calcule la dose optimale économique à l'aide de la première dérivée (Eq. 4) de la courbe de Mitscherlich.

$$RVC^* = b * k * e^{-k * N} \quad (\text{Equation 4})$$

Il s'agit de la tangente de la courbe dose-réponse pour une valeur marginale choisie du ratio valeur/coût (RVC ; valeur de la matière sèche divisée par les coûts d'engrais pour la produire), traduite en rendement physique (kg de matière sèche totale) par kg d'azote supplémentaire. Le choix de la valeur de RVC

dépend du niveau de risque que le paysan pourrait encourir. On traite ici les valeurs de RVC 1, 2, 4 et >> correspondant à un RVC* de 15, 30, 60 et >> respectivement. Le prix d'azote utilisé étant 300 F CFA par kg, le prix de la matière sèche utilisé est donc 20 F CFA par kg. Il sera clair que les valeurs de RVC peuvent varier également par la variation des prix d'azote et de fourrage pour une valeur de RVC* qui est fixe. Donc un paysan qui fait un effort d'augmenter son revenu et de diminuer son risque cherche un RVC élevé par une valeur de RVC* élevée, en autres mots une efficacité élevée de l'utilisation de l'engrais.

Tableau 4. La dose optimale économique d'azote (N_{opt} ; $kg\ ha^{-1}$), le rendement net (R) de la production aérienne ($kg\ ha^{-1}$) atteinte avec la dose optimale économique d'azote et la probabilité (P) que la dose optimale économique ne sera pas rentable, par site et par sol aux valeurs différentes du ratio valeur/coût (RVC) sans l'utilisation des billons cloisonnés.

		Nara			Niono			Ségou			Koutiala		
Type de sol	RVC	N_{opt}	R	P	N_{opt}	R	P	N_{opt}	R	P	N_{opt}	R	P
IN_ar	1	0,0	303	1,000	0,0	606	1,000	3,3	1710	0,499	29,8	5490	0,457
	2	0,0	303	1,000	0,0	606	1,000	0,0	1703	1,000	13,6	5380	0,465
	4	0,0	303	1,000	0,0	606	1,000	0,0	1703	1,000	0,0	5029	1,000
	>>	0,0	303	1,000	0,0	606	1,000	0,0	1703	1,000	0,0	5029	1,000
IN_li	1	20,5	3691	0,464	39,3	6988	0,353	54,5	8624	0,196	71,4	11797	0,218
	2	7,5	3610	0,475	24,4	6868	0,357	36,9	8509	0,193	48,8	11658	0,221
	4	0,0	3449	1,000	9,5	6453	0,405	19,2	8028	0,235	26,2	11204	0,250
	>>	0,0	3449	1,000	0,0	5893	1,000	0,0	6579	1,000	0,0	9032	1,000
SU	1	0,0	102	1,000	0,0	655	1,000	13,6	1862	0,487	39,5	5948	0,416
	2	0,0	102	1,000	0,0	655	1,000	0,6	1779	0,499	22,5	5878	0,418
	4	0,0	102	1,000	0,0	655	1,000	0,0	1772	1,000	5,4	5400	0,462
	>>	0,0	102	1,000	0,0	655	1,000	0,0	1772	1,000	0,0	5080	1,000
SU_inc	1	0,0	62	1,000	0,0	253	1,000	3,2	566	0,495	18,3	1972	0,466
	2	0,0	62	1,000	0,0	253	1,000	0,0	555	1,000	6,5	1907	0,473
	4	0,0	62	1,000	0,0	253	1,000	0,0	555	1,000	0,0	1753	1,000
	>>	0,0	62	1,000	0,0	253	1,000	0,0	555	1,000	0,0	1753	1,000
GR	1	29,6	3567	0,394	49,2	6027	0,280	64,0	8162	0,106	78,9	12104	0,001
	2	16,7	3484	0,397	32,8	5911	0,277	45,2	8029	0,105	57,3	11970	0,001
	4	3,9	3097	0,459	16,4	5503	0,306	26,5	7543	0,131	35,8	11452	0,004

	>>	0,0	2913	1,000	0,0	4280	1,000	0,0	5218	1,000	0,0	7911	1,000
GR_su	1	25,9	1649	0,211	37,6	2435	0,233	51,0	3387	0,185	81,1	6819	0,016
	2	13,5	1607	0,187	22,1	2381	0,211	32,4	3329	0,171	58,0	6645	0,013
	4	1,0	1210	0,436	6,6	1947	0,273	13,8	2918	0,184	35,0	6127	0,014
	>>	0,0	1161	1,000	0,0	1536	1,000	0,0	1896	1,000	0,0	2849	1,000
SA	1	6,6	1272	0,495	5,2	1027	0,493	33,0	2842	0,401	58,9	6184	0,270
	2	0,0	1251	1,000	0,0	1002	1,000	17,5	2757	0,404	39,5	6094	0,265
	4	0,0	1251	1,000	0,0	1002	1,000	2,1	2322	0,472	20,1	5663	0,283
	>>	0,0	1251	1,000	0,0	1002	1,000	0,0	2200	1,000	0,0	4083	1,000
SALI	1	47,5	5649	0,049	66,4	7295	0,093	77,2	9075	0,044	81,3	12782	0,000
	2	33,1	5567	0,038	47,6	7147	0,090	56,1	8932	0,050	60,8	12623	0,000
	4	18,7	5097	0,056	28,8	6661	0,105	35,0	8379	0,078	40,3	12194	0,001
	>>	0,0	3610	1,000	0,0	3983	1,000	0,0	4950	1,000	0,0	7587	1,000
LISA_g	1	21,5	2838	0,462	43,1	5758	0,359	58,2	7935	0,198	77,3	11716	0,126
	2	8,2	2754	0,470	27,2	5626	0,362	39,9	7825	0,192	54,3	11555	0,125
	4	0,0	2572	1,000	11,3	5201	0,398	21,5	7311	0,219	31,3	11041	0,151
	>>	0,0	2572	1,000	0,0	4493	1,000	0,0	5633	1,000	0,0	8292	1,000
LISA_f	1	0,0	902	1,000	19,9	2802	0,449	42,1	4884	0,379	69,6	10544	0,054
	2	0,0	902	1,000	8,8	2736	0,457	25,2	4765	0,382	48,2	10414	0,051
	4	0,0	902	1,000	0,0	2515	1,000	8,2	4299	0,428	26,7	9905	0,080
	>>	0,0	902	1,000	0,0	2515	1,000	0,0	4258	1,000	0,0	7679	1,000
LI	1	0,0	169	1,000	0,0	538	1,000	4,7	1093	0,497	25,8	4649	0,466
	2	0,0	169	1,000	0,0	538	1,000	0,0	1080	1,000	10,9	4564	0,472
	4	0,0	169	1,000	0,0	538	1,000	0,0	1080	1,000	0,0	4282	1,000
	>>	0,0	169	1,000	0,0	538	1,000	0,0	1080	1,000	0,0	4282	1,000
LIAR	1	0,0	487	1,000	0,0	1479	1,000	25,1	3472	0,463	48,6	7714	0,386
	2	0,0	487	1,000	0,0	1479	1,000	9,8	3381	0,470	29,2	7633	0,387
	4	0,0	487	1,000	0,0	1479	1,000	0,0	3162	1,000	9,8	7105	0,430
	>>	0,0	487	1,000	0,0	1479	1,000	0,0	3162	1,000	0,0	6478	1,000

Tableau 5. La dose optimale économique d'azote ($N_{opt.}$; $kg\ ha^{-1}$), le rendement net (R) de la production aérienne ($kg\ ha^{-1}$) atteinte avec la dose optimale économique d'azote et la probabilité (P)

que la dose optimale économique ne sera pas rentable, par site et par sol aux valeurs différentes du ratio valeur/coût (RVC) avec l'utilisation des billons cloisonnés.

Type de sol	RVC	Nara			Niono			Ségou			Koutiala		
		N opt	R	P	N opt	R	P	N opt	R	P	N opt	R	P
IN_ar	1	12,2	2758	0,494	42,5	5971	0,381	58,0	7481	0,304	68,9	11152	0,285
	2	0,0	2709	1,000	24,8	5840	0,387	37,3	7345	0,305	45,7	11063	0,285
	4	0,0	2709	1,000	7,1	5346	0,442	16,6	6777	0,350	22,6	10541	0,321
	>>	0,0	2709	1,000	0,0	4971	1,000	0,0	5682	1,000	0,0	8816	1,000
IN_li	1	31,6	4773	0,425	53,8	8131	0,199	64,4	9052	0,151	73,4	12244	0,139
	2	16,6	4685	0,429	36,1	8001	0,200	43,8	8904	0,154	50,7	12097	0,140
	4	1,6	4264	0,486	18,4	7520	0,247	23,2	8369	0,202	27,9	11612	0,179
	>>	0,0	4184	1,000	0,0	6172	1,000	0,0	6570	1,000	0,0	9256	1,000
SU	1	9,1	1895	0,496	40,6	5113	0,400	58,2	6890	0,318	69,5	10839	0,273
	2	0,0	1869	1,000	23,6	4997	0,405	37,4	6751	0,319	46,9	10751	0,273
	4	0,0	1869	1,000	6,6	4516	0,453	16,5	6166	0,361	24,2	10219	0,308
	>>	0,0	1869	1,000	0,0	4168	1,000	0,0	5096	1,000	0,0	8325	1,000
SU_inc	1	19,0	1930	0,482	48,0	5037	0,377	63,2	7592	0,246	76,5	10652	0,228
	2	2,7	1836	0,493	29,5	4886	0,381	43,2	7451	0,244	53,6	10518	0,227
	4	0,0	1792	1,000	11,0	4367	0,422	23,1	6873	0,275	30,6	10050	0,246
	>>	0,0	1792	1,000	0,0	3732	1,000	0,0	5104	1,000	0,0	7360	1,000
GR	1	36,9	3870	0,331	56,8	6034	0,218	69,7	8235	0,077	81,3	12282	0,000
	2	22,9	3793	0,326	38,7	5918	0,210	49,5	8098	0,079	60,4	12152	0,000
	4	8,9	3368	0,387	20,7	5483	0,232	29,3	7596	0,101	39,5	11624	0,000
	>>	0,0	2913	1,000	0,0	3836	1,000	0,0	4954	1,000	0,0	7289	1,000
GR_su	1	26,3	1525	0,225	37,2	2357	0,215	49,4	3041	0,201	78,5	6097	0,028
	2	12,4	1480	0,199	20,2	2105	0,219	30,4	2996	0,182	55,2	5927	0,024
	4	0,0	1095	1,000	3,3	1617	0,349	11,4	2555	0,199	31,8	5443	0,024
	>>	0,0	1095	1,000	0,0	1419	1,000	0,0	1732	1,000	0,0	2622	1,000
SA	1	6,6	1270	0,494	5,1	1025	0,493	33,2	2824	0,402	58,5	6137	0,271
	2	0,0	1247	1,000	0,0	1000	1,000	17,5	2743	0,403	39,2	6044	0,267

	4	0,0	1247	1,000	0,0	1000	1,000	0,0	2187	1,000	19,8	5615	0,285
	>>	0,0	1247	1,000	0,0	1000	1,000	0,0	2187	1,000	0,0	4062	1,000
SALI	1	50,4	5622	0,029	70,5	7188	0,074	80,1	8861	0,046	83,9	12867	0,000
	2	35,3	5537	0,020	50,4	7040	0,070	58,1	8715	0,054	62,9	12441	0,000
	4	20,3	5043	0,031	30,4	6541	0,083	36,0	8143	0,080	41,8	11957	0,001
	>>	0,0	3398	1,000	0,0	3724	1,000	0,0	4636	1,000	0,0	7153	1,000
LISA_g	1	37,6	4461	0,380	59,2	7546	0,208	72,4	9068	0,069	79,3	12251	0,013
	2	22,2	4357	0,382	40,6	7418	0,206	50,2	8906	0,072	56,5	12113	0,011
	4	6,9	3936	0,430	22,0	6897	0,240	28,1	8323	0,107	33,7	11587	0,024
	>>	0,0	3549	1,000	0,0	5176	1,000	0,0	6011	1,000	0,0	8485	1,000
LISA_f	1	13,0	1664	0,477	36,1	3536	0,351	58,8	6573	0,222	74,9	11069	0,004
	2	0,0	1557	1,000	21,5	3542	0,349	40,0	6453	0,218	54,6	10973	0,004
	4	0,0	1557	1,000	6,9	3078	0,398	21,2	5954	0,244	34,4	10466	0,010
	>>	0,0	1557	1,000	0,0	2645	1,000	0,0	4313	1,000	0,0	7018	1,000
LI	1	21,5	3772	0,475	44,4	7140	0,371	63,7	8901	0,217	71,9	11731	0,245
	2	5,5	3673	0,486	26,5	7001	0,377	42,4	8736	0,220	47,9	11605	0,247
	4	0,0	3573	1,000	8,5	6494	0,430	21,0	8157	0,271	23,9	11098	0,284
	>>	0,0	3573	1,000	0,0	6034	1,000	0,0	6648	1,000	0,0	9232	1,000
LIAR	1	14,2	3281	0,489	43,2	6093	0,370	61,1	8383	0,229	70,4	11011	0,276
	2	0,0	3198	1,000	25,8	5953	0,376	40,6	8245	0,229	47,4	10916	0,276
	4	0,0	3198	1,000	8,4	5469	0,428	20,2	7676	0,279	24,4	10402	0,309
	>>	0,0	3198	1,000	0,0	5013	1,000	0,0	6233	1,000	0,0	8487	1,000

Il faut se réaliser que les valeurs 1, 2 et 4 du RVC sont des valeurs marginales de la dose optimale calculée, c'est-à-dire celles obtenues avec le dernier kg d'azote donné+. Le RVC de la dose entière est bien supérieure. C'est ce dernier RVC qui est utilisé pour calculé les doses optimales économiques d'azote par site. Pour le faire on a besoin du rendement maximale pour une valeur de RVC qui deviendra infinie, c.-à-d. le rendement maximale sans utilisation d'engrais azoté, et l'azote disponible naturellement pour la réalisation de ce rendement. Les Tableaux 4 et 5 présentent par site et par sol les rendements en question à côté des doses optimales économiques d'azote pour RVC égale à 1, 2 et 4. En plus sont présentés les rendements à obtenir avec ces doses optimales et la probabilité que cette dose ne sera pas rentable. C'est cette probabilité qui représente le risque à encourir par les paysans pour une combinaison site-sol donnée.

La dose optimale économique d'azote est la plus élevée pour les sols qui réagissent le plus fortement sur

la fertilisation (voir [3.1](#) et [3.4](#)) : dans l'ordre descendante, SALI, GR, LISA-g et GR-su sans l'utilisation de billons cloisonnés; SALI, GR, LISA-g et IN-li avec billons. Ce dernier sol se trouve à la 5^{ème} place sans billons. La pluviosité influence à peine la place des sols dans la série allant de la dose optimale la plus élevée à la dose la plus basse; ce n'est que sans utilisation de billons que GR-su et LISA-g change de place en allant de Nara à Koutiala (de 460 à 1000 mm an⁻¹). Mais la hauteur de la dose varie fortement : pour les sols les plus propices pour la fertilisation, la dose économique optimale moyenne d'azote augmente avec à peu près 40 kg ha⁻¹, en allant de Nara à Koutiala, sans et avec billons cloisonnés, en prenant les moyens des de RVC 1, 2 et 4 (voir Tableaux 4 et 5).

La valeur du RVC en soi a une influence bien plus forte que la pluviosité : la dose optimale diminue avec l'augmentation du RVC. Pour les cinq sols les plus propices pour la fertilisation (voir ci-dessus) la différence est de 20-80 kg ha⁻¹ entre RVC = 1 et RVC = 4. Ceci aussi bien sans et avec l'utilisation des billons cloisonnés. Les tableaux montrent que la valeur absolue de la dose économique optimale (moyenne des 4 sites) est 20-60 kg ha⁻¹ pour un RVC de 4 à 2 pour le meilleur sol (SALI), 2 étant la valeur la plus basse qui pourrait encore intéressée des paysans ayant suffisamment de moyens. Pour le sol à la 5^{ème} place (IN-li) la moitié de ces doses est trouvée à peu près.

Les niveaux de production liés à la dose optimale économique varient très peu avec les valeurs de RVC pour le trajet 1 à 4 étudié. Pour les meilleurs sols en ce qui concerne le rendement, ils sont aussi peu influencés par l'utilisation des billons cloisonnés, mais ils sont très sensibles pour la pluviosité. La production du meilleur sol (SALI) augmente, pour une valeur du RVC de 2 à 4, de 5 t ha⁻¹ à Nara à 12 t à Koutiala. Pour LISA-g, le 3^{ème} sol en ce qui concerne la réponse sur la fertilisation azotée, c'est 2,6 à plus de 11 t ha⁻¹ sans utilisation de billons, et 4 à 12 t avec billons. Donc l'influence de l'utilisation de billons cloisonnés n'est déjà plus négligeable pour la partie sèche du transect.

La comparaison des deux Tableaux 4 et 5 montrent deux effets opposés des billons cloisonnés. Pour les sols à ruissellement fort (Tableau 1) les doses optimales et les rendements y en liés augmentent fortement grâce aux billons. Mais pour les sols qui ont un ruissellement limité et une capacité de rétention restreinte (texture légère et/ou profondeur restreinte), les billons causent une augmentation du drainage et ainsi une perte d'azote pour la partie pluvieuse du transect. Un tel phénomène se produit sur les sols GR, GR-su, SA et SALI dans tous les sites. Les doses économiques optimales augmentent, mais les rendements y en liés diminuent à partir de Niono ou Ségou, et ceci en particulier pour les valeurs de RVC en dessus de 1. Il est ainsi question d'une diminution de l'efficacité de l'azote.

3.6. Risques de l'utilisation de l'azote

Comme déjà souligné dans l'introduction, deux types de risque existent : le risque alimentaire ou bien risque de l'échec complet, et le risque économique. Le risque de l'échec complet est souvent mentionné lorsqu'on évoque les risques liés à l'utilisation des engrais. Ce risque serait consisté en une consommation trop élevée des ressources en eau du sol par une surface foliaire très développée, par laquelle la plante risque de subir un déficit hydrique sévère avant maturation complète des grains. Pourtant, l'installation optimale des cultures permet aux racines de se développer de façon également

optimale en générant une situation relativement propice aux périodes de sécheresse. En outre, une culture vigoureuse va limiter les pertes en eau par l'évaporation du sol au bénéfice de la transpiration, et intercepter rapidement le maximum de lumière. Ce fait n'est pas seulement vrai en théorie, mais aussi en pratique, et est révélé par les écrits (Mokwunye & Hammond, 1992 ; Bationo *et al.* , 1993 ; Sedogo, 1993).

Le risque économique peut survenir plus fréquemment. Les facteurs principaux du risque économique sont la variabilité du climat (en particulier la variabilité de la pluviosité), et le rendement visé. Il est difficile de modifier la variabilité du climat, mais ses conséquences peuvent être minimisées par l'utilisation de mesures anti-érosives et de variétés résistant mieux à la sécheresse. Le rendement visé peut être choisi par le paysan, mais le risque connexe dépend largement du niveau et de la distribution de la probabilité (Fig. 2).

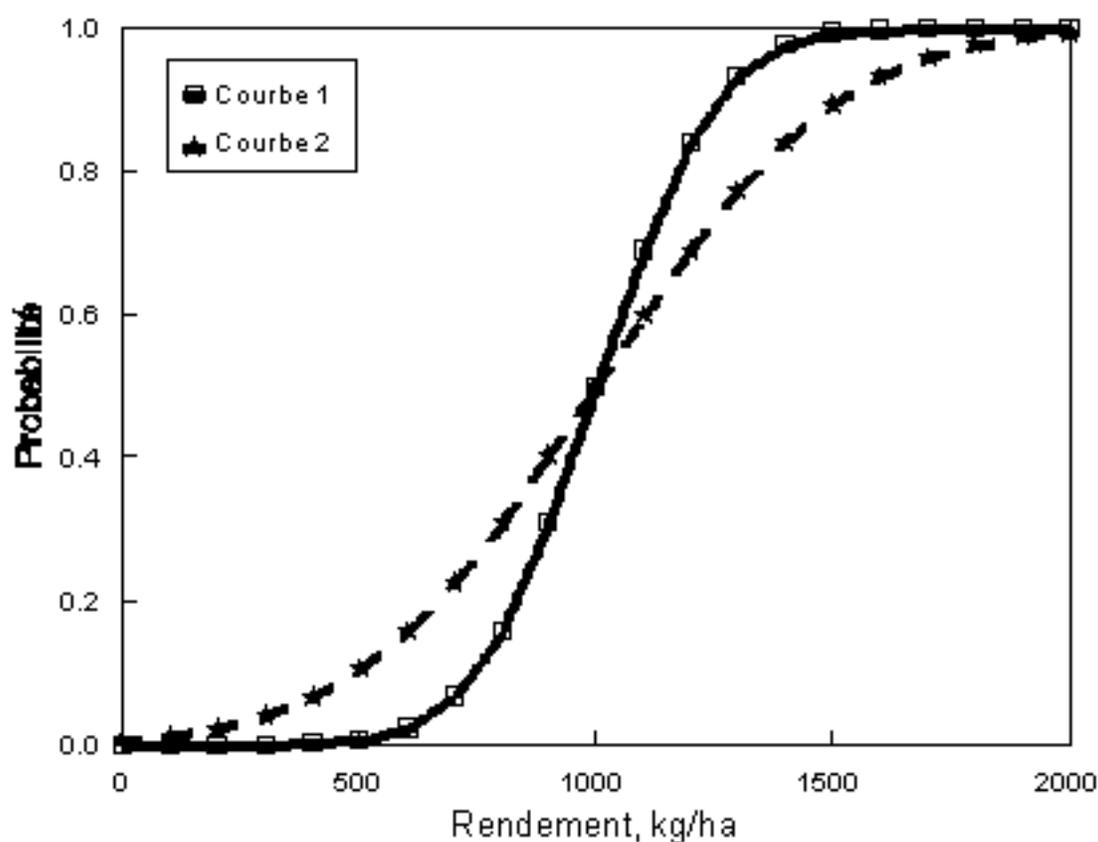


Figure 2. Probabilité cumulative d'un rendement avec une moyenne identique et un écart type différent ($s_2 = 2 s_1$).

Si un paysan a une grande aversion de risque, son but constituera principalement à obtenir une production dans toutes les conditions climatiques. Dans un tel cas, il pourrait donner sa préférence à un système donnant une distribution avec un grand écart type. La plupart des systèmes indigènes de l'Afrique Occidentale est basé sur ce principe-là. Si le paysan se trouve dans une situation telle qu'il peut encourir des risques supérieures, il optera pour une mesure donnant une distribution avec un petit écart type. La situation illustrée à la Fig. 2 n'est que théorique. L'effet d'une mesure donnée résulte souvent en

une distribution dont la moyenne et l'écart type sont respectivement différents. La Fig. 3 représente la distribution de la probabilité des rendements pour le sol GR-su à Nara sans et avec 15 kg N ha^{-1} , sans utilisation des billons cloisonnés.

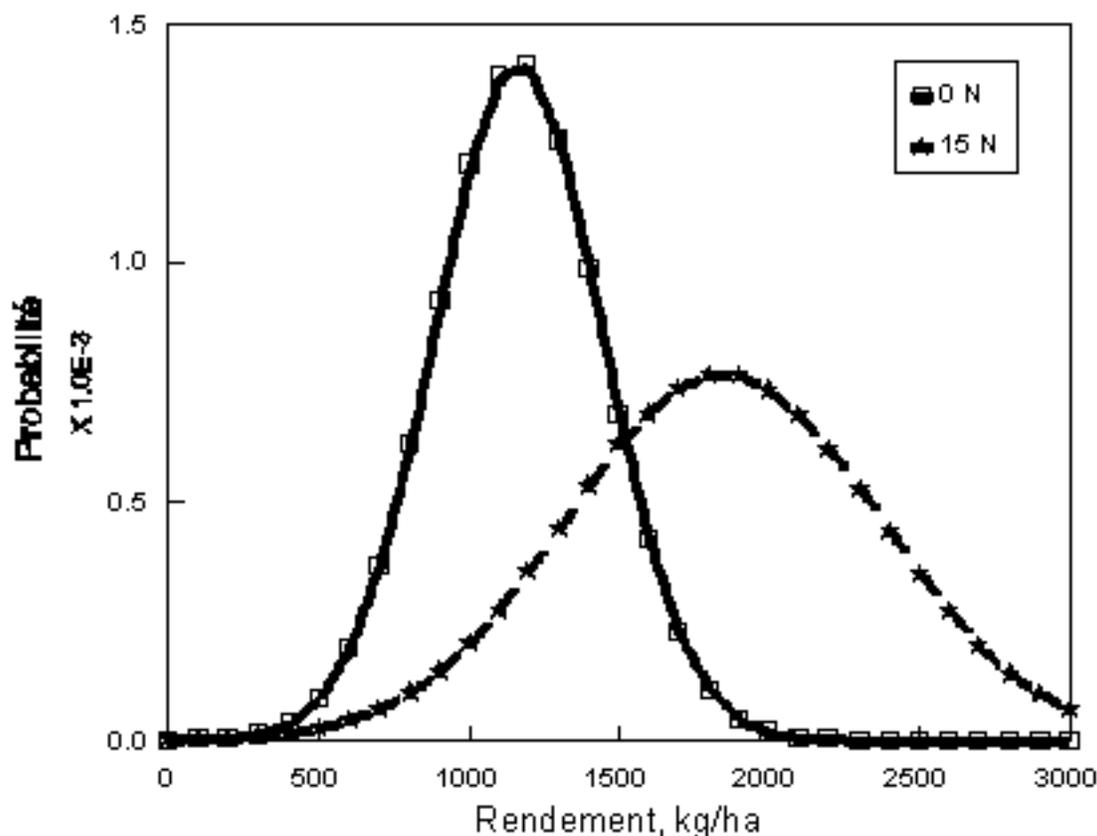


Figure 3. Distribution de la probabilité des rendements sur le sol GR-su à Nara, sans billons cloisonnés.

L'application de 15 kg N ha^{-1} a fait augmenter concomitamment le rendement moyen avec 685 kg et l'écart type avec 238 kg . On peut calculer le risque économique par le biais du calcul de la probabilité d'un seuil de rentabilité. Le seuil de rentabilité est défini comme le rendement sans application d'azote plus la quantité de produit nécessaire pour payer les engrais. En utilisant le RVC* de 15 déjà commenté, le seuil de rentabilité pour le sol GR-su à Nara est de 1386 kg . La probabilité cumulative d'un tel rendement sans application d'azote est de 21%, et avec l'azote de 81%. Ainsi, la probabilité de réalisation d'un tel rendement est presque quatre fois supérieure avec application d'azote que sans application d'azote.

La distribution de la probabilité des rendements en utilisant la dose optimale économique d'azote a été déterminée par sol et par site, avec les 31 années dont on dispose des données pluviométrique, et ceci sans et avec l'utilisation des billons cloisonnés. Ainsi on a pu déterminer le seuil de rentabilité et la probabilité de ne pas atteindre ce seuil avec une dose optimale économique d'azote. La probabilité est représenté dans les Tableaux 4 et 5. Les résultats montrent qu'il n'y a qu'un seul sol pour lequel le risque d'utilisation d'engrais est restreint dans tous les cas. Il s'agit de SALI, pour lequel même à Nara pour un $\text{RVC} = 4$ le risque d'une utilisation non rentable de la dose optimale économique n'est que 6%. En allant

à Koutiala ce risque deviendra 0,1%.

Les autres sols qui répondent bien sur la fertilisation ont des risques relativement bas. Il s'agit, dans l'ordre d'une augmentation de risque GR-su, GR, LISA-g et IN-li sans l'utilisation de billons cloisonnés. Avec billons l'ordre change un peu : GR, LISA-g et GR-su. LISA-f et IN-li change de place : LISA-f devient 5ème, IN-li 6ème.

LISA-f est le sol qui profite le mieux d'une augmentation de la disponibilité en eau (voir [3.3](#)). A Nara la probabilité d'une utilisation non-rentable d'engrais est élevée; sans billons elle devient 46-50% à Niono (RVC 2 à 4), 38-42% à Ségou et 5-8% à Koutiala, avec billons la probabilité devient respectivement 35-39, 22-24 et 4-10%.

Pour les trois meilleurs sols qui suivent SALI, le risque que l'engrais azoté ne sera pas rentable en respectant la dose optimale économique pour un RVC de 2 à 4 est sans billons 40-50% à Nara, 28-40% à Niono, 10-22% à Ségou et 0,1-15% à Koutiala.

Pour les sols à ruissellement fort (Tableau 1), la probabilité d'une utilisation non-rentable d'engrais azoté est même encore élevée à Koutiala ($\geq 40\%$) avec les prix actuels sans l'utilisation des billons cloisonnés. Avec des billons le risque devient 20-30% à Koutiala; à Nara la chance d'une utilisation rentable de l'engrais reste négligeable sur de tels sols, malgré l'utilisation des billons cloisonnés.

3.7. Extrapolation de la production du Sorgho

Cette étude visait à analyser les potentialités des cultures sur différents sols de la zone Soudano-Sahélienne. L'étude est réalisée en prenant le sorgho comme culture représentative. Comme cela a déjà été noté, avec les résultats obtenus pour le sorgho il serait possible de faire une extrapolation sur d'autres cultures. Pour convertir les produits photosynthétiques en produits végétaux, une certaine quantité d'énergie est utilisée. Cette quantité dépend de la composition des différents organes de la plante. Pour bon nombre de cultures, on connaît la composition des différents organes ainsi que les coûts énergétiques de la conversion (Penning de Vries *et al.*, 1989). Vous trouverez ci-après un exemple d'extrapolation de rendement du sorgho en un rendement de culture de légumineuses et de culture de graminées.

Pour un rendement aérien de $15.000 \text{ kg ha}^{-1}$ de sorgho et un indice de récolte de 0,33, on obtient $10.000 \text{ kg ha}^{-1}$ de paille et 5.000 kg ha^{-1} de grains. La quantité de produits photosynthétiques à la base de cette production pourrait être calculée à l'aide des facteurs de conversion. Il faut 1,49 kg de glucose pour 1 kg de paille environ, et il faut 1,43 kg de glucose pour 1 kg de grain environ. Ces quantités prennent pour base la composition des organes pour une croissance optimale. La quantité totale de glucose nécessaire pour une telle croissance est : $10.000 * 1,49 + 5.000 * 1,43 = 22.050 \text{ kg}$.

De plus, une certaine quantité de glucose est utilisée pour la respiration de maintenance. En ce qui concerne les cultures céréalières et graminéenne, cette quantité est d'environ $0,015 \text{ kg de glucose kg}^{-1}$.

produit végétal j^{-1} ; pour les cultures légumineuses, elle est de : $0,025 \text{ kg glucose kg}^{-1} \text{ végétal } j^{-1}$. En supposant une période de croissance de 100 jours, pour la production de $15.000 \text{ kg ha}^{-1}$ de sorgho, la quantité utilisée pour la maintenance était de 11.250 kg de glucose environ, ce qui représente approximativement 51% de la quantité de glucose disponible pour la production. Par conséquent, la quantité de glucose photosynthétisé en période de production était : $22.050 + 11.250 = 33.300 \text{ kg ha}^{-1}$.

Sur la base de cette dernière quantité de glucose, on pourrait calculer la production d'une culture herbacée ou légumineuse. Pour une culture herbacée avec la même période de croissance et en supposant des conditions optimales pour une production optimale, la quantité de glucose nécessaire pour 1 kg de biomasse est $1,49 \text{ kg}$ ce qui est pareil à la quantité nécessaire pour 1 kg de paille du Sorgho. Il est donc supposé que la culture herbacée restera végétative.

La production de la culture herbacée pourrait être calculée comme suit :

$1,49*Y + (0,015*100*Y)/2 = 33.300 \text{ kg glucose ha}^{-1}$, où Y est la production aérienne. La production herbacée est donc $14.866 \text{ kg ha}^{-1}$. Cette production est un peu moindre que la production du Sorgho. Mais elle est fortement déterminée par la composition du produit végétal et c'est donc conclu que la production herbacée est plus ou moins pareil à celle du Sorgho.

Pour une culture légumineuse avec une période de croissance de 100 jours, la quantité de glucose nécessaire pour 1 kg de biomasse atteint environ $1,65 \text{ kg}$. Cette valeur est plus grande que la valeur des cultures non-légumineuses malgré que la composition ne diffère pas beaucoup. Cependant les coûts de conversion sont un peu supérieur par suite des demandes élevées d'énergie pour la fixation et la réduction de l'azote, comparées à l'absorption directe de l'azote minéral du sol. En faisant le même type de calcul qu'avec la culture herbacée la production aérienne est donc $11.483 \text{ kg ha}^{-1}$ ($1,65*Y + (0,025*100*Y)/2 = 33.300$), soit 23% inférieur à la production du Sorgho.

4. Discussion

La simulation apparaît comme un outil indispensable pour ce prononcer d'une question comme celle du risque à courir par les paysans en utilisant de l'engrais : a) les combinaisons « sol x climat x pluviosité annuelle » sont trop nombreuses pour des testes sur le terrain ($96 \times 31 = 2976$ cas étudiés par cette seule étude; voir 2); et b) il y a trop de facteurs qui jouent un rôle et qui peuvent se renforcer et s'opposer, pour être apte de se prononcer par un simple raisonnement (voir [3.1](#)).

Malgré le fait que le modèle utilisé est assez bien validé, il faut utiliser les résultats avec prudence. Plusieurs suppositions et le choix de plusieurs paramètres risquent d'avoir une influence sur les résultats obtenus. Cette conséquence ne pourra pas être quantifiée sans étude approfondie, mais il sera en général possible d'indiquer si elle est positive ou négative. Quelques exemples claires seront mentionnées :

- Pour simplifier l'analyse, on suppose que tout les sols se trouvent dans une position horizontale et qu'ils

ne reçoivent aucun apport hydrique (2.1). Les résultats ne refléteront pas la réalité dans ce cas pour les sols que l'on trouve en général sur des pentes, et pour ceux que l'on trouve plutôt dans des dépressions. Ainsi il faut s'attendre à des doses optimales économiques et des probabilités d'utilisation rentable d'engrais plus basses pour les sols squelettiques (SU, SU-inc, GR, GR-su et LISA-f), car ces sols sont trouvés dans des zones à relief notable et le ruissellement y est déjà non négligeable en position horizontale (Tableau 1). Ceci sera notamment le cas sans l'utilisation des billons cloisonnés, mais l'utilisation de tels billons y ne sera pas si simple et ainsi plus chère qu'ailleurs. De l'autre côté, les sols IN-ar et IN-li sont en général inondés. Le risque de l'utilisation d'engrais y ne dépendra pas de la disponibilité en eau comme supposé, mais plutôt de la possibilité de gérer l'inondation. Et les sols LIAR et LI pourront se trouver dans des dépressions, où ils reçoivent de l'eau des unités avoisinantes. Si cet apport peut être géré (systèmes de drainage par exemple), le risque d'une utilisation non-rentable d'azote y sera bien moindre que suggéré.

- Nous ne disposons pas des données détaillées concernant le rapport entre la force avec laquelle le substrat retient l'eau près du point de flétrissement et la germination. Il est possible que la germination du sorgho n'est pas bien décrite, et il est vraisemblable que ce rapport diffère entre les espèces (Elberse & Breman, 1990).

- Il a été signalé déjà que le choix de faire les simulations pour une situation d'équilibre, à atteindre après une période assez longue d'un même niveau de fertilisation annuelle et d'une gestion fixe de la matière organique, cause une divergence vraisemblable de la réalité. Ceci en particulier par le fait que le manque de données de la pratique sahélienne à mener au choix d'un niveau fixe de C et de N égal dans tous les sols. Il s'agit peut-être d'une sous-estimation pour les doses élevées d'engrais, il s'agit certainement une surestimation pour le contrôle et les doses basses (2.1).

- La réalisation des billons cloisonnés et l'augmentation de la pluviosité causent dans les simulations pour certains sols (légers et/ou peu profonds) une perte d'azote par lessivage et ainsi d'une diminution du coefficient d'utilisation (3.5). Dans la pratique il est bien possible de lutter contre telles pertes par un dosage fractionné de l'engrais. Le risque que l'engrais n'est pas rentable est dans ce cas moins grand que le risque simulé pour les sols GR, GR-su, SA et SALI.

- Les résultats obtenus sont liés aux variétés dont la longueur de cycle a été choisi en tenant compte de la pluviosité moyenne (2.1). Il est vraisemblable que les risques estimés sont trop élevés en utilisant des espèces fourragères indéterminées.

Une conséquence pratique de ces incertitudes est que l'on sera obligé de tester les résultats en pratique par des essais. Mais il est à conseiller de se limiter au moins d'abord aux cas où on a enregistré la possibilité de l'utilisation d'une dose (assez) importante d'engrais azoté sans courir trop de risque et sans d'investissements chers dans les mesures de conservations des eaux et du sol, en tenant compte des prix d'engrais et de fourrage. Les prix différents de ceux utilisés ne seront pas un problème, il suffit de calculer le RVC en estimant la valeur de RVC* pour le sol et le climat en question (voir [3.5](#) et Groot & Koné, en prép.). Les valeurs obtenues pour les meilleurs sols dépassent bien celles trouvées par

[Wooning \(1992\)](#) au démarrage du projet, quand l'utilisation de l'engrais ne se payait pas du tout. Mais l'utilisation apparaît actuellement même bien plus intéressant qu'en fin des années '70 ([Penning de Vries & Djitèye, 1991](#)).

Bien que l'extrapolation de production obtenue avec le sorgho vers d'autres cultures donne une idée raisonnable, comme indiqué ci-dessus, il convient d'être aussi prudent dans l'application d'une telle extrapolation. La production dépend de plusieurs facteurs dont l'effet sur les différentes cultures n'est pas toujours identique. Une exemple est la production d'une légumineuse comme le niébé, dont la position de feuilles et la croissance rampante mène à un couvert du sol complet à une indice de surface foliaire relativement basse. L'absorption maximale de lumière sera ainsi bien moindre qu'en cas de sorgho, et ainsi la croissance potentielle.

5. Conclusions

1. La simulation est une méthode efficace pour l'estimation du risque économique de l'utilisation d'engrais azoté pour l'amélioration de la situation fourragère au Sahel.
2. Les sols qui ont une réponse efficace sur la fertilisation azoté sont globalement aussi les sols dont la dose optimale économique est élevée et dont le risque que l'utilisation d'engrais ne sera pas rentable est relativement restreint.
3. Les sols les plus intéressants sont ceux qui absorbent bien l'eau de pluie, sans que la texture est si légère que la capacité de rétention d'eau devient trop basse, et qui ne sont pas trop superficiels. Dans la pratique des cultures pluviales il s'agit des sables-limoneux surtout, suivis des sols limono-sableux relativement grossiers et profonds. Des sols comme GR (et parfois même GR-su) sont trouvés entre SALI et LISA-g (voir Tableau 1) dans les analyses présentées, mais leur place est souvent dans des paysages avec du relief, un aspect négligé dans l'analyse. Ceci implique une sous-estimation du ruissellement, et ainsi une surestimation de l'intérêt de l'utilisation de l'engrais. En plus, le risque d'érosion en nappe sur tels sols est très élevé.
4. L'utilisation des billons cloisonnés doit être considérée pour les sols limoneuses de la savane soudanaise si l'utilisation d'engrais est considérée. Mais le risque que l'engrais ne sera pas rentable y restera plus élevé que sur les sables-limoneux et les limons-sableux.
5. Pour les meilleurs sols, les sables-limoneux, la dose optimale économique d'azote avec les prix actuels (300 F CFA par kg d'azote; 20 F CFA par kg de fourrage de qualité) et pour un RVC = 3, augmente d'à peu près 25 kg ha⁻¹ à 450 mm an⁻¹, à respectivement 40, 45 et 50 kg pour les isohyètes de 600, 700 et 1000 mm an⁻¹. Les rendements dont on pourra s'attendre sont 5, 7, 8 et 12 t ha⁻¹ de matière sèche, et le risque que cette fertilisation ne sera pas rentable diminue de 5 à 10% jusqu'à moins que 1% en allant de 450 à 1000 mm an⁻¹.

6. Pour les limons-sableux profonds et relativement grossiers les risques de fertilisation seront trop élevés pour les paysans du Sahel propre avec les prix actuels. En utilisant les billons cloisonnés ils deviennent acceptable dans la savane soudanaise. Ils diminuent de 20 à 1% en allant de 600 à 1000 mm, la dose optimale économique augmente parallèlement de 30 à 40 kg ha⁻¹, et le rendement de 7 à 12 t ha⁻¹.

Bibliographie

- Bationo, A., C.B. Christianson & M.C. Klaij, 1993. The effect of crop residue and fertilizer use on pearl millet yields in Niger. *Fertilizer Research* 34, 251-258.
- Dijksterhuis, G.H. & J.J. Neeteson, 1995. Situation actuelle et perspectives de la modélisation. Dans : *Interprétation agronomique des données des sols et le développement agricole*. AB-DLO Thema's 2.
- Dijksterhuis, G.H., 1996. La simulation de la croissance de Sorgho avec le modèle CP-BKF3 : une étude de la calibration et de la validation. (en prép).
- Driessen, P.M. , 1986. The water balance of the soil. Dans : H. van Keulen & J. Wolf (eds). *Modelling of agricultural production : weather, soils and crops*. Pudoc Wageningen. p. 76-116.
- Elberse, W. Th. & H. Breman, 1990. Germination and establishment of Sahelian rangeland species. II. Effects of water availability, *Oecologia* 85, 32-40.
- Groot, J.J.R. & D. Koné, en prep. Coefficient d'utilisation d'engrais. Dans : Breman, H. & K. Sissoko, *Intensification agricole au Sahel*. KARTHALA, Paris.
- Instituto del Tercer Mundo, 1993. *Third World Guide 1993/1994*. Uruguay.
- Kouyaté, Z. & C.W. Wendt, 1991. Gestion de l'eau et de la fertilité du sol au Mali. In : M.V.K. Sivakumar, J.S. Wallace, C. Renard & C. Giroux (eds). *Soil water balance in the Soudano-Sahelian zone*. Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991, IAHS Publication No. 19.
- Mokwunye, A.U. & L.L. Hammond, 1992. Myths and science of fertilizer use in the tropics. In : *Myths and science of soils of the tropics*, SSSA Special Publication No. 29.
- Nicou, R., B. Ouattara & L. Somé, 1990. Effets des techniques d'économie de l'eau à la parcelle sur les cultures céréalières (sorgho, maïs, mil) au Burkina Faso. *L'Agronomie Tropicale* 45, 43-57.
- Penning de Vries, F.W.T. & M.A. Djitèye, 1991. [La productivité des pâturages sahéliens. Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle](#). Agricultural Research Report 918. PUDOC, Wageningen. 525 p.

- Penning de Vries, F.W.T., D.M. Jansen, H.F.M. ten Berge & A. Bakema, 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Simulation monographs. Pudoc, Wageningen, 271 p.
- PIRT, 1983. Les ressources terrestres au Mali, volume II. PIRT, Bamako / TAMS, New York.
- Reyniers, F.N., S.F. Forest, 1990. La pluie n'est pas le seul remède à la recherche en Afrique. Les flux hydriques dans le système sol-culture-atmosphère en zone intertropicale. Sécheresse 1, 36-44.
- Reyniers, F.N. & L. Netoyo, 1994 Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale vers une gestion des flux hydriques par le système de culture. Séminaire international, bamako, 9-13 décembre 1991. John Libbey Eurotext, Paris. 415 p.
- Sedogo, P.M., 1993. Evolution des sols ferrugineux lessivés sous culture : incidence des modes de gestion sur la fertilité. These de doctorat, l'Université Nationale de Côte d'Ivoire. No. d'ordre 178/93.
- Sivakumar, M.V.K. & J.S. Wallace, 1991. Soil water balance in the Sudano-Sahelian zone : need, relevance and objectives of the workshop. In : M.V.K. Sivakumar, J.S. Wallace, C. Renard & C. Giroux (eds). Soil water balance in the Soudano-Sahelian zone. Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991, IAHS Publication No. 19.
- Verberne, E.L.J., G.H. Dijksterhuis, R.E.E. Jongschaap, H. Bazi, A. Sanou & M. Bonzi, 1995. Simulation des cultures pluviales au Burkina Faso (CP-BKF3); sorgho, mil et mais. AB-DLO, Nota 18, 53pp+Annexes.
- Wadleigh, C.H., W.A. Raney & D. Herschfield, 1965. The moisture problem. In : H. Pierre, D. Kirkham, J. Pesek & R.H. Shaw (eds). Plant environment and efficient water use. American Society of Agronomy and Soil Science of America, Madison, Wisconsin. p. 1-19.
- Wooning, A., 1992. [Les prix du bétail, de la viande, des produits laitiers et des engrais dans les pays sahéliens](#). Rapports PSS No. 1. IER, Bamako, DAN-UAW, Wageningen et AB-DLO, Wageningen/Haren. 63 p.

rendement, t ha⁻¹

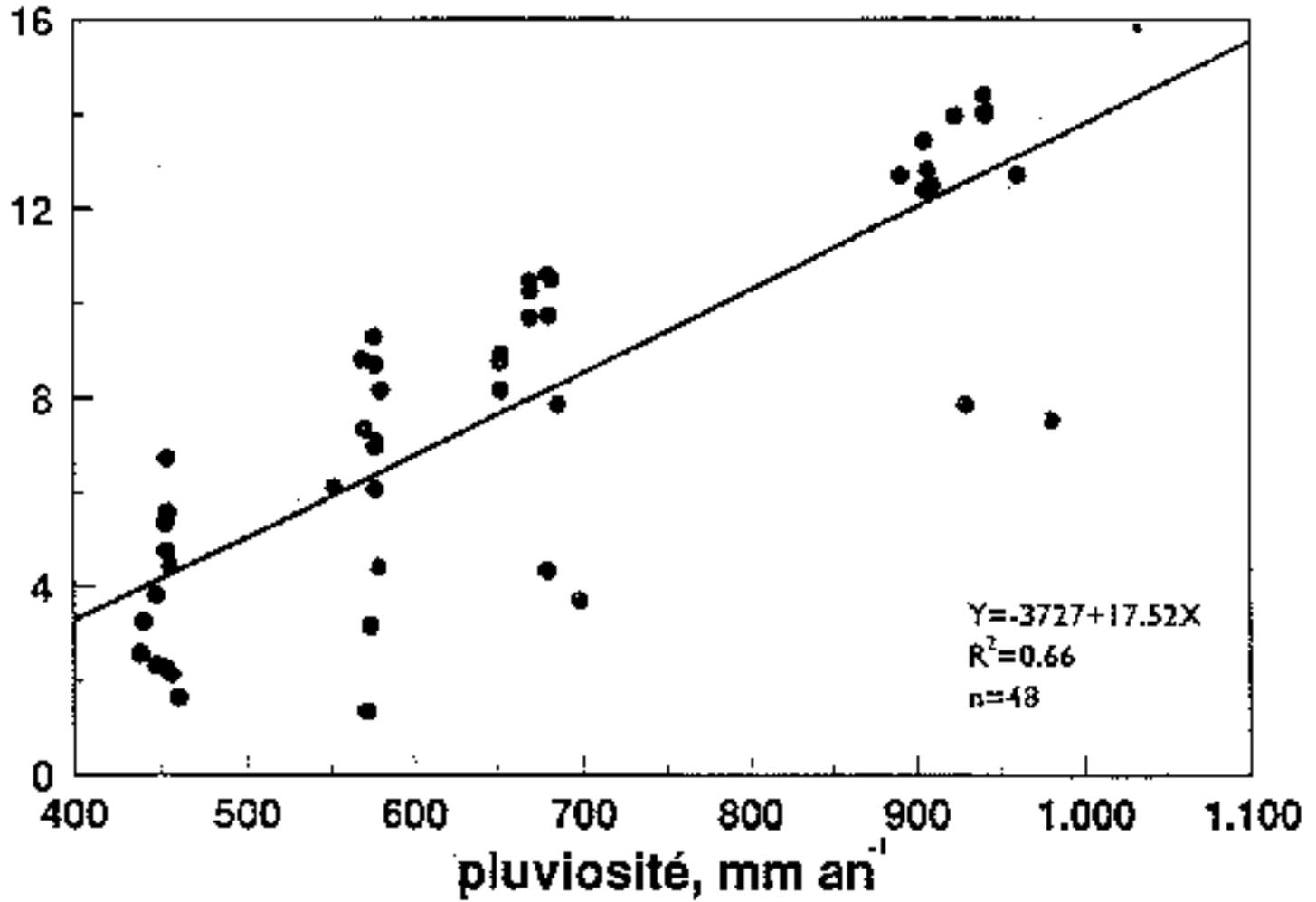


Figure 1. Les rendements moyens de la biomasse aérienne totale (matière sèche) sur 31 ans par site et par sol après fertilisation avec 120 kg ha⁻¹ d'azote en utilisant des billons cloisonnés.