

Suivi des dynamiques minérales, recommandations pour le plan et les modalités d'échantillonnage

Fiche Technique du R3S-PF2

CIRAD/IRAT Rapport N° P53
CABO Rapport N° 118

P. Siband¹⁾, H. van Keulen²⁾ & N. van Duivenbooden²⁾

Juin 1989



¹⁾ Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement / Institut de Recherches Agronomiques Tropicales (CIRAD/IRAT)
B.P. 5035, 34032 Montpellier, France

²⁾ Centre de Recherches Agrobiologiques (CABO)
B.P. 14, 6700 AA Wageningen, les Pays-Bas

TABLE DES MATIERES

AVANT PROPOS

1. INTERET DE SUIVI MINERAL : L'ANALYSE DES ACTIONS D'AZOTE ET DE PHOSPHORE DANS LA PRODUCTION AGRICOLE	1
1.1. INTRODUCTION	1
1.1.1. Pas toujours un problème de manque d'eau	1
1.1.2. Rôle d'azote et de phosphore	2
1.2. AMELIORATION PAR FERTILISATION	3
1.2.1. Action des engrais chimiques	3
1.2.2. Présentation des résultats	3
1.2.2.1. Relation absorption-rendement	4
1.3. RELATION APPLICATION-ABSORPTION D'AZOTE	6
1.3.1. Fertilité naturelle du sol	8
1.3.1.1. Effet du type de sol	11
1.3.1.2. Effet des conditions environnementales	11
1.3.1.3. Effet des techniques	11
1.3.1.4. Effet de la rotation	11
1.3.2. Coefficient d'utilisation apparente de l'engrais	12
1.3.2.1. Effet du type d'engrais	12
1.3.2.2. Effet de la méthode et le moment d'application	12
1.4. RELATION APPLICATION-ABSORPTION DE PHOSPHORE	14
1.4.1. Fertilité naturelle du sol	14
1.4.2. Coefficient d'utilisation apparente de l'engrais	16
1.5. CONCLUSIONS	18

2. CARACTERISATION DU SITE	19
2.1. CARACTERISTIQUES GENERALES	19
2.1.1. Caractéristiques géographiques	19
2.1.2. Caractéristiques climatologiques	19
2.2. CARACTERISTIQUES DE SOL	19
2.2.1. Caractéristiques pédologiques du site	19
3. CARACTERISATION DES CONDITIONS	
3.1. CARACTERISATION AU NIVEAU DU SOL	21
3.1.1. Problème de représentativité	21
3.1.2. Matériel nécessaire	21
3.1.3. Méthode de prélèvement	22
3.1.4. Traitement ultérieur des échantillons	22
3.1.5. Analyses minimales à demander	22
3.2. CARACTERISTIQUES AU NIVEAU DE LA CULTURE	23
3.2.1. Introduction	23
3.2.2. Sous-parcelle échantillonnage	23
3.2.3. Définition des échantillons élémentaires	24
3.2.4. Dates d'échantillonnage	24
3.2.4.1. Plantes à croissance définie : les céréales	24
3.2.4.2. Plantes à croissance indéfinie	25
3.2.5. Mode de prélèvement	25
3.2.5.1. Observations	25
3.2.5.2. Récolte et "décontamination"	26
3.2.5.3. Conditionnement	26

3.2.6. Analyses	26
3.2.6.1. Préparation	26
3.2.6.2. Fixation et conservation	27
3.2.6.3. Traitement ultérieur	28
4. CARACTERISATION DES APPORTS DE MATIERE ORGANIQUE	29
4.1. BUT DES ESSAIS	29
4.2. ANALYSES NECESSAIRES	29
4.2.1. Analyses chimiques	29
4.2.2. Analyses physiques	29
4.3. NOMBRE D'ECHANTILLONS	30
5. EXEMPLES ADDITIONNELS	31
5.1. EFFET DE LA COMPOSITION ET DE LA QUANTITE DE FUMURE	31
6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	32

Résumé

Ce rapport montre que les résultats des expériences d'engrais peuvent être interprétés plus significativement si l'absorption des éléments nutritifs, notamment azote et phosphore, par les cultures est connue aussi. Les relations application - absorption d'azote et telle de phosphore ont été discutées. En suite, l'échantillonnage et les analyses nécessaires au niveau du sol, de la culture et du matériel organique apporté ont été traitées. Les résultats de telles analyses nous permettent de nous prononcer sur les quantités des éléments nutritifs disponibles des sources naturelles, de juger l'efficacité des engrais chimiques et de déterminer si l'élément a été vraiment limitatif pour la production primaire.

Samenvatting

In dit rapport wordt aangetoond dat de resultaten van bemestingsproeven beter kunnen worden geïnterpreteerd, indien van het gewas de chemische samenstelling, met name het gehalte aan stikstof en fosfor, wordt bepaald. Het verband tussen kunstmestgift en opname wordt besproken voor zowel stikstof als fosfor. Tevens worden de bemonsteringstechniek en de benodigde analyses van bodem, gewas en organische mest besproken. Op grond van de resultaten van deze analyses kan een uitspraak worden gedaan over de natuurlijke vruchtbaarheid van de bodem, de efficiëntie van de mestgift en de meest limiterende nutriënt voor primaire produktie.

AVANT PROPOS

Au cours de l'atelier du R3S-PF2 (parcelle) tenu à Bouaké, Côte d'Ivoire en avril 1989, l'importance des mesures additionnelles concernant les éléments nutritifs a été discutée et incluse dans les recommandations générales. Dans cette fiche technique "les aspects minéraux" seront traités en détail.

0101
-012
0112
01

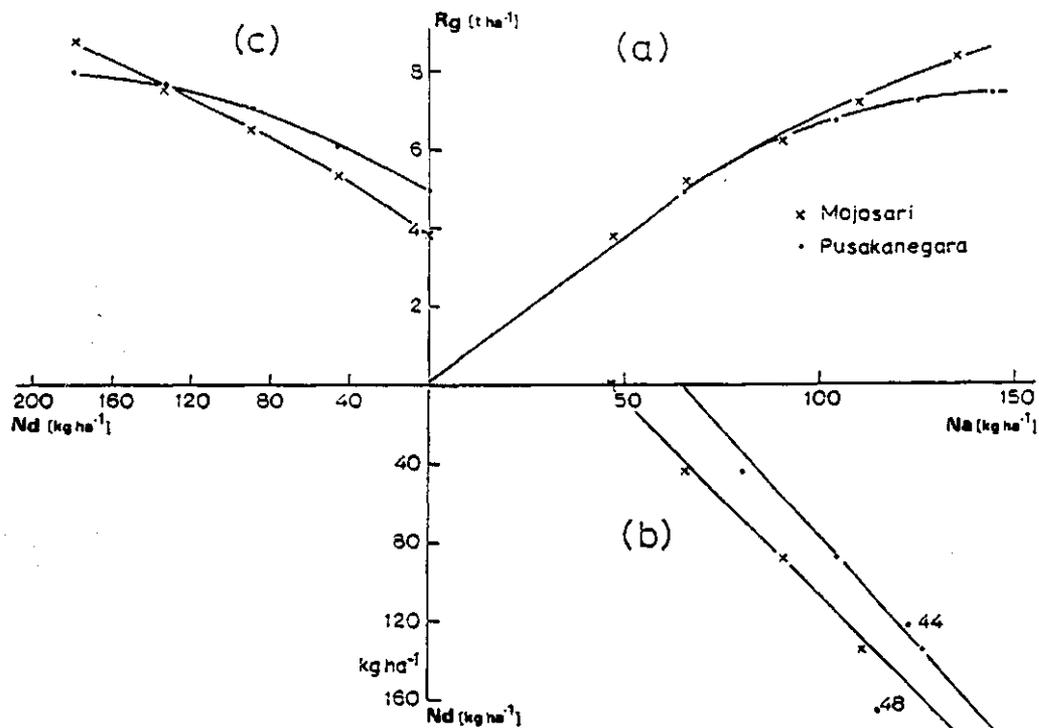


Fig. 2. Relation entre l'absorption d'azote (N_a) et le rendement en grain (R_g) (a), entre l'apport d'azote et sa absorption par la culture (b) et l'apport d'azote (N_d) et le rendement en grains (c) pour des cultures de riz au Java (van Keulen, 1977).

Cette figure présente trois relations.

- Le quadrant (a) montre la relation entre le rendement économique et la quantité totale absorbée par la culture (partie 1.2.2.1).
- Le quadrant (b) donne la relation entre la quantité d'élément appliquée et son absorption par la culture (partie 1.3 pour le N et partie 1.4 pour le P).
- Le quadrant (c), composé des deux autres par l'élimination de l'absorption, présente la relation commune, la courbe de réponse, c'est-à-dire le rendement en fonction de la quantité de l'élément appliquée. Il n'est pas traité séparément parce qu'il suit donc de la combinaison des deux autres relations.

1.2.2.1. Relation absorption-rendement

L'exemple donné à la figure 2, étant représentatif de la majorité des expériences d'engrais, montre qu'il existe une relation proportionnelle entre l'absorption et le rendement sous des conditions d'absorption faible. Cette proportionnalité est la conséquence du fait que sous des conditions de disponibilité

limitée d'un élément nutritif, le taux de cet élément dans le tissu aboutit à une valeur limitative. Donc, il est impossible d'arriver à des taux inférieurs à moins de remobiliser l'élément des structures végétatives. La conséquence est que chaque unité de N ou de P absorbé augmente le rendement avec la même quantité.

Des analyses extensives des relations entre l'absorption des éléments nutritifs et le rendement (van Keulen, 1986 ; van Keulen, 1982 ; van Keulen & van Heemst, 1981 ; van Keulen, 1977) 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, et est indépendante des conditions environnementales, la forme d'engrais utilisée, ou le mode d'application. Des valeurs typiques sont présentées au Tableau 1.

Tableau 1. Valeurs typiques de l'efficacité d'utilisation des éléments N et P (augmentation de poids matière sèche du rendement économique par kg d'éléments absorbés).

espèce	produit	N	P
céréales	grains	70	600
pommes de terre	tubercules	100	600
betterave à sucre	sucre	80	430

L'efficacité d'absorption pour ces cultures est exprimée en termes des rendements économiques, c'est-à-dire, les organes de stockage. Pour une végétation naturelle constituée d'espèces annuelles, 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 de développement phénologique la concentration limitante d'un élément diminue, donc l'efficacité d'utilisation augmente (figure 3).

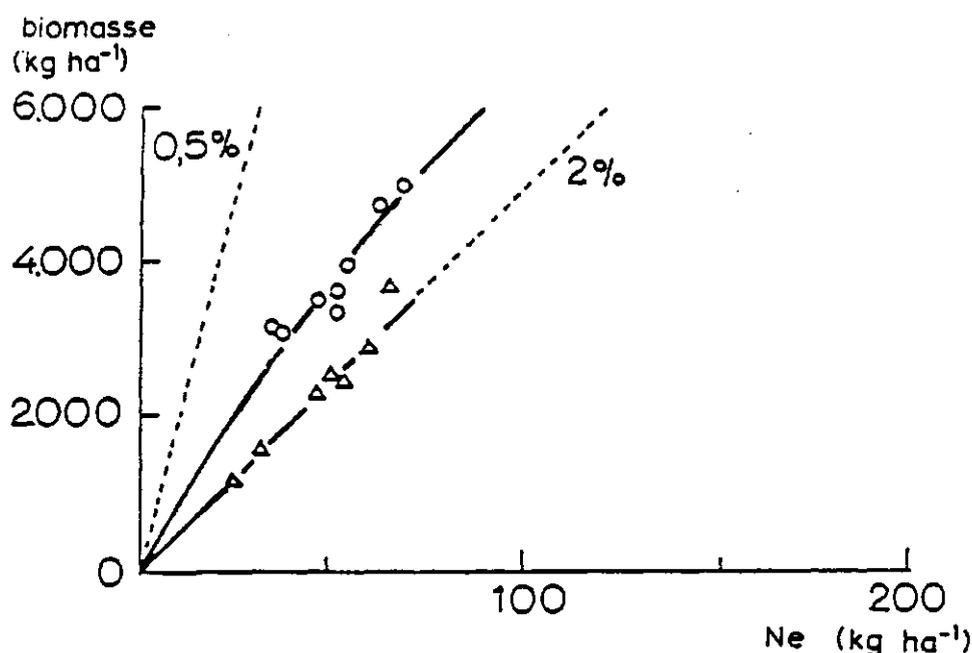


Fig. 3. Relation entre la quantité de N absorbée (N_e) et la production de biomasse formée de *Schoenefeldia gracilis* au Mali en 1978 avec une fumure azotée ; les Δ représentent les récoltes à la floraison (5 sept.) et les \circ au stade de maturité (20 sept.) (adapté de Penning de Vries & Djitéye, 1982).

Si l'absorption des éléments nutritifs augmente, la relation entre absorption et rendement s'écarte de la linéarité, aboutissant à des concentrations plus élevées dans les organes de la cultures : dans les organes économiques de même que dans les résidus. Finalement la courbe atteint un niveau constant, indiquant que l'élément considéré n'est plus le facteur limitatif pour la croissance. La valeur de ce plateau est déterminée par le facteur le plus limitatif, et sous conditions de "croissance potentielle" (c'est-à-dire aucune restriction pour la croissance) est fonction de la disponibilité de l'énergie solaire.

1.3. RELATION APPLICATION-ABSORPTION D'AZOTE

La relation entre la quantité d'azote appliquée par engrais chimiques et absorption par la culture est une ligne droite pour toutes les doses appliquées. Une telle relation est représentative de la majorité des expériences d'engrais azoté (van Keulen & van Heemst, 1981 ; van Keulen, 1977).

Une telle proportionnalité indique que les processus dans lesquels l'azote est impliqué dans le sol sont de premier ordre, c'est-à-dire que leurs vitesses sont proportionnelles aux concentrations de l'élément dans la solution du sol. Si des quantités d'engrais extrêmement élevées sont appliquées, la capacité d'absorption et de synthèse de la végétation sera limitative, et la relation entre application et absorption montre une discontinuité (figure 4).

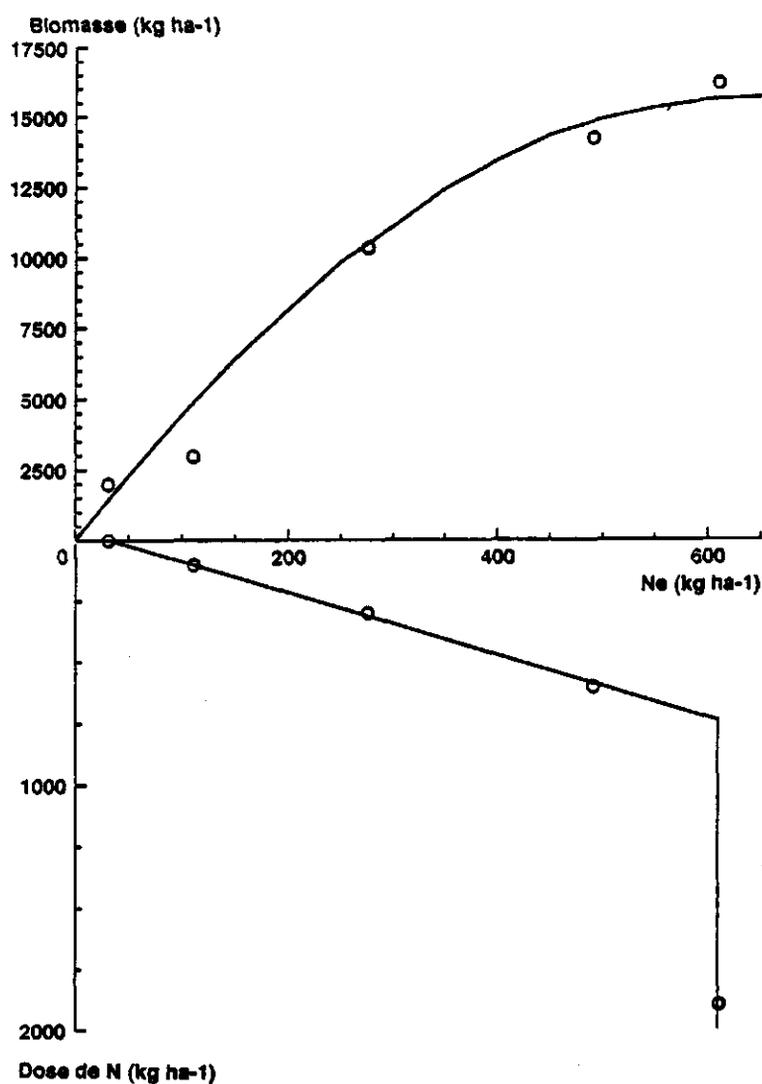


Fig. 4. Relation entre l'absorption d'azote (Ne) et le rendement et entre l'apport d'azote et son absorption par *Cynodon dactylon* en Rhodesia (Weinmann, 1964).

En général, la relation peut être caractérisée par deux paramètres : le point d'intersection avec l'axe horizontal et la pente. Le premier paramètre représente la fertilité naturelle du sol, i.e. la quantité d'azote dérivant des sources naturelles, comme la matière organique du sol, la précipitation, etc. Le deuxième paramètre représente le coefficient d'utilisation apparent de l'engrais, i.e. le rapport entre la quantité absorbée et la dose appliquée. Les valeurs des deux paramètres montrent des variations importantes.

1.3.1. Fertilité naturelle du sol

L'absorption sans application d'engrais est d'un côté une caractéristique du sol, déterminée par la quantité et la qualité de la matière organique. D'un autre côté, 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 l'immobilisation associée. En outre, la gestion joue un rôle par le niveau d'amélioration du sol, rotation des cultures et l'application précédente de l'engrais (appelé ensemble comme "l'histoire du champ"). Il est impossible de traiter tous ces aspects dans cette fiche, mais des exemples sont donnés aux figures 5 et 6.

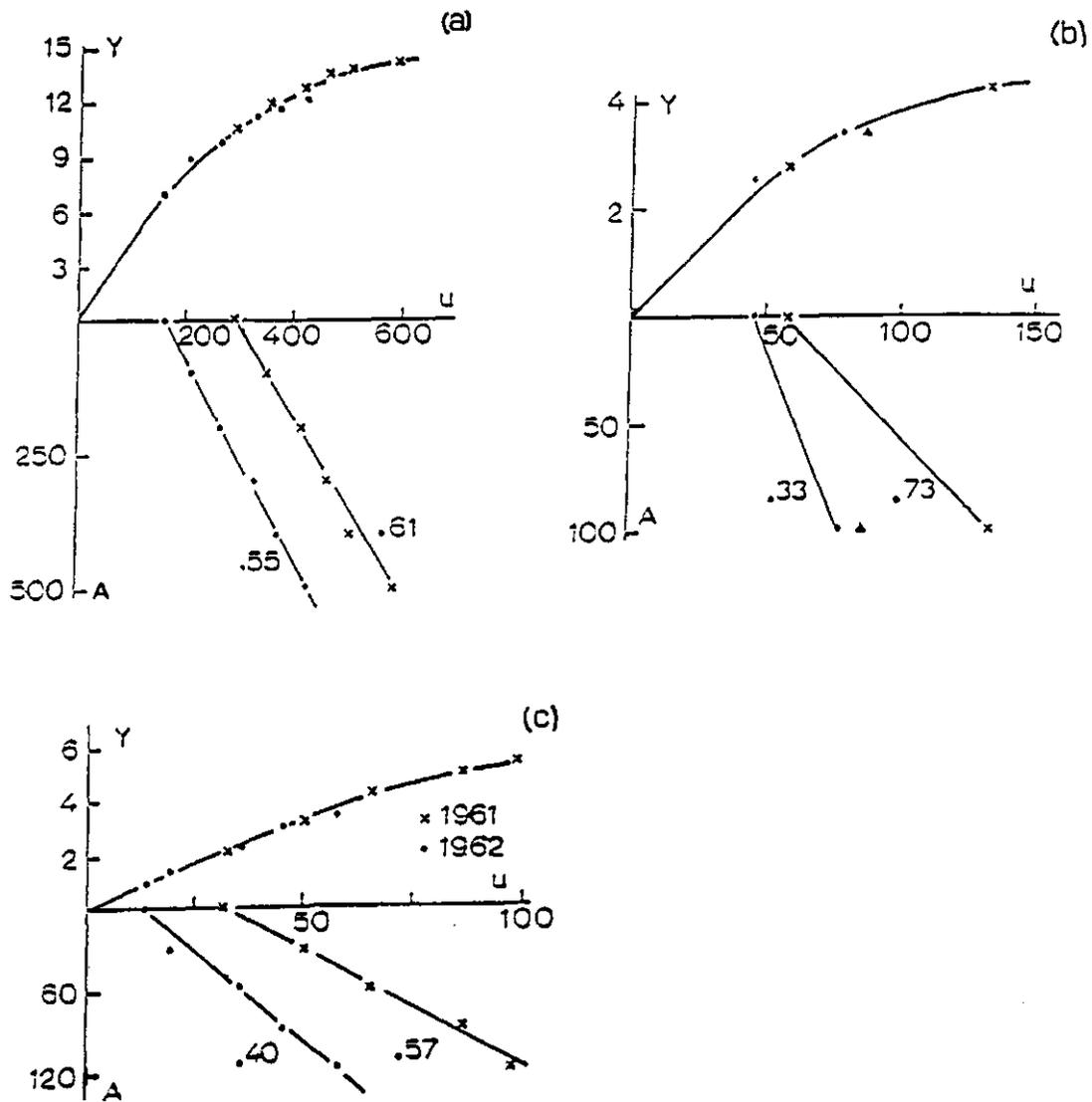


Fig. 5. Relation entre l'absorption d'azote (u) et le rendement (Y) et entre l'apport d'azote (A) et son absorption par la culture.

a) Pâturage permanent, Pays-Bas (van Steenberg, 1977) ; Y en tonnes de matière sèche par ha, u et A en kg ha^{-1} ; x sol sableux, • sol tourbeux ;

b) Blé d'hiver, Allemagne (Köhnlein, 1972). Y en tonnes de grain par ha (12% d'humidité), u et A en kg ha^{-1} ; • pluies d'hiver naturelles, x pluies d'hiver interceptées ;

c) Pâturage permanent, Pays-Bas (Oostendorp, 1964) ; Y en tonnes de matière sèche par ha, u et A en kg ha^{-1} .

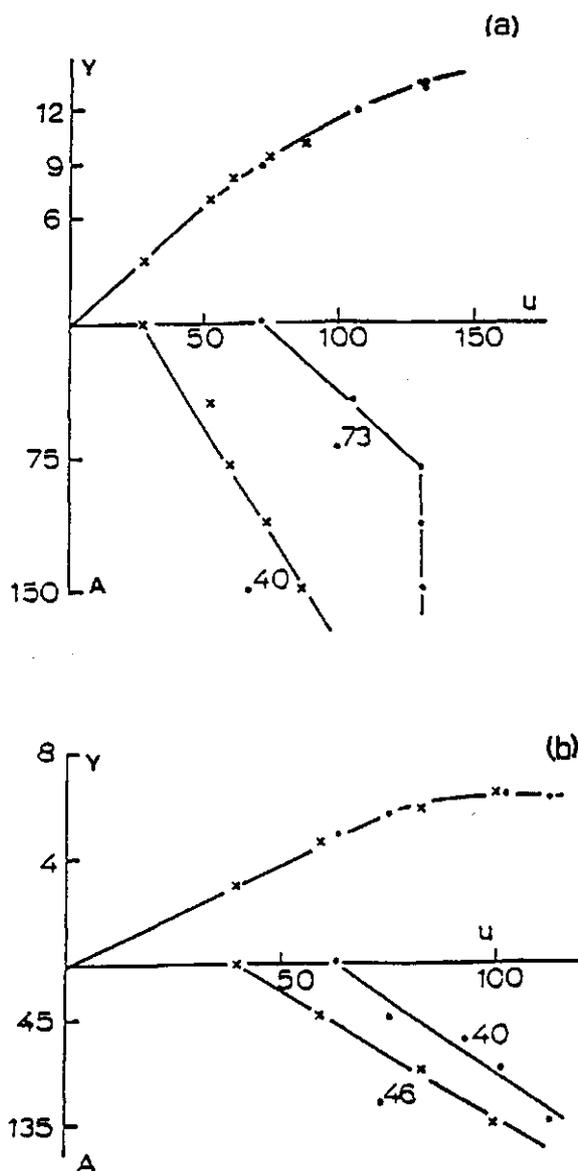


Fig. 6. Relation entre l'absorption d'azote (u) et le rendement (Y) et entre l'apport d'azote (A) et son absorption par la culture.

a) Blé d'hiver, Pays-Bas (Sieben, 1974) ; Y en tonne de grain par ha (15% d'humidité), u et A en kg ha^{-1} ; x sans drainage, \bullet avec drainage ;

b) Riz irrigué, Etats Unis (Williams et al., 1972) ; Y en tonne de grain par ha (15% d'humidité), u et A en kg ha^{-1} ; x sans enfouissement des légumineuses, \bullet avec enfouissement des légumineuses.

1.3.1.1. Effet du type de sol

La figure 5a donnant des résultats relatifs aux pâturages permanents aux Pays-Bas, montre l'influence du type de sol sur l'absorption de l'azote sans application de l'engrais. Le sol sableux, qui a un taux de matière organique relativement faible (ca. 2%), fournit cependant une quantité d'azote d'environ 160 kg ha⁻¹ an⁻¹. Cette quantité élevée est la conséquence d'application du fumier sur toutes les parcelles. Le terrain tourbeux, qui a un taux de matière organique élevée (10%) fournit quant à lui presque 300 kg ha⁻¹ an⁻¹.

1.3.1.2. Effet des conditions environnementales

Les figures 5 b et 5c donnent des résultats relatifs au blé d'hiver en Allemagne et à la première fauche d'un pâturage permanent aux Pays-Bas, respectivement. Dans le blé, l'interception complète de la précipitation d'hiver par des protections, a effectué une augmentation de l'absorption de l'azote "naturel" de 30%, due à une diminution de lessivage.

La figure 5c montre l'effet combiné de la température et de l'humidité du sol. En 1961, le printemps était caractérisé par des températures relativement élevées, favorisant une minéralisation rapide, et une précipitation relativement basse, prévenant dénitrification et lessivage. Par contre, au printemps 1962 les températures étaient relativement basses et la précipitation relativement élevée, résultant dans une absorption de base d'azote moins que la moitié de la saison précédente.

1.3.1.3. Effet des techniques

La figure 6a montre que l'amélioration de terre par drainage résulte dans une augmentation de disponibilité de l'azote des sources naturelles pour la culture de blé d'hiver de 30 à 70 kg ha⁻¹. La cause la plus importante est probablement la diminution des pertes par dénitrification, mais aussi une activité des racines plus élevée par rapport à l'amélioration des conditions d'aération est probable.

1.3.1.4. Effet de la rotation

La figure 6b montre pour une culture de riz aux Etats Unis, que l'enfouissement d'une culture d'une légumineuse, semée en automne, avant la transplantation du riz, augmente l'absorption de l'azote naturel de 50%.

Les exemples donnés montrent que la quantité d'azote des 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 (partie 3.1), des conditions environnementales (la pluviosité et la température) et les mesures culturelles dans chaque situation.

1.3.2. Coefficient d'utilisation apparente de l'engrais

La fraction de l'engrais azoté absorbée par la culture est influencée partiellement par les mêmes conditions portant sur l'absorption de l'azote des 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". Les exemples, présentés aux figures 5 et 6, montrent bien ce phénomène : à l'exception d'un cas, une absorption plus élevée de l'azote naturel est accompagnée par un "recouvrement" plus élevé de l'engrais. Ceci est en accord avec les résultats des expériences sur pâturages permanents sous conditions tempérées (Brockman et al., 1971).

1.3.2.1. Effet du type d'engrais

Le recouvrement de l'engrais chimique est fonction du type d'engrais appliqué, comme illustré par Figures 7a et 7b pour des conditions contrastées. Le blé d'hiver (Figure 7a) cultivé dans le polder de l'ancienne Mer Sud (Pays-Bas) utilise l'engrais nitrique 2,5 fois plus efficace que l'engrais ammoniacal. La différence vient de la différence de volatilisation de l'ammonium qui est plus élevée pour l'engrais ammoniacal sur ce sol riche en carbonate (pH 8,2). Par contraste, le recouvrement de l'engrais nitrique est plus bas que ce de l'urée pour la végétation naturelle en sol argileux et en conditions sahéliennes (figure 7b). Dans ces conditions la cause la plus importante des pertes est la dénitrification pendant des périodes d'inondation temporaires due à l'écoulement des pluies d'une forte intensité, qui est plus importante pour l'engrais nitrique.

1.3.2.2. Effet de la méthode et le moment d'application

L'effet de la méthode d'application est illustré par la Figure 7c, portant sur une culture du riz irriguée à l'île de Java. Placement de l'engrais de l'urée à la profondeur d'environ 0,2 m directement à la couche anaérobée, prévient la transformation de l'ammonium en nitrate, et donc les pertes subséquentes par dénitrification. Si l'urée est appliquée dans la lame d'eau couvrant le sol, la présence d'oxygène dans l'eau provoque la nitrification, et les nitrates résultants sont transportés vers la couche anaérobée soit par lessivage, soit par diffusion, après quoi la dénitrification cause des pertes rapides, donc la disponibilité pour la culture baisse.

L'application fractionnée d'engrais généralement a pour effet une augmentation du recouvrement, parce que le besoin de la culture en azote s'élève au cours du cycle de croissance, ce qui résulte dans un temps de séjour de l'élément dans le sol moins long, donc des risques de pertes plus faibles. Ce phénomène est illustré par la Figure 7d portant sur une culture de riz irrigué au Sri Lanka (en général on ne trouve qu'une seule dose d'application dans des expériences étudiant l'effet de fractionnement).

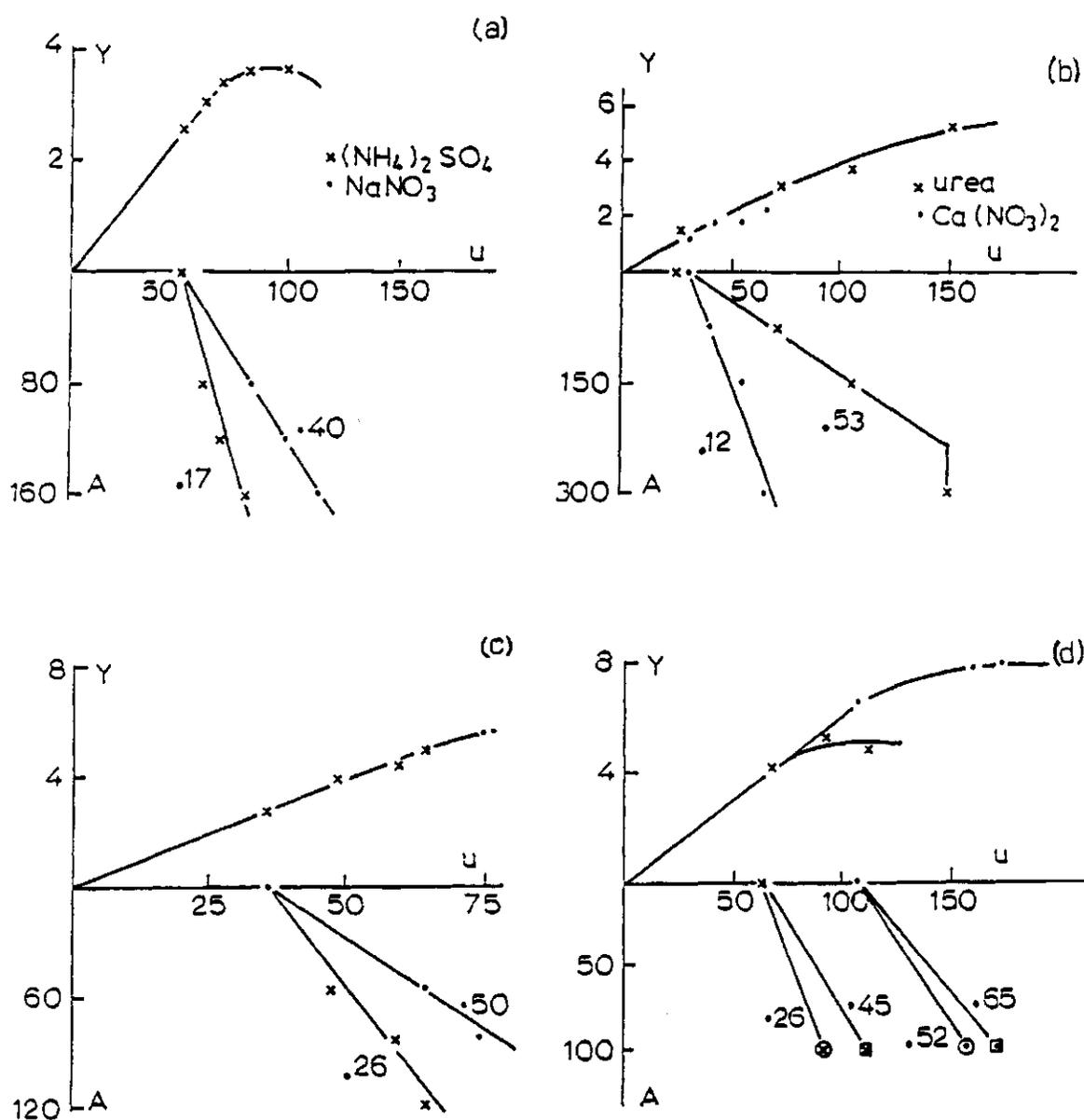


Fig. 7. Relation entre l'absorption d'azote (u) et le rendement (Y) et entre l'apport d'azote (A) et son absorption par la culture

(a) Blé d'hiver, Pays-Bas (Lehr, 1950) ; Y en tonnes de grain par ha (15 % d'humidité), u et A en kg ha^{-1} ;

(b) Pâturage naturel, Mali (Penning de Vries et al., 1981) ; Y en tonnes de matière sèche par ha, u et A en kg ha^{-1} ;

(c) Riz irrigué, Indonésie (Ismunadji & Sysmiyati, 1976) ; Y en tonnes de grain par ha, u et A en kg ha^{-1} ; x application au volant, • engrais placé

(d) Riz irrigué, Sri Lanka (Nagarajah et al., 1975) ; Y en tonnes de grain par ha, u et A en kg ha^{-1} ; o application de base, • application fractionnée ; x saison de pluies, • contre-saison

1.4. RELATION APPLICATION-ABSORPTION DE PHOSPHORE

Comme pour l'azote la relation entre application et absorption est caractérisée par une absorption en l'absence d'application d'engrais (phosphore fournis par des sources naturelles) et le recouvrement de l'engrais chimique appliqué.

1.4.1. Fertilité naturelle du sol

L'offre minérale est en partie une caractéristique du sol, déterminé par sa composition minéralogique et la quantité et qualité de sa matière organique. Un exemple est donné par la Figure 8a, qui compare un sol sableux et un sol tourbeux amélioré aux Pays Bas. Le dernier, avec un taux de matière organique plus élevé (6 versus 2 %) offre deux fois plus de phosphore pour la même culture la même année.

Des différences existent également entre des espèces et même entre des variétés, probablement liées à des caractéristiques racinaires. Le phosphore est relativement immobile dans le sol, donc une proportion élevée de l'absorption relève de l'interception qui est fortement liée à la vitesse de croissance en profondeur des racines et à leurs densités.

La quantité totale de phosphore dans le sol se trouve dans des composantes différentes et des transformations se déroulent continuellement. Les vitesses de transformation et le niveau d'équilibre sont déterminés par des conditions au sol, notamment la teneur en eau, la température et le pH. L'effet du pH est illustré dans la Figure 8b, qui montre qu'un chaulage sur sol acide latérique a pour effet une augmentation forte de quantité de P naturel absorbé.

Des variations entre des années différentes peuvent être attribuées probablement à des conditions environnementales variables (précipitation, température), comme illustré par la Figure 8c.

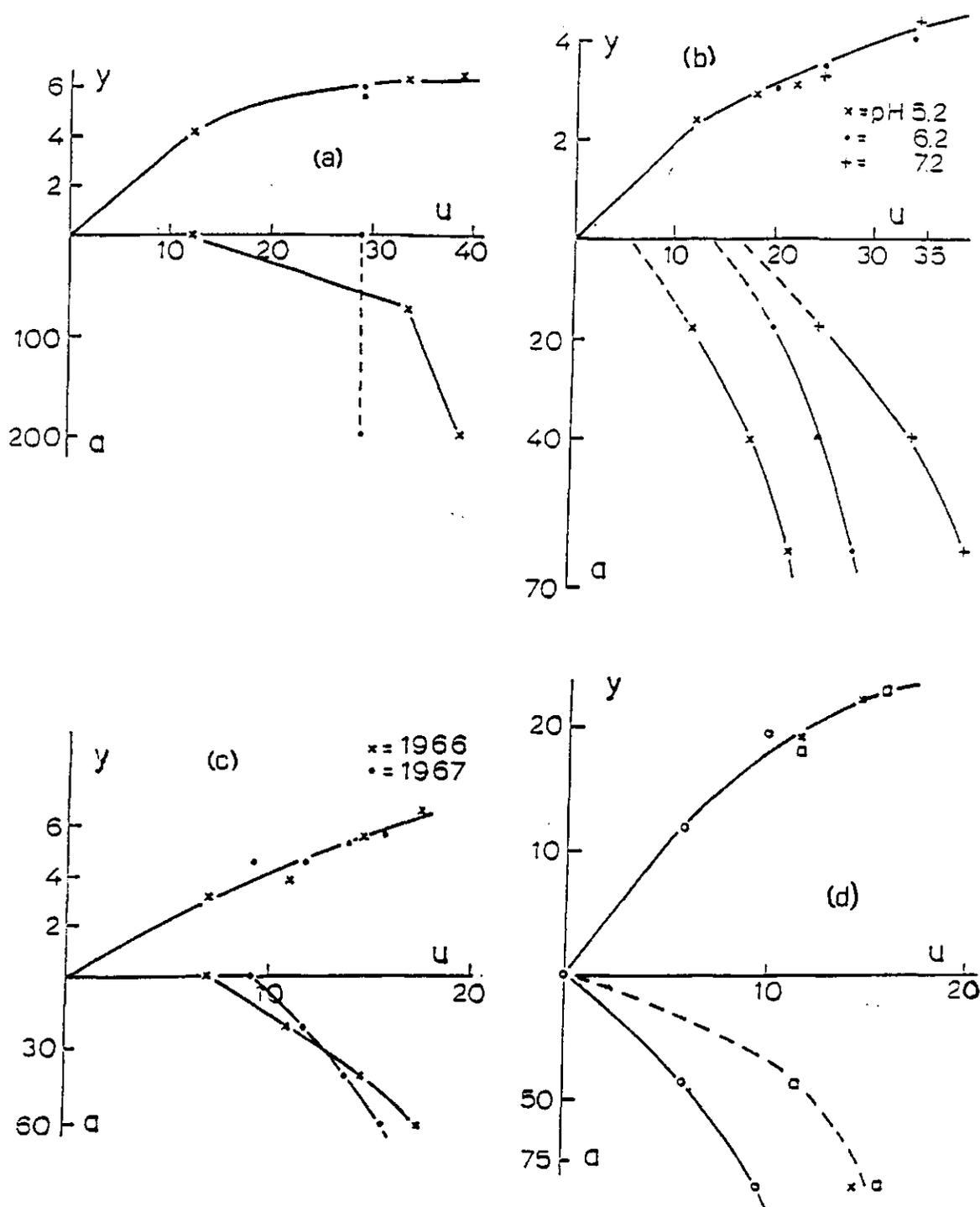


Fig. 8. Relation entre l'absorption de phosphore (u) et le rendement (Y) et entre l'apport de phosphore (A) et son absorption par la culture

a) Blé d'hiver, Pays Bas (van Italie, 1939) ; Y en tonnes de grain par ha (15 % d'humidité), u et a en $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, x sol sableux, • sol tourbeux

b) Blé de printemps, les Indes (Tripathi & Pande, 1971) ; Y en tonnes de grain par ha (12 % d'humidité), u et a en $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$

c) Riz irrigué, les Indes (Mahapatra & Panda, 1972) ; Y en tonnes de grain par ha (15 % d'humidité), u et a en $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$

d) Navettes, Royaume Uni (Cooke, 1957) ; Y en tonnes de matière fraîche par ha, u et a en $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$, o application au volant, x, ◻ engrais placé

1.4.2. Coefficient d'utilisation apparente de l'engrais

Pour les engrais phosphatés, la situation est plus complexe que pour les engrais azotés, comme montré par les Figures 8 et 9. Apparemment, les processus qui jouent un rôle dans la disponibilité de l'élément pour la culture, ne suivent pas des dynamiques de premier ordre, c'est-à-dire que les vitesses des processus ne sont pas simplement proportionnelles à la concentration de l'élément dans la solution. La conséquence est que la fraction absorbée par la culture de l'élément appliqué, varie selon la dose appliquée. Les processus d'absorption, précipitation et immobilisation enlèvent des ions de la solution du sol, donc 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, due au temps de séjour plus long dans le sol, qui a pour effet des pertes plus fortes par précipitation et immobilisation. Dans telles situations il est possible d'améliorer le recouvrement par placement de l'engrais dans un volume de sol limité, comme montré par de Wit (1953) et illustré par la figure 8d.

On peut trouver des situations particulières. Les résultats présentés aux figures 9a et 9b montrent une augmentation du recouvrement à des doses d'application plus élevées. Ce phénomène est typique sur des sols fixateur 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'adsorption, après quoi (donc à des doses d'application plus élevées) la concentration de phosphate dans la solution du sol augmente, ainsi que l'efficacité d'absorption.

Une autre situation est illustrée par les figures 9c et 9d où le recouvrement diminue d'abord, et ensuite augmente de nouveau à des doses plus élevées. Ce phénomène est probablement lié à la précipitation des phosphates insolubles (Fe, Al, Ca), qui d'abord augmente à des concentrations de phosphate plus élevées. Si 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 plus en détail la dynamique des phosphates. Cependant pour l'analyse présente cette distinction n'est pas importante.

Les résultats présentés ici montrent que le comportement du phosphore dans le sol est compliqué et qu'il est difficile de prédire quantitativement la disponibilité de l'élément sous des conditions différentes.

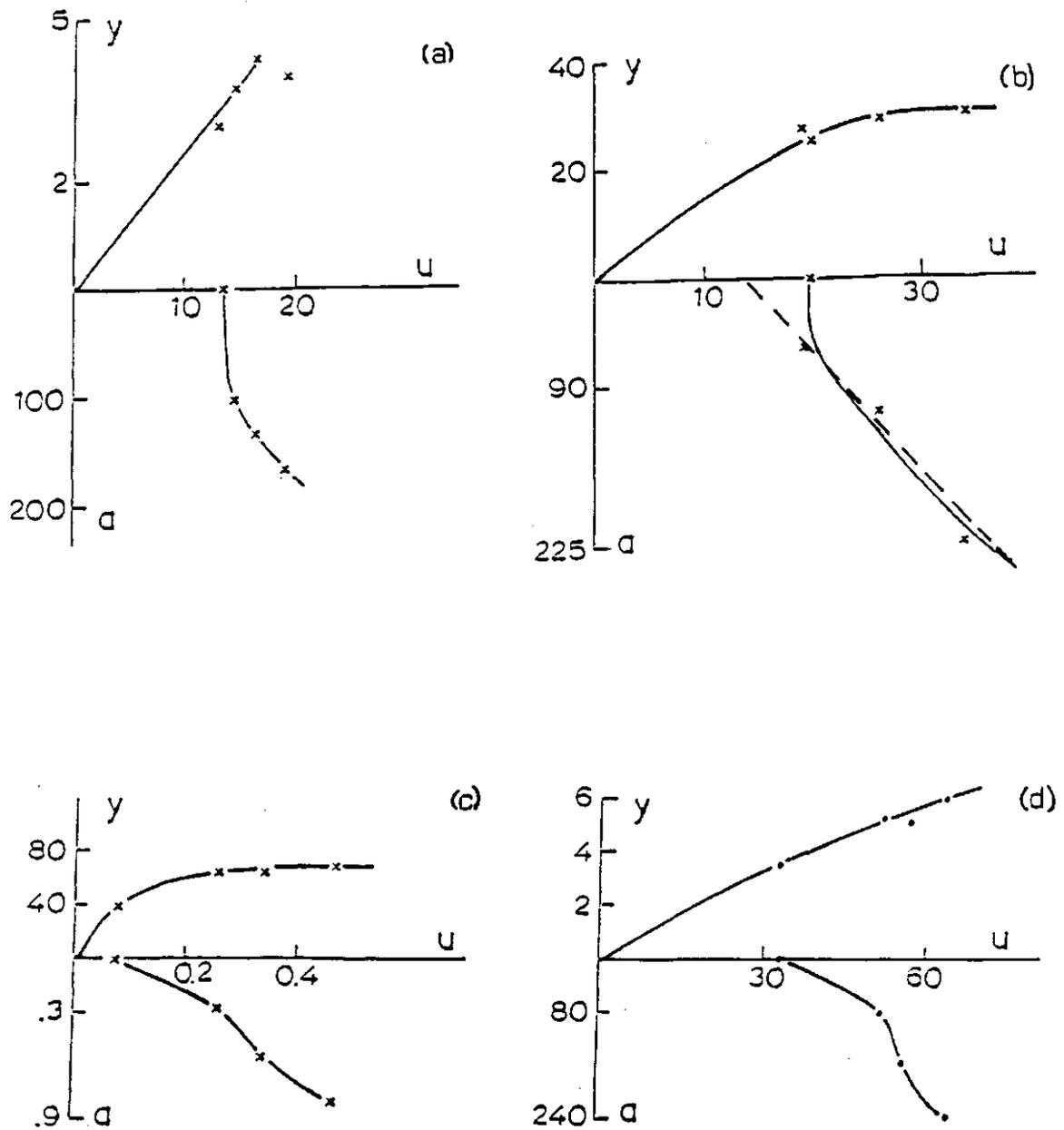


Fig. 9. Relation entre l'absorption de phosphore (u) et le rendement (Y) et entre l'apport de phosphore (A) et son absorption par la culture.

- (a) Pommes de terre, Etats Unis (Carpenter, 1963) ; Y en tonnes de tubercules sèche par ha, u et a en kg P_2O_5 /ha¹ ;
 (b) Pommes de terre, Etats Unis (Jacob et al., 1949) ; Y en tonnes de tubercules frais par ha, u et a en kg P_2O_5 /ha¹ ;
 (c) Trèfle rouge (expérience en vases), Israël (Hagin, 1957) ; Y en g matière sèche par vase, u et a en g P_2O_5 par vase ;
 (d) Riz irrigué, les Indes (Motsara & Datta, 1971) ; en tonnes de grain par ha (12% d'humidité), u et a en kg P_2O_5 /ha¹.

1.5. CONCLUSIONS

L'analyse présentée dans cette fiche technique montre que les résultats des expériences d'engrais peuvent être interprétés plus significativement si l'absorption des éléments nutritifs par les cultures est connue aussi. Il est donc important de procéder à des analyses chimiques de sol (parties 2 et 3.1) et du matériel organique apportée (partie4). De telles analyses nous permettent de nous prononcer sur les quantités des éléments nutritifs disponibles des sources naturelles, de juger l'efficacité des engrais chimiques et de déterminer si l'élément a été vraiment limitatif pour la production primaire (exemples à la partie 5.1 et dans van Duivenbooden & Cissé, 1989).

Cette connaissance facilite l'utilisation des données pour l'extrapolation et la prédiction en général, mais aussi pour éventuellement adapter le chemin de recherche pour "la lutte contre la sécheresse".

En outre, la figure 2 a montré l'importance de la dose d'engrais. Il 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.

2. CARACTERISATION DU SITE

2.1. CARACTERISTIQUES GENERALES

Le site des expérimentations est caractérisé complètement par des caractéristiques géographiques, des caractéristiques climatologiques et des caractéristiques de sol.

2.1.1. Caractéristiques géographiques

Pour être complet et pour faciliter le repérage du site, les coordonnées du site sont données, ou au minimum une carte avec l'implantation géographique du site dans le pays.

2.1.2. Caractéristiques climatologiques

Pour faciliter l'interprétation des résultats on rappelle ici la nécessité des mesures de la pluviométrie au niveau des parcelles, ou de la station météorologique la plus proche possible.

En outre, on recommande le suivi journalier sur cette station :

- des températures (minimum et maximum) ;
- des températures de sol (10, 25 et 50 cm de profondeur) ;
- de l'humidité relative ;
- de la vitesse du vent ;
- de la radiation globale.

2.2. CARACTERISTIQUES DE SOL

2.2.1. Caractéristiques pédologique du site

Bien que l'expérimentateur ne soit pas en principe pédologue, il est important qu'il identifie aussi précisément que possible le sol sur lequel il implante son essai, dans la mesure où celui-ci peut expliquer le comportement de la culture, sa réponse aux techniques culturales comparées, et les différences observées entre les sites du réseau.

Il s'aidera des cartes pédologiques et morphopédologiques existantes. Il pourra aussi s'appuyer, pour les définitions et la description, sur la notice n°1 se rapportant au système STIPA du Réseau International de Traitement des Données de Sol, éditée par l'Agence Française de Coopération Culturelle et Technique.

La caractérisation portera sur :

- la description des grands traits de l'environnement ;
- la localisation du site dans le paysage, sa place sur la toposéquence sur laquelle il se trouve, la mesure de la pente éventuellement, l'évaluation de l'état de surface : traces d'érosion,.. ;
- L'observation d'un profil sur deux mètres de profondeur, où l'on délimitera et mesurera l'épaisseur des horizons, et on décrira les principaux caractères visuels et tactiles : couleur (repérée sur un code), structure, texture, matière organique, éventuellement tracés racinaires. On notera particulièrement les aspects qui peuvent avoir un rôle sur l'implantation et le fonctionnement des racines : porosité, traces d'hydromorphie, niveaux indurés. On tachera aussi d'associer les anomalies de distribution des racines aux caractères observables ou facilement mesurables (pH par exemple). On procédera aussi à des mesures de densité apparente à différents niveaux ;
- l'analyse d'échantillons composites prélevés sur le profil par horizon identifié (plusieurs échantillons pour les horizons très épais) : granulométrie, carbone et azote totaux, P et K totaux et assimilables (P Olsen-Dabin, K nitrique), capacité d'échange et cations échangeables (méthode cobaltihexamine), pH eau et Kcl, caractéristiques de rétention de l'eau ;
- la situation du sol dans une classification, et son nom local.

3. CARACTERISATION DES CONDITIONS

3.1. CARACTERISATION AU NIVEAU DU SOL

3.1.1. Problème de représentativité

Les caractéristiques d'un sol varient fortement dans l'espace, à l'échelle d'un dispositif, en fonction de gradients ou de situations diverses, mais également de façon aléatoire d'un point à l'autre. Elles varient avec la profondeur, selon le profil pédologique et les techniques de culture. Elles évoluent enfin au cours de l'année, à l'échelle du mois (pH, bases échangeables p.e.), ou même moins (formes d'azote), et au cours des années.

Pour prendre en compte la très forte variabilité aléatoire, il est impératif de multiplier les prises élémentaires pour constituer un échantillon, et de faire plusieurs répétitions.

Pour contrôler la variabilité non aléatoire, quelques précautions doivent être prises :

- situer l'échantillonnage dans son environnement (topographie, occupation du sol), et sur le profil pédologique ou cultural (horizon, profondeur). On distinguera au moins "surface" (niveau travaillé pour la culture) et "profondeur". Si possible, on échantillonnera jusqu'à la profondeur racinaire maximale.

- de façon standard, il est préférable de prélever chaque fois que possible en saison sèche (2 mois après la fin des pluies). Dans tous les cas, noter la date de prélèvement et sa situation dans le cycle des saisons et de la culture.

3.1.2. Matériel nécessaire

- un outil de prélèvement, qui peut être :

- . une tarière, adaptée au sol (joue plus large pour un sol sableux sec), de diamètre 40 à 50 mm ;

- . un tube de prélèvement gradué (D = 20 à 40 mm), de fabrication locale (ouverture latérale sur 1/3 de la circonférence, bord d'attaque affuté) ;

- un récipient de 5 à 10 litres de diamètre large (bassine) pour les sous échantillonnages,

- des sacs de polyéthylène présoudés épais (> 50 microns), de 10 x 20 ou 20 x 40 cm x cm pour le conditionnement,

- du matériel d'étiquetage inaltérable (bristol, feutre indélébile ; crayon),

- couteau, chiffon pour le nettoyage du matériel.

3.1.3. Méthode de prélèvement

- par échantillon, prélever 10 à 20 prises élémentaires de 200 g environ, réparties systématiquement sur la parcelle en évitant les bordures, et en équilibrant la représentation des situations particulières (lignes, milieu d'interligne p.e.),
- regrouper les prises dans le récipient, mélanger très soigneusement et étaler le sol pour obtenir une épaisseur homogène,
- prélever un ou deux quadrants (environ 1 kg, d'avantage si le sol est graveleux) et les transvaser dans un sac étiqueté à l'extérieur et à l'intérieur.

3.1.4. Traitement ultérieur des échantillons

- Les caractéristiques peu stables nécessaires (formes d'azote) sont déterminées dès que possible.
- Sécher les échantillons à l'air dans un endroit ventilé, dans des bacs en plastiques ou des caissettes en bois. Ils sont alors prêts pour expédition éventuelle (voir plus loin). Eventuellement sécher à l'étuve à 55 - 60°C.
- Tamiser à 2 mm, en prenant soin de casser les mottes pour passer toute la terre fine. Conserver les éléments grossiers jusqu'à pesée après séchage. Peser la terre et mesurer son taux d'humidité sur une aliquote, qui sera ensuite jetée. Calculer le taux de terre fine.
- Faire 2 parts de 500 g de chaque échantillon, dont une sera acheminée vers le laboratoire et l'autre conservée jusqu'à la fin de la démarche de recherche. Un étiquetage sous plastique est recommandé. Se conformer scrupuleusement aux demandes du laboratoire d'analyse pour la signalisation des échantillons.
- La conservation des échantillons se fait en sacs ou boîtes en carton (risques de dégâts par les rats et d'humidité), ou en boîtes plastiques (coûteux).

3.1.5. Analyses minimales à demander

- Fractions granulométriques
- Capacité d'échange et bases échangeables (cobaltihexamine)
- Carbone et azote totaux
- P et K totaux et assimilables
- pH

3.2. CARACTERISTIQUES AU NIVEAU DE LA CULTURE

3.2.1. Introduction

Le suivi des mobilisations minérales des cultures est une démarche consommatrice de moyens et qui aboutit fréquemment à des résultats très approchés. Il est particulièrement délicat sur un dispositif défini pour un autre objet offrant une assiette d'échantillonnage limitée. Il est important de rechercher toute précaution susceptible d'éviter les imprécisions ou les ?

Les propositions faites ici sont minimales et prévues pour une expérimentation comportant au moins six répétitions.

On proposera deux options :

- option complète comprenant 5 dates de prélèvement réparties sur le cycle de la culture, et nécessitant d'aménager le plan ou dispositif à cet effet,
- option minimale qui ne retient qu'un prélèvement à la récolte.

3.2.2. Sous-parcelle échantillonnage

On recommande de prévoir, dans chaque parcelle élémentaire de l'expérimentation, deux sous-parcelles dans l'option minimale, et trois dans l'option complète, que nous appellerons pour la commodité R, S et C :

- une sous-parcelle de rendement, R, qui servira à la mesure de la production agronomique à la récolte, et au suivi non destructif (mesures sonde et tensiomètres, suivi biométrique) ; c'est également sur cette sous-parcelle que seront faits les prélèvements à la récolte dans les deux options ;
- une sous-parcelle de suivi destructif du sol S (profils culturaux, observations racinaires), qui donnera lieu à des ouvertures de fosses, et donc à une consommation progressive du terrain d'une année sur l'autre ;
- une sous-parcelle de suivi destructif de la culture, C, sur laquelle seront fait les prélèvements en cours de cycle. A la différence de la précédente, les mêmes emplacements pourront être échantillonnés chaque année. Cette sous-parcelle n'est utile que pour l'option "complète". Sa dimension sera calculée pour la culture la plus encombrante de la rotation, en principe la céréale.

Il peut être judicieux que la sous-parcelle S se trouve toujours à un bout de parcelle élémentaire, pour des raisons d'accès. On évitera toutefois une disposition systématique des sous-parcelles R et S, par exemple, R doit se trouver tantôt au nord, tantôt au sud de C.

3.2.3. Définition des échantillons élémentaires

On constituera un échantillon par parcelle élémentaire à chaque date de prélèvement. L'échantillon est fait sur la base d'une surface et non d'un nombre de plantes, cette seconde solution entraînant le plus souvent de très forts biais. On obtiendra ainsi des résultats par unité de surface (poids de matière sèche, mobilsations). La surface à prélever (placette est définie et localisée au moment de l'établissement du protocole. Elle ne sera pas modifiée, même si elle comporte occasionnellement des manquants.

La dimension minimale d'une placette doit correspondre à deux poquets de céréales. Pour un mil semé à 1 m x 1 m, par exemple, on retiendra 2m². L'arachide qui suivra, si elle est par exemple à 0,10 m x 0,40 m, sera prélevée dans toute la mesure du possible sur la même base (1 m x 2 m), et le même emplacement. D'une manière générale, on veillera, pour la placette comme on l'a fait pour la parcelle élémentaire, à définir une forme et une dimension compatible avec les géométries d'implantation des différentes cultures qui se succéderont sur l'expérimentation.

Cette dimension est proposée aussi petite que possible pour des raisons de place et de volume d'échantillons à manipuler. Il est cependant suggéré de prévoir la possibilité d'agrandir éventuellement la placette s'il s'avérait que les résultats de la première année sont trop hétérogènes, et que la capacité de traitement est suffisante.

Le nombre prévu de placettes est de 4, si possible de 5, afin de se garantir contre d'éventuels accidents. La cinquième placette pourra également servir à doubler le volume de l'échantillon de première date, qui peut être assez réduit.

La répartition des placettes sur la sous-parcelle C est telle que les bordures sont évitées, et les prélèvements ne modifient pas sensiblement l'environnement des placettes restant à échantillonner dans la suite du cycle. Pour ce faire, la placette est entourée d'une bande de plantes qui ne doivent pas être échantillonnées, d'une largeur au moins égale à celle retenue pour les bordures.

Une fois les emplacements définis, les placettes sont figurées sur le plan d'expérimentation, et on leur donnera des numéros d'ordre correspondant à l'ordre des dates de prélèvement. Il est recommandé de "randomiser" ces numéros chaque année dans la sous-parcelle.

3.2.4. Dates d'échantillonnage

3.2.4.1. Plantes à croissance définie : les céréales

- P1. 15 à 20 jours après semis. On peut envisager, à cette date, d'utiliser les refus de démariage, ce qui consommerait moins de place. Ne pas oublier alors de ramener le poids obtenu au nombre de plantes réellement laissées après démariage ;

- P4. 50 % floraison. Ce stade sera défini sur la sous-parcelle R, sur une population suffisante pour ce faire. Il pourra arriver que les plantes prélevées ne soient pas exactement au même stade. Il suffira de le noter (cf. 61) ;
- P5. Maturité. En fait, le prélèvement devra être à un ou deux jours près, effectué en même temps que la récolte du reste de la sous-parcelle R, sur laquelle il est pris. Il est en effet important de raccorder la courbe de croissance-mobilisation à la production mesurée. Il est important que la maturité soit par ailleurs repérée si elle ne coïncide pas avec la récolte ;
- P2. au 1/3 de la durée P1-P4 ;
- P3. aux 2/3 de la durée P1-P4

3.2.4.2. Plantes à croissance indéfinie

- P1 et P5 comme pour les céréales
- P2 à P4, aux 1/4, 1/2 et 3/4 de la durée P1-P5

3.2.5. Mode de prélèvement

3.2.5.1. Observations

On suppose que l'on se situe dans un suivi d'ensemble de la culture, par lequel on consigne les dates des différentes interventions culturales, des stades phénologiques remarquables, des accidents éventuels, la densité du peuplement végétal, etc...

On notera plus particulièrement, en relation avec chaque prélèvement, dans toute la mesure du possible :

- le nombre de plantes par échantillon,
- leur stade phénologique moyen (nombre de feuilles, nombre de talles, sortie de pièces florales, ...)
- l'état physiologique et parasitaire des plantes au moment du prélèvement, en utilisant chaque fois que cela est possible un critère objectif, quantitatif ou semi-quantitatif : échelle d'observation, référence de couleur, mesures biométriques, comptages ;
- le nombre de plantes ou de poquets manquants dans la bordure autour de la placette, permettant d'en calculer ensuite la proportion ;
- les conditions générales de prélèvement : météo, moment de la journée, difficultés particulières, ... ces renseignements pouvant être utilisés en cas de problèmes d'interprétation.

grossières ou des particules fines, si la paille consiste seulement en tiges ou tiges avec des feuilles.

4.3. NOMBRE D'ECHANTILLONS

Vue l'hétérogénéité de la matière organique, l'analyse demande plusieurs répétitions. La précision est fonction du nombre d'échantillons analysés, mais le nombre minimal par type de matière organique recommandé est 3. En général un échantillon par 500 kg de matière organique appliquée est proposé.

5. EXEMPLES ADDITIONNELS

5.1. EFFET DE LA COMPOSITION ET DE LA QUANTITE DE FUMURE

Avant d'effectuer des expérimentations il faut bien réfléchir au but de l'étude : une expérimentation pour montrer l'importance des apports de l'engrais (augmentation du rendement, etc...) ou trouver un paquet d'interventions qui diminuent 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 la fumure. Des résultats des essais fumure minérale sont présentés au tableau 5.1.

Tableau 5.1. Essais fumure minérale par un complexe (NPK, 14-22-12) et de l'urée sur un mil au Mali (apport et rendement en kg/ha¹).

Année	Apport		Rend		Rapport Rdt/Apport		
	complexe	urée	N	P	N	P	
'85-'87	50	0	7	11	210	30.0	19.1
'85-'87	100	0	14	22	360	25.7	16.4
1987	100	0	14	22	390	27.9	17.7
1987	50	50	30	11	380	12.7	34.5

A partir de ces résultats on fait les remarques suivantes :

- 7 kg de N et 11 kg de P n'ont pas l'effet attendu, la saturation ne devrait pas encore être approchée avec une dose de 100 kg ha⁻¹ seulement

- 16 kg plus de N n'ont aucun effet, ce qui est un peu bizarre. Cependant l'efficacité de N et de P est proche du maximum. Les autres causes possibles sont :

- i application incorrecte de l'engrais
- ii maladies ou adversités en jeu
- iii autre élément nutritif limitatif

- il manque les résultats de la consommation de N et de P pour expliquer les phénomènes observés.

En conséquence :

- l'essai n'a pas atteint le niveau potentiel, donc ce paquet d'interventions n'est pas complet pour tirer des conclusions concernant la composition, et la quantité de fumure nécessaire

- en général, on peut donc conclure que les résultats d'une expérimentation sans un suivi complet (N & P ici) seront difficilement utilisables.