

Pour une utilisation rationnelle des engrais

par J.B. Bole et S.K.A. Danso*

Les engrais chimiques sont devenus la véritable assise de la croissance démographique dans le monde. La nécessité de nourrir une population qui double au cours de la vie de chacun d'entre nous constitue un défi permanent pour l'agriculture, que celle-ci relève de façon magnifique; en effet, la production de la plupart des cultures a au moins doublé au cours des quinze dernières années et celle de céréales a notamment augmenté de 150% (tableau 1). Malheureusement, cet accroissement est dû pour plus de moitié à un élément dont la fabrication dépend d'une ressource non renouvelable: les engrais chimiques [1].

La production mondiale d'engrais est passée de 8 millions à 113 millions de tonnes entre la fin de la deuxième guerre mondiale et 1978. Avant la hausse du prix de l'énergie, l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel avait prévu que cette production atteindrait 300 millions de tonnes d'ici à l'an 2000. Toutefois, les graves difficultés engendrées par cette hausse (le prix des ressources énergétiques a été multiplié par dix) et la perspective d'être un jour privé des matières premières nécessaires à la production des engrais nous forcent aujourd'hui à modifier ces prévisions.

Les pays en développement sont ceux qui ont le plus besoin d'accroître leur production vivrière. Ils disposent de 60% des terres consacrées dans le monde à la culture des céréales, mais il leur faut nourrir 73% des 4,4 milliards d'habitants de la terre. Du début des années 60 à 1978, la production et l'utilisation des engrais ont augmenté beaucoup plus rapidement dans les pays en développement que dans les pays développés (tableau 1). Le rendement des céréales a de ce fait plus que doublé mais, la population ayant continué de progresser au même rythme, la production de céréales par habitant n'a que faiblement augmenté. Pour les pays en développement, la véritable préoccupation est l'avenir immédiat et, à cet égard, il y a lieu de noter que l'écart se creuse dans les pays qui manquent le plus de denrées alimentaires.

Pour les pays en développement, les engrais chimiques représentent une dépense importante. Il faut habituellement les importer, ce qui oblige les Etats intéressés à puiser dans leurs réserves de devises déjà peu abondantes. Il se peut même que les engrais chimiques constituent le seul facteur de production pour lequel les cultivateurs aient besoin d'une monnaie forte. Il est donc essentiel d'utiliser au mieux les engrais afin que chaque unité accroisse la production de denrées alimentaires. Cela encouragera l'emploi des engrais et augmentera la production de denrées alimentaires dans les régions où les besoins sont les plus pressants. Dans ce domaine, la Division mixte FAO/AIEA fait porter ses efforts sur les pays en développement.

* M. Bole est le chef de la Section de la fertilité des sols, de l'irrigation et de la production agricole de la Division mixte FAO/AIEA. M. Danso est l'un de ses collaborateurs.

Pour chaque culture, les agronomes doivent être en mesure de déterminer la quantité et le type d'élément nutritif les plus appropriés ainsi que le mode et la période d'application qui conviennent le mieux, compte tenu des caractéristiques du sol et des conditions climatiques propres à chaque région. Seul un programme de recherche intensif permet d'obtenir de tels renseignements, et à cet égard l'expérience acquise par la Division mixte FAO/AIEA a montré que la meilleure façon de procéder était de mesurer directement la capacité d'absorption des engrais par les plantes. Le seul moyen d'effectuer cette mesure est d'introduire un traceur isotopique dans l'élément nutritif des engrais. Il existe heureusement des radioisotopes pour le phosphore, le soufre, le calcium, le zinc, le fer, le manganèse et plusieurs autres éléments nutritifs. Le coût de l'isotope stable ^{15}N et du matériel nécessaire à son analyse ayant baissé au cours des dernières années, les études pratiques effectuées sur des parcelles au moyen d'engrais azoté marqué sont maintenant largement répandues.

Tableau 1. Quantité d'engrais utilisée ($\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O}$) et production de céréales par an [2]

	Pays en développement		Pays développés	
	1961-1965	1978	1961-1965	1978
Production d'engrais (millions de tonnes)	2,7	19,7	37,9	93,0
Consommation d'engrais (kg/ha arable)	7,6	39,4	50,6	115,1
(kg/personne)	2,3	9,4	33,1	67,5
Production de céréales (millions de tonnes)	289	745	344	851
(kg/ha arable)	464	1100	542	1310
(kg/personne/jour)	0,53	0,64	1,36	2,02

Comment utiliser les engrais de façon rationnelle?

Le premier programme international de recherche coordonnée permet encore d'illustrer la manière dont on peut utiliser un traceur isotopique dans un engrais pour résoudre un problème pratique. De nombreuses études avaient montré que les céréales fixaient mieux les engrais contenant du phosphore (P) lorsque l'engrais était placé près de la graine lors de l'ensemencement que lorsqu'il était épandu et incorporé uniformément à toute la surface du sol. Toutefois, en ce qui concerne le riz irrigué, la Commission internationale du riz n'avait pu déterminer, malgré les efforts déployés dans ce domaine, le mode d'application de l'engrais phosphaté qui donne les meilleurs résultats. La Section de l'agriculture de l'AIEA qui est devenue par la suite la Division mixte FAO/AIEA a entrepris une étude coordonnée à l'aide d'engrais phosphatés marqués au ^{32}P .



Etude de l'absorption de l'azote par les plantes au moyen de techniques nucléaires: l'engrais a été marqué à l'isotope ^{15}N .

Cette étude a permis d'obtenir des résultats concluants qui ont étonné les spécialistes. L'expérience a été réalisée dans neuf endroits différents et pour chacun d'entre eux, l'application en surface du phosphate ou l'enfouissement de l'engrais par un léger travail du sol se sont révélés également efficaces et deux fois plus rentables que la méthode consistant à placer l'engrais sous la graine, dans l'entre-sillons, ou entre les lignes de semis [3]. Ces résultats remarquables n'ont pu être obtenus que grâce aux engrais marqués.

Dans le cadre du même programme d'autres études pratiques sur le riz irrigué effectuées cette fois-ci à l'aide d'engrais marqués au ^{15}N ont donné des résultats presque aussi spectaculaires (voir photo ci-dessus). L'azote provenant des nitrates joue habituellement un rôle très efficace dans la croissance des céréales. Toutefois, enfoui sous les plants de riz au moment du repiquage, il n'a produit pratiquement aucun effet sur 14 des 15 parcelles étudiées. Le sulfate d'ammonium et l'urée, qui contiennent de l'azote sous forme d'ammonium, ont été aussi efficaces l'un que l'autre et ont eu un rendement très supérieur à celui du nitrate de sodium. Le nitrate d'ammonium a eu un rendement intermédiaire car l'azote qu'il contient se présente pour moitié sous forme de nitrate.

Lorsque l'azote était appliqué avec l'eau d'irrigation deux semaines avant le début de la montaison on a observé les mêmes tendances et le pourcentage d'azote contenu dans la plante et provenant de l'engrais était plus élevé que lorsque l'engrais était appliqué lors de la plantation.

Des études sur le riz menées à sept endroits différents dans le cadre d'un autre programme international coordonné ont confirmé que l'engrais azoté était absorbé en plus grande quantité lorsqu'il était appliqué pendant la période de croissance de la plante que lorsqu'il était appliqué lors du repiquage ou peu après [4]. De l'engrais azoté a été appliqué quatre fois au cours de la croissance: au moment du repiquage, trois semaines après le repiquage, une semaine avant le début de la montaison et au moment de la formation des feuilles paniculaires. On a eu recours à quatre traitements identiques, toutefois, lors de chaque

application, l'un des traitements a été effectué à l'aide d'engrais marqué au ^{15}N et les trois autres à l'aide d'engrais non marqué. On a pu ainsi mesurer la quantité d'engrais fixée et déterminer le rendement de chaque application. On a récolté et analysé des plants de riz jusqu'à huit fois au cours de la maturation pour rechercher le traceur ^{15}N et déterminer de cette manière à quel moment l'engrais avait été réellement absorbé.

L'absorption de l'azote a été très rapide. En effet, appliqué avant le début de la montaison, l'azote avait déjà été utilisé au maximum au moment de la formation des feuilles paniculaires, bien avant l'épiaison, et, appliqué au moment de la formation des feuilles paniculaires, il avait été de toute évidence absorbé immédiatement puisqu'il était utilisé de façon maximale lors du premier échantillonnage qui suivait, à savoir au moment de l'épiaison.

Toutefois, en évaluant le rendement des applications d'engrais azotés, on a constaté qu'il était deux fois plus élevé lorsque l'application avait lieu au moment de la formation des feuilles paniculaires que lorsqu'elle était effectuée lors du repiquage ou trois semaines après.

L'Institut international de recherche sur le riz estime qu'aux Philippines la carence en zinc (Zn) constitue le trouble de nutrition le plus répandu du riz irrigué, et c'est d'ailleurs un problème qui se pose dans la plupart des autres pays producteurs de riz. A cet égard, la Division mixte FAO/AIEA a récemment exécuté un programme de recherche qui comportait des études sur des oligoéléments effectuées à l'aide d'isotopes, et portant sur la nutrition du riz en zinc. Des expériences sur le terrain réalisées dans neuf pays producteurs de riz ont montré qu'il suffisait de 5 kg de Zn/ha sous forme de ZnSO_4 , pour remédier complètement à la carence en Zn et fournir jusqu'à 89% du Zn que contient le grain de riz. Le fait de doubler cette quantité n'a pas permis d'obtenir de meilleurs résultats. Lorsque des études ont pu être menées sur le même site pendant plusieurs années, on a remarqué que cette faible quantité de zinc restait efficace lors des deuxième et troisième campagnes et fournissait environ 30% du zinc au cours de la deuxième

année et 15 à 20% au cours de la troisième année [5]. D'autres études effectuées dans le cadre du programme ont montré que les engrais à base de zinc pouvaient être appliqués de manière très diverse avec la même efficacité et qu'il y avait peu d'avantage sinon aucun à utiliser pour le riz irrigué des composés chélatés de zinc qui sont plus chers.

Ces quatre études constituent des exemples de programmes exécutés sur le terrain qui ont modifié les pratiques d'utilisation des engrais dans une grande partie du monde. Les résultats qu'elles ont produits n'auraient pas pu être obtenus ou n'auraient pas été aussi concluants si l'on n'avait pu mesurer directement la capacité des plantes à tirer profit des engrais. Il faut souligner à cet égard que l'utilisation des isotopes constitue la seule méthode permettant d'évaluer directement cette capacité d'absorption.

Les résultats de nombre de ces études effectuées à l'aide d'isotopes ont été récemment résumés par la Division mixte FAO/AIEA et publiés par la FAO à l'intention des spécialistes de l'agro-industrie [6]. Des groupes internationaux de scientifiques utilisent actuellement des techniques semblables dans le cadre d'études coordonnées par la Division mixte FAO/AIEA. Ces techniques doivent permettre, d'une part, de mettre au point des pratiques d'utilisation des engrais pour la culture successive d'une céréale et d'une légumineuse la même année sur le même champ et, d'autre part, de déterminer les effets des produits agrochimiques sur le rendement des engrais.

Les avantages économiques qui découlent de l'utilisation de ces résultats sont considérables. Un pays qui participait à un programme de recherche sur l'emploi des engrais azotés dans la culture du maïs a estimé qu'il réalisait des bénéfices de l'ordre de 36 millions de dollars des Etats-Unis par an depuis que les cultivateurs avaient adopté les méthodes d'application des engrais les plus efficaces que le programme avait permis de déterminer. Au Sri Lanka, la production des cocotiers a progressé alors que l'on utilise *moins* d'engrais. Il est possible de faire encore davantage d'économies, puisqu'il a été estimé que la quantité d'engrais actuellement utilisée dans le monde pouvait être réduite de 50%, en améliorant les méthodes utilisées grâce aux résultats de travaux de recherche judicieusement menés.

Autres sources d'éléments nutritifs

Le seul moyen de satisfaire les besoins croissants en engrais chimiques pour la production vivrière est de remplacer les engrais par d'autres sources d'éléments nutritifs, moins chères ou disponibles sur place. La nature a créé des types d'associations en vertu desquels certaines plantes peuvent utiliser lors de leur croissance, en combinaison avec certains micro-organismes, une partie de l'azote gazeux (N_2) qui constitue 80% de l'atmosphère. L'utilisation de l'azote atmosphérique par les plantes est appelée fixation biologique de l'azote. De nombreux pays disposent de sources de phosphates naturels qui, dans certains sols où dans des conditions appropriées, peuvent remplacer les engrais phosphatés. La mycorrhization qui est une association d'un type particulier entre un microbe et les racines d'une plante, peut permettre à une plante d'utiliser les phosphates naturels du sol ou certaines formes de phosphore et d'autres éléments nutritifs contenus dans le sol que ne

peuvent pas fixer les plantes dites non-mycorhizées. Ce type d'association pourrait à l'avenir être développé et acquérir alors autant d'importance que la fixation biologique en a aujourd'hui. Les techniques isotopiques ont un rôle à jouer dans toutes ces recherches, mais on se limitera dans cet article à l'exemple de la fixation de l'azote.

Il est difficile de mesurer le niveau de fixation biologique de l'azote car lorsque celui-ci a pénétré dans la plante, il est généralement impossible de déterminer s'il provient de l'engrais, du sol ou de l'atmosphère. Si l'on compare la quantité d'azote absorbée par une plante dotée d'un pouvoir de fixation à la quantité absorbée par une plante qui n'a pas ce pouvoir, on n'obtient qu'une estimation imprécise de la fixation biologique, car les plantes, notamment celles qui appartiennent à des groupes différents, absorbent fréquemment des quantités inégales d'azote du sol. On a essayé de marquer l'azote atmosphérique avec l'isotope ^{15}N , mais on n'a pas obtenu de résultats concluants car il fallait travailler sous cloche, ce qui n'est pas sans influence sur la croissance de la plante.

Le taux de réduction de l'acétylène en éthylène par les micro-organismes associés aux racines de la plante peut être mesuré avec une grande précision. Puisque le système d'enzymes qui réduit N_2 en NH_4^+ réduit également l'acétylène en éthylène, on a utilisé cette technique pour évaluer la fixation biologique de l'azote. Malheureusement, cette technique comporte ses limitations, principalement parce que l'évaluation est seulement valable pendant le bref moment qui correspond à la mesure, et elle dépend également des conditions dans lesquelles on effectue cette mesure. Même un grand nombre de mesures ne permet pas de déduire de façon précise le niveau de fixation biologique au cours de toute une campagne.

Le personnel de la Division mixte FAO/AIEA et la Section de l'agriculture du laboratoire de l'Agence à Seibersdorf ont donc mis au point des techniques isotopiques applicables sur le terrain, grâce auxquelles on peut quantifier le niveau de fixation biologique de l'azote au cours de toute une campagne [7].

Ces techniques ont été utilisées avec succès dans le cadre de travaux de recherche coordonnés par la Division mixte FAO/AIEA et visant à chiffrer l'accroissement du niveau de fixation biologique dû à l'application de diverses méthodes culturales. En Hongrie, l'utilisation d'engrais phosphatés (105 kg de P/ha) a permis de porter le niveau de fixation de l'azote par le soja de 7 à 71 kg de N/ha. En Inde, des souches améliorées de *Rhizobium* ont fait passer le niveau de fixation biologique de 79 à 102 kg de N/ha pour le soja. Au Ghana, des techniques perfectionnées d'inoculation ont porté ce niveau de 80 à 106 kg de N/ha pour l'arachide. En général l'azote contenu dans les engrais fait décroître le niveau de fixation biologique bien que la quantité totale d'azote absorbée puisse augmenter, en particulier lorsque le niveau de fixation biologique n'est pas porté à son maximum. Toutefois, en Egypte, on a constaté avec surprise que le niveau de fixation biologique de l'azote par la fève fourragère avait augmenté grâce à l'utilisation d'engrais azotés. Bien que, en Roumanie et au Sénégal, le niveau de fixation biologique ait diminué pour le soja, les résultats obtenus permettent de penser que certaines variétés de soja et certaines

Tableau 2. Utilisation de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ marqué au ^{15}N pour mesurer la quantité d'azote fixée par les légumineuses

Culture et pays	Application initiale d'azote marqué (kg/ha)	Autres traitements	N fixé (kg/ha)
Soja	40	0 kg P/ha à la plantation	7
Hongrie	40	35 kg P/ha à la plantation	42
	40	70 kg P/ha à la plantation	62
	40	105 kg P/ha à la plantation	71
Soja	20	sans inoculum	79
Inde	20	avec inoculum	102
Arachide Ghana	15	sans inoculum	82
	15	inoculum sur la graine	94
	15	inoculum dans le sol	100
	15	inoculum dans le sol + B + Mo	106
Féverole fourragère Egypte	17,5	—	20
	35	—	26
	70	—	34
	140	—	33
Soja Roumanie	20	souche de <i>Rhizobium</i> SO ₇	78
	20	souche de <i>Rhizobium</i> SO ₁₄₆	71
	20	germes provenant de plusieurs souches	107
	100	souche de <i>Rhizobium</i> SO ₁₄₆	64
	100	germes provenant de plusieurs souches	41
Soja Sénégal	20	variété 44A73	33
	100	variété 44A73	19
	100	variété 4173	2
	100	variété Jupiter	34

souches de *Rhizobium* peuvent être moins sensibles que d'autres à l'application de doses importantes d'engrais azotés (tableau 2). Pour les légumineuses il peut donc être possible d'identifier des associations qui permettent de porter au maximum le niveau de fixation biologique et qui, lorsque la légumineuse est cultivée en dérobée avec une céréale, n'entrent pas en compétition avec cette céréale, en ce qui concerne l'absorption de l'azote provenant des engrais.

Tout le monde espère que de nouveaux progrès scientifiques permettront d'obtenir des plantes de grande culture, autres que les légumineuses, susceptibles de fixer biologiquement l'azote dont elles ont besoin. Les progrès récemment accomplis par la recherche sur les recombinaisons génétiques et le transfert d'ADN laissent prévoir que des plantes de ce type pourront, à terme, être mises au point. La Division mixte FAO/AIEA attend avec intérêt de pouvoir utiliser pour ces nouvelles plantes, lorsque celles-ci seront disponibles, les techniques isotopiques qui ont été des instruments de recherche très efficaces pour les légumineuses, en vue de porter au maximum leur niveau de fixation biologique de l'azote.

Bibliographie

- [1] von Peter *Fertilizer requirements in developing countries* The Fertilizer Society, Proc. No. 188, Londres (1980).
- [2] *Annuaire de la production* établi par la FAO pour 1979, FAO, Rome (1980).
- [3] *Annuaire FAO des engrais* de 1978, FAO, Rome (1979).
- [4] *Rice fertilization* Collection des rapports techniques No. 108, AIEA, Vienne (1970).
- [5] *Isotope studies on rice fertilization* Collection des rapports techniques No. 181, AIEA, Vienne (1978).
- [6] *Zinc fertilization of flooded rice* TECDOC-242, AIEA, Vienne (1981).
- [7] *Maximizing the efficiency of fertilizer use by grain crops* Fertilizer Bulletin No. 3, FAO, Rome (1980).
- [8] M. Fried and H. Broeshart *An independent measure of the amount of nitrogen fixed by a legume crop* Plant and Soil 43, pp. 707-711 (1974).



Une autre expérience fondée sur l'application d'engrais marqués au ^{15}N visant à déterminer la meilleure façon d'utiliser les engrais pour la culture du riz.