

# L'atome au champ: enrichir la terre du paysan

*Les techniques nucléaires et isotopiques facilitent les études de fertilisation des sols pauvres et favorisent une agriculture durable*

par  
Christian Hera

Les terres ne couvrent que 29% de la superficie du globe mais assurent néanmoins 98% du ravitaillement mondial. La plupart ne sont pas très riches: 11% seulement sont très fertiles, 28% le sont modérément et 61% le sont peu.

Par ailleurs, les pratiques de gestion des terres, des engrais, des récoltes et de l'eau laissent beaucoup à désirer dans la plupart des pays. L'extraction minière, par exemple, cause des pertes de nutriments et appauvrit les sols, ce qui n'est pas moins dangereux que toute autre forme de dégradation de l'environnement. Aussi la préservation des éléments nutritifs et de l'eau est-elle un souci majeur dans de nombreuses parties du monde, notamment dans les pays en développement.

Il faut prendre des mesures pour minimiser l'appauvrissement des sols et leur rendre leur fertilité. Maintes organisations s'intéressent aujourd'hui à l'étude d'un système intégré de nutrition des végétaux. Le principe fondamental est le maintien et l'amélioration éventuelle de la fertilité des sols dans l'intérêt de la production agricole en faisant le meilleur usage de toutes les sources possibles de nutriment. C'est là une approche écologiquement, socialement et économiquement viable.

Les techniques nucléaires et isotopiques jouent un rôle important dans la solution de ces problèmes agronomiques. Elles complètent les méthodes classiques de la recherche agronomique et donnent des résultats qui ne peuvent être obtenus par d'autres moyens. Nous allons voir comment ces techniques ont été et sont encore utilisées pour ce genre de recherche. Leur emploi a été favorisé, dans une mesure appréciable, par l'action concertée de l'AIEA et de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Depuis 1964, ces deux organisations exécutent des programmes par l'intermédiaire de leur division mixte des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, installée au siège de l'AIEA, à Vienne.

---

M. Hera est chef de la Section de la fertilité des sols, de l'irrigation et de la production agricole de la Division mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture.

## Bref historique

La recherche à l'aide d'isotopes remonte aux travaux de G.V. Hevesy, en 1923, qui donnèrent le coup d'envoi à l'application des isotopes aux études pédologiques et agricoles. Quelque trente-cinq ans plus tard, en 1959, l'AIEA fraîche émoulue concluait ses premiers contrats de recherche avec le Japon et la République fédérale d'Allemagne pour assister des études sur l'application rationnelle des engrais. A partir de 1962, l'activité des titulaires de contrats et d'accords de recherche originaires de pays en développement s'est intégrée dans les programmes de recherche coordonnée (PRC) de l'AIEA. Les deux premiers programmes de ce genre concernaient aussi la fertilité des sols et, plus particulièrement, l'application des isotopes à la fertilisation du riz (1962-1968), et l'apport des nutriments aux plantes ainsi que leur mouvement dans les sols (1962-1968).

Depuis lors, des dizaines de PRC ont été exécutés et, pour tout dire, la Section de la fertilité des sols, de l'irrigation et de la production agricole de la Division mixte a assumé la responsabilité technique de vingt-neuf de ces programmes en l'espace de trente ans. Une bonne part de la recherche a été inspirée par d'éminents pédologues mondiaux, Mac Fried, qui fut le premier directeur de la Division mixte FAO/AIEA, et Hans Broeshard, qui dirigea le Laboratoire d'agronomie de Seibersdorf. Leur œuvre de pionnier a laissé son empreinte parmi leurs homologues du monde entier.

Dès la première heure, les techniques isotopiques et associées se sont révélées d'une extrême utilité pour améliorer l'efficacité des engrais et optimiser la nutrition des plantes, parmi nombre d'autres applications. Le marquage isotopique d'un des éléments nutritifs d'un engrais ou du sol est une méthode directe sans égal pour déterminer la quantité de ce nutriment que la plante absorbe de chaque source.

**Etudes sur les engrais.** Grâce aux activités de la Division mixte au cours des trente dernières années, les techniques isotopiques ont été largement utilisées pour étudier l'efficacité des engrais appliqués à la culture des principales céréales que sont notamment le riz, le maïs et le blé. Ces études visaient essentiellement à améliorer et à stabiliser le rendement en grains en maximisant l'absorption des



A partir du haut dans le sens horaire: Humidimètre à neutrons servant à mesurer la teneur en eau des sols; M. Hans Blix, directeur général de l'AIEA (deuxième à partir de la gauche), et M. J. Diouf, directeur général de la FAO (au centre), suivent avec leur groupe les explications de l'auteur lors de la Conférence de l'AIEA sur l'emploi des techniques nucléaires et apparentées pour l'étude du sol et des cultures; Mme Helga Axman, de la section de pédologie FAO/AIEA, parmi des participants à un cours régional de formation au Ghana; participants à un cours régional de formation sur l'emploi des isotopes pour l'étude des relations sol-plante, organisé à Bangkok en 1995.

(Photos: C. Hera, AIEA)



éléments nutritifs des engrais et autres sources, tout en atténuant les effets nocifs éventuels sur l'environnement. Des engrais marqués à l'azote 15 ont été appliqués à une culture de trois façons différentes en faisant varier la source ainsi que l'époque et le mode d'épandage, pour mesurer leur absorption, ce qui a permis aux agronomes de déterminer les méthodes d'application les plus efficaces selon les sols et les conditions climatiques.

Le premier programme de fertilisation du riz (1962-1968) a étudié notamment l'efficacité relative de l'azote de différentes sources selon que l'engrais est épandu en surface ou incorporé dans la couche superficielle du sol jusqu'à cinq centimètres de profondeur. Des expériences au champ avec du nitrate d'ammonium, dont les deux principaux composants étaient préalablement marqués à l'azote 15, ont été faites dans cinq pays. Les résultats ont clairement montré lequel des deux composants était la source la plus efficace d'azote pour le riz, et comment il convenait de l'appliquer. L'absorption maximale a été constatée lorsque l'azote ammoniacal a été incorporé au sol. La façon d'appliquer l'azote nitrique n'avait pas d'effets sensibles sur son absorption.

Le PRC sur la fertilisation du maïs, auquel huit pays ont participé, fut une grande réussite. Il s'agissait de déterminer les meilleurs modes d'application de l'engrais, par rapport à l'épandage classique à la volée suivi d'un labour. Des engrais marqués à l'azote 15 et au phosphore 32 ont été utilisés. Les études ont abouti à la conclusion que le fermier devrait appliquer son engrais en plusieurs fois, d'une manière différente (épandage en bandes) et à divers moments du cycle végétatif.

Les résultats ont été exploités en Roumanie. Les semoirs ont été équipés d'un dispositif spécial permettant de distribuer l'engrais en même temps que les semences et un dispositif analogue a été monté sur les cultivateurs servant au désherbage pour répandre l'engrais pendant la période de végétation. Les essais ont été faits sur deux millions d'hectares de maïs, pendant six ans, et le rendement a augmenté de 0,62 tonne à l'hectare par rapport aux récoltes obtenues avec la pratique classique.

Le coût de l'adaptation à la nouvelle méthode ne représente que 5% de la valeur totale du gain de rendement de chaque année. Par rapport à la pratique habituelle, cette méthode a en outre l'avantage de supprimer une opération et ses effets nuisibles possibles sur les sols.

### L'azote atmosphérique

Malgré son abondance dans l'atmosphère (78%), l'azote est l'un des principaux facteurs limitatifs de la croissance végétale. Quelques plantes seulement absorbent directement l'azote atmosphérique. La solution consistant à épandre des engrais azotés est l'une des principales composantes du coût de la production agricole.

Les fermiers, tant des pays en développement que des pays développés, peuvent maintenant recourir au procédé dit de la fixation biologique de l'azote. Les légumineuses cultivées en symbiose avec quelques autres espèces et en présence de certains micro-organismes absorbent directement l'azote atmosphérique. Cette solution présente divers avantages: elle est économique, réduit les risques de pollution, fertilise le sol et enrichit la récolte en protéines. Pour la rendre efficace, il faut savoir gérer les systèmes de fixation de l'azote. Les méthodes isotopiques à l'azote 15 permettent de déterminer les quantités intégrées d'azote ainsi fixé par les plantes aussi bien naturelles que cultivées.

Au cours des vingt dernières années, plusieurs programmes internationaux de recherche FAO/AIEA se sont attachés à mesurer et à améliorer la fixation biologique de l'azote, en particulier la fixation symbiotique par les légumineuses dans divers systèmes. Les programmes en cours cherchent plus spécialement à améliorer à la fois les rendements et la fixation de l'azote par les légumineuses à grains, dans un contexte multidisciplinaire.

Jusqu'à présent, la fixation de l'azote s'avère très variable selon les espèces de légumineuses. Chez certaines d'entre elles, comme la fève, le processus est plutôt efficace, tandis que chez d'autres, tel le haricot commun, il ne l'est pas. Ces différences persistent dans des conditions environnementales très variées. Dans plusieurs pays, une grande diversité génotypique a été observée quant à la fixation de l'azote parmi les variétés du haricot commun.

Les arbres fixateurs d'azote présentent un intérêt particulier et les études montrent qu'ils jouent un rôle important dans les systèmes agricoles: ils rétablissent, ou même améliorent, la fertilité des sols, dont ils réduisent en outre l'érosion, et ils poussent bien dans des sols déficients en azote. Des méthodes permettant de définir avec précision les facteurs qui influent sur leur croissance dans diverses conditions ont été et sont encore à l'étude.

Le rôle des algues bleu-vert, telle *Azolla*, et leur association dans les rizières de plaine font aussi l'objet de recherches.

Les variétés de riz à grand rendement de la «révolution verte» exigent d'importantes quantités d'engrais chimiques azotés onéreux. Les agronomes savent depuis longtemps que la symbiose aquatique d'*Azolla-Anabaena*, qui fixe l'azote, pourrait fournir au moins en partie l'azote dont le riz a besoin. Entre 1984 et 1989, un programme financé par l'Office suédois pour le développement international et coordonné par la Division mixte FAO/AIEA comportait l'étude des propriétés d'*Azolla* comme engrais organique pour le riz; des scientifiques de neuf pays rizières — Bangladesh, Brésil, Chine, Hongrie, Indonésie, Pakistan, Philippines, Sri Lanka et Thaïlande — y ont participé.

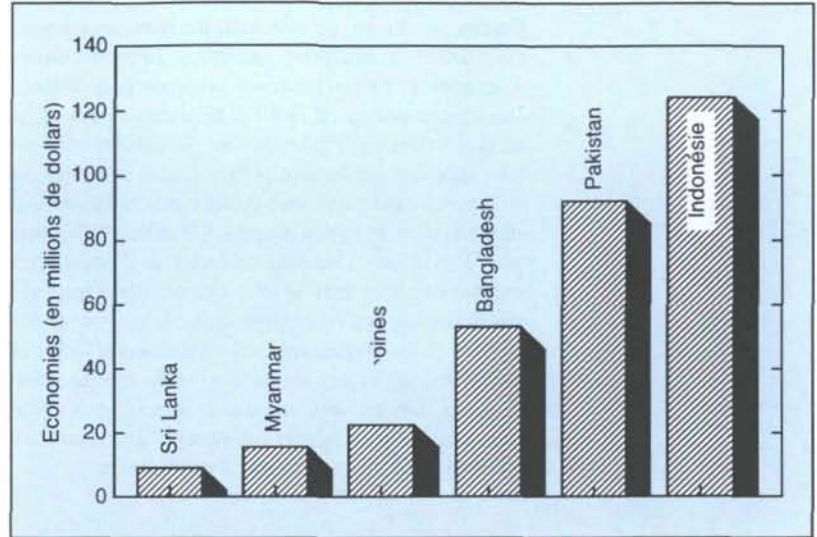
Bien que la symbiose *Azolla-Anabaena* soit utilisée depuis des siècles comme engrais vert dans les rizières de diverses régions de Chine et du

Viet Nam, la recherche ne s'est intensifiée qu'après la crise du pétrole de 1973 qui avait fait monter en flèche les prix des engrais azotés. *Azolla* se développe très rapidement, pouvant doubler son poids en trois ou quatre jours dans des conditions optimales. Les essais en rizière effectués avant la mise en œuvre de ce programme ne permettaient pas de savoir si l'azote accumulé par *Azolla* provenait principalement de l'atmosphère ou du sol. Certes, il était clair que l'incorporation d'*Azolla* au sol améliorait la récolte de riz, mais peu d'expériences avaient été réalisées pour en explorer les causes.

Grâce à la technique de marquage à l'azote 15, il était possible d'établir que 70 à 80% de l'azote contenu dans *Azolla* provenait de l'atmosphère et que l'algue et le riz ne se disputaient pas le peu d'azote contenu dans le sol. De fait, les expériences les plus récentes ont montré qu'une couverture d'*Azolla* flottant sur l'eau des rizières peut même accentuer l'effet des engrais azotés chimiques. L'urée est le plus communément utilisée pour fertiliser les rizières, mais elle est généralement peu efficace car la moitié ou plus se dissipe dans l'atmosphère. L'hydrolyse de l'urée engendre une réaction alcaline qui se combine avec les effets de la photosynthèse des algues et, souvent, des valeurs de pH dépassant 9, lesquelles favorisent la volatilisation de l'ammonium en ammoniac, ont été relevées. Fort heureusement, *Azolla* limite la croissance des algues car elle fait de l'ombre. Après un épandage d'engrais, une baisse de pH de 1 à 2 points en présence d'*Azolla* a été observée.

Par ailleurs, *Azolla* absorbe une partie de l'engrais azoté dissout dans l'eau, de sorte que, si elle est ensuite incorporée dans le sol, cet engrais s'ajoute à l'azote fixé et devient disponible pour le riz. Une expérience faite à Fuzhou (Chine) a montré que les pertes d'azote de l'urée épandue en surface deux semaines après le repiquage ont été ramenées de 50% en l'absence d'*Azolla* à 25% après ensemencement de la rizière avec cette algue au moment du repiquage. L'absorption de l'engrais marqué est passée de 26 à 35%. En Thaïlande, l'application d'urée au moment du repiquage, avec ou sans inoculation d'*Azolla*, a fait augmenter le rendement de 10 à 15% dans les parcelles où l'algue était déjà présente.

Lorsqu'elle est incorporée au sol des rizières, *Azolla* s'avère aussi bonne que l'urée comme source d'azote. Non seulement l'azote d'*Azolla* et celui de l'urée étaient absorbés en quantités égales, mais aussi, ce qui est intéressant, la proportion d'azote qui demeure dans le sol après la récolte était plus importante avec *Azolla*. Sur certaines parcelles expérimentales, la quantité d'azote disponible pour la récolte suivante était suffisante pour donner des récoltes deux à trois fois plus abondantes qu'avec l'urée, en particulier s'il s'agissait de blé. Les économies que l'emploi d'*Azolla* comme engrais permet de faire sur une récolte de riz sont substantielles (voir le graphique).



Le succès de ce programme a montré que des scientifiques de différentes parties du monde pouvaient travailler ensemble au sein d'un groupe avec des méthodes très étudiées et progresser rapidement vers des objectifs communs. Comme les études ont été faites dans des environnements très divers, les résultats sont très généralement applicables.

**Économies réalisables en utilisant *Azolla* comme engrais azoté dans les rizières**

#### La photosynthèse et l'absorption de l'eau

Les techniques isotopiques sont indispensables pour étudier la photosynthèse, le métabolisme des végétaux, le transport et l'absorption des nutriments. En exposant des plantes à du dioxyde de carbone marqué au carbone 14, il est possible d'observer la photosynthèse et de suivre le mouvement des métabolites dans toute la plante à l'aide de l'autoradiographie, par exemple. Depuis peu, le carbone 13 est davantage employé comme indicateur car il est abondant et se mesure facilement. Isotope stable, il ne nuit pas à l'environnement et se prête remarquablement à l'étude de la matière organique du sol et des gaz à effet de serre. Toutefois, les plantes le discriminent pendant la photosynthèse. Le phénomène varie d'une espèce à l'autre, mais il demeure étroitement lié à l'absorption de l'eau par la plante.

Cette propriété peut être utilement exploitée pour déterminer les variétés de plantes cultivées et les espèces d'arbres qui utilisent l'eau efficacement. Dans le cadre d'un PRC, plusieurs génotypes de plantes alimentaires et d'arbres poussent sur des sols pauvres, utilisant très efficacement une eau rare. Au Maroc et en Tunisie, des génotypes de blé sont à la fois économes en eau et d'un très bon rendement. Au Soudan, des variétés d'*Acacia Senegal*, l'arbre qui donne la gomme arabique, vivent parfaitement dans des régions où sévit souvent la sécheresse. Au Sri Lanka, la même technique a permis aux spécialistes de découvrir des variétés de cocotier très résistantes à la sécheresse et donc parfaitement adaptées pour être cultivées dans la région sèche du pays.

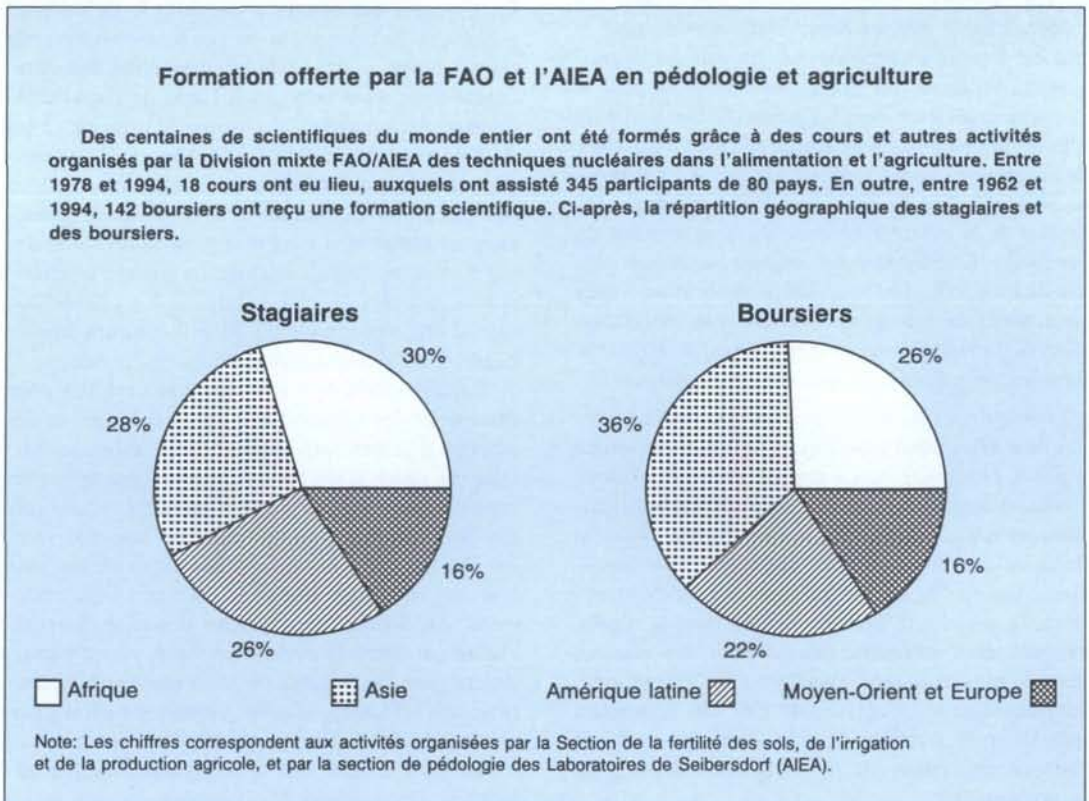
Un projet de recherche lancé en 1990 consiste à étudier comment utiliser efficacement de maigres ressources en eau pour maximiser la productivité. L'emploi de l'humidimètre à neutrons et de méthodes apparentées a facilité l'évaluation des pratiques et des calendriers d'irrigation. L'humidimètre est très utile non seulement pour mesurer la teneur du sol en eau mais aussi pour comprendre la dynamique de l'eau dans le milieu naturel. Un autre PRC a permis d'examiner l'emploi rationnel de l'eau et des engrais en zones semi-arides. Ces dernières recevant par définition peu de précipitations, la croissance des plantes et les rendements sont fortement tributaires de bonnes pratiques de gestion et de conservation de l'eau. Les travaux ont aidé à déterminer les pratiques assurant un apport suffisant de nutriments aux cultures dans ces conditions d'exploitation.

**Protection de l'environnement**

Outre leur souci d'améliorer la production agricole, nombre de pays, pour la plupart industrialisés, se trouvent en face d'un problème commun d'un autre ordre: l'infiltration de nitrates dans les eaux souterraines et la pollution de l'eau potable et des lacs qui en résulte. Dans ce cas, il faut protéger non seulement les terres arables exploitées ou potentielles, mais aussi les ressources d'azote, et respecter partout dans le monde les normes de plus en plus strictes de protection de l'environnement.

L'azote 15 est un auxiliaire particulièrement efficace pour étudier le comportement de l'azote des engrais dans l'environnement. Avec l'aide de l'Allemagne, la Division mixte FAO/AIEA a exécuté un programme international qui a fourni les directives essentielles. Les recherches ont abouti aux conclusions suivantes:

- Vu les perspectives et les délais de mise au point de nouvelles pratiques agricoles, l'application des engrais azotés par les méthodes classiques doit s'intensifier et se généraliser au cours des prochaines décennies.
- En raison de cette intensification, des quantités croissantes d'azote aussi bien du sol que des engrais s'échapperont du système sol-plante pour se perdre dans l'environnement. Les teneurs du sol en azote et la productivité qui en dépend peuvent néanmoins être préservées si l'on améliore les pratiques de gestion.
- Dans certains cas, les concentrations de nitrates dans le sol et dans l'eau potable continueront probablement d'augmenter. Il conviendrait d'en déterminer les diverses sources.
- Dans les pays en développement, les pertes d'engrais azotés coûtent relativement cher. Dans les pays industriels, la consommation croissante d'engrais ne fait qu'aggraver les problèmes et les coûts de la protection de l'environnement et de la santé. D'après les données obtenues et l'information analysée, il serait possible de circonscrire ces problèmes en améliorant les pratiques agricoles



de gestion des sols et de l'eau. En particulier, d'amples perspectives semblent s'offrir pour une meilleure exploitation des sources d'azote de remplacement, tels l'azote biologiquement fixé par les légumineuses et d'autres espèces, et les engrais organiques.

- Les organismes des Nations Unies, notamment la FAO, l'AIEA, le Programme des Nations Unies pour l'environnement et l'Organisation mondiale de la santé, peuvent, en collaborant plus étroitement avec des programmes régionaux et nationaux pertinents, prendre sans attendre les mesures indispensables pour faciliter les améliorations et la recherche nécessaires et accélérer l'éducation et la formation qui font encore défaut.

### Services et activités d'appui

Plusieurs activités sont menées de front pour assurer le transfert des technologies nucléaires en vue du développement agricole. La section de pédologie du Laboratoire FAO/AIEA d'agronomie et de biotechnologie de Seibersdorf offre toute une série de possibilités de recherche et de formation.

**Cours de formation.** Des cours interrégionaux sur l'emploi des isotopes et des rayonnements pour l'étude des relations sol-plante sont organisés tous les ans depuis 1978 au Laboratoire de Seibersdorf. Chaque cours dure normalement entre cinq et six semaines et peut être suivi par vingt participants de toutes les régions. De plus, une aide est prévue pour des cours nationaux et régionaux.

**Bourses de perfectionnement.** La section de pédologie de Seibersdorf accueille chaque année une dizaine de scientifiques dans deux disciplines. Les boursiers en analyse sont accueillis pour des périodes de deux à trois mois leur permettant de se former aux techniques analytiques isotopiques utilisées en recherche phytopédologique (méthodes d'analyse de l'azote 15 par spectrométrie d'émission optique, par exemple); la formation comporte un enseignement technique et des séances de travaux pratiques. Les boursiers en recherche sont accueillis pour des périodes de six à douze mois et travaillent dans un domaine relevant du programme de travail de la Division mixte FAO/AIEA. Ils reçoivent un enseignement sur les stratégies expérimentales et les applications des méthodes isotopiques et apparentées dans les domaines où ils continueront de travailler après leur retour dans leur pays. Ils doivent terminer un travail de recherche et en faire le rapport.

En outre, l'AIEA propose des séjours de brèves durées spécialement réservés à des scientifiques chevronnés. D'autres possibilités de formation sont offertes aux scientifiques de pays industriels et de pays en développement, telles que des places d'internes tous frais payés, des services d'experts à titre gratuit et des postes d'adjoints professionnels.

**Aide à la recherche.** Dans le cadre des PRC et d'autres structures, d'amples réseaux internationaux et régionaux ont été créés au cours des années. La section de pédologie du Laboratoire offre un certain nombre de services d'appui: 15 à 20 000 échantillons sont analysés chaque année pour des projets en cours dans des pays en développement; des engrais marqués à l'azote 15 sont envoyés à des participants à des projets de recherche déterminés et des services d'analyse sont fournis à des laboratoires de pays en développement qui reçoivent une assistance technique de l'AIEA mais ne disposent pas d'installations suffisantes; et elle demeure le principal responsable de la mise au point et du transfert de la technologie du dosage de l'azote 15 destinée aux projets d'assistance technique de l'AIEA.

**Service international d'assurance de la qualité.** Sa création sera l'objet d'une initiative récente. Il visera les dosages de l'azote 15 par spectrométrie d'émission optique et les installations de la section de pédologie serviront de laboratoire FAO/AIEA de «référence». Il devra:

- veiller à ce que les dosages de l'azote 15 par les laboratoires locaux soient internationalement acceptables;
- rassurer et encourager les homologues en ce qui concerne leurs pratiques analytiques;
- favoriser la coopération régionale et assurer le transfert effectif des méthodes d'analyse de l'azote 15 aux pays en développement dans le cadre des programmes FAO/AIEA.

Ce service marque un nouveau progrès de l'action internationale vers le transfert effectif des techniques nucléaires et isotopiques à des fins bénéfiques. Il permettra aux pays en développement de se perfectionner dans l'application de ces puissants moyens de développer l'agriculture de façon durable.