

on accélère le rythme de la nature

Des mutations se produisent spontanément dans tout ce qui vit. Une mutation, en intervenant dans la chimie du système génétique de l'organisme ou en changeant la structure d'un chromosome, modifie la structure ou le fonctionnement de l'organisme et de ses produits.

Le plus souvent, la mutation est néfaste et ses effets sont éliminés par sélection naturelle. Mais il arrive aussi qu'une mutation présente des avantages, soit qu'elle élève le potentiel de survie et de reproduction de l'organisme ou qu'elle augmente la valeur de végétaux et d'animaux d'une utilité directe pour l'homme. Dans le présent article, M. Björn Sigurbjörnsson, directeur adjoint de la Division mixte FAO/AIEA de l'énergie atomique dans l'alimentation et l'agriculture, explique en quoi consiste la tâche du spécialiste de la sélection par les mutations, ainsi que le rôle des techniques nucléaires dans la «Révolution verte».

Le présent article s'inspire entre autres d'un texte de M. Sigurbjörnsson paru au début de l'année dans le «Scientific American».

Le principal moyen de provoquer les mutations qui nous intéressent consiste à irradier les semences, bien que des mutations puissent également être produites en irradiant la totalité de la plante ou en traitant les semences avec des mutagènes chimiques. C'est en 1927 que l'on découvrit la possibilité de provoquer artificiellement des mutations, mais les premiers essais d'application pour améliorer les plantes ne furent pas couronnés de succès et l'on abandonna l'idée. Mais au cours des dernières années, les connaissances en la matière se sont développées au point que l'on peut la plupart du temps obtenir de bons résultats. Plus de 100 variétés de mutants induits de plantes de grande culture — notamment le blé, le riz, l'orge, l'avoine, le soja et plusieurs légumes, arbres fruitiers et plantes ornementales— ont été commercialisées et sont cultivées sur des millions d'hectares dans toutes les parties du monde. Certaines de ces variétés ont joué un rôle dans la «Révolution verte» qui s'est traduite par une augmentation considérable du rendement des cultures et de nouvelles améliorations apportées aux plantes de grande culture grâce à des mutations induites devraient contribuer largement à entretenir et consolider cette révolution.

En 1964, l'AIEA et la FAO ont uni leurs activités en créant la Division mixte FAO/AIEA de l'énergie atomique dans l'alimentation et l'agriculture. Depuis lors, la Division mixte a exécuté plusieurs programmes coordonnés sur la sélection des plantes par mutations en vue d'améliorer les récoltes. L'un des premiers, un programme de recherches sur l'emploi des mutations induites en riziculture, a été exécuté essentiellement par des établissements de l'Asie du Sud-Est et a donné naissance à plusieurs souches nouvelles. Un programme de recherches coordonnées est actuellement exécuté en vue d'améliorer la teneur en protéines des céréales et des légumes. Les scientifiques qui y participent ont déjà fait état de résultats encourageants dans l'amélioration de la teneur en protéines du riz et de l'orge et l'amélioration de cultures riches en protéines telles que les haricots et les pois. Des mutants du riz ayant une teneur en protéines nettement plus élevée ont été produits au Japon et, au Pakistan, la teneur en protéines du riz «miracle» a été augmentée. Au Japon, le traitement par irradiation d'une seule variété de riz a permis d'obtenir une série de mutants avec des teneurs en protéine très variées, identiques à toutes celles qui existent dans la nature.

Modification de l'hérédité

Les mutations sont en fait des modifications brusques des caractères héréditaires d'un organisme et l'on entend notamment par ce terme toutes les modifications qui ne peuvent s'expliquer par un regroupement normal de tous les éléments de l'hérédité. Comme elles sont à l'origine même de l'instabilité génétique, les mutations conditionnent finalement l'évolution de toutes les formes de vie. (A ce sujet, l'éminent spécialiste suédois de la sélection des plantes, M. Åke Gustafsson a récemment souligné que la «Révolution verte» ne représente qu'un début. Ce qui nous intéresse vraiment, c'est une «Évolution verte» soutenue par la recherche et la technologie agronomiques et accompagnée d'adaptations économiques, sociales et politiques.)

Les mutations naturelles ou spontanées ont un certain nombre de causes. Les rayons cosmiques qui frappent constamment la terre peuvent pénétrer facilement dans la matière. Si l'un d'entre eux atteint un chromosome, il peut provoquer une modification par mutation. Des

phénomènes physiques normaux, tels que la chaleur, peuvent produire des mutations; l'oxygène sous pression peut avoir les mêmes effets. On a démontré que les éléments génétiques peuvent subir des mutations simplement du fait du vieillissement. Il s'est avéré qu'un certain nombre de substances, notamment la caféine, pouvaient avoir des effets mutagènes.

Mais la proportion de mutations spontanées est assez faible. Sur 10 000 jeunes plants d'orge, on peut espérer en trouver un ou deux qui ne sont pas du vert habituel parce qu'ils ont subi des mutations spontanées qui ont une influence sur leur chlorophylle. La proportion de mutations spontanées varie également du fait que certains gènes peuvent subir des mutations plus souvent que d'autres.

Les premiers travaux sur la production de mutations ont été faits par un généticien américain, H. J. Muller, qui a publié en 1927 un rapport décrivant comment il avait découvert que la fréquence des mutations chez la mouche des fruits *Drosophila melanogaster* était plus élevée après exposition aux rayons X. Il reçut ultérieurement le prix Nobel pour ces travaux. A peu près à la même époque, un autre chercheur américain, L. J. Stadler, démontrait la production de mutations dans le blé et l'orge. Même à ce premier stade, Muller pensait que les mutations induites pourraient révolutionner la sélection des plantes.

L'évolution naturelle repose sur trois facteurs principaux: les mutations spontanées; l'hybridation, qui arrange à nouveau les mutations selon des modèles génétiques pratiquement illimités, et la sélection naturelle qui favorise la perpétuation des éléments les mieux aptes, génétiquement parlant, à survivre et à se reproduire. Le spécialiste de la sélection des plantes n'avait réussi qu'à contrôler deux de ces facteurs, l'hybridation —en croisant des plantes bien déterminées— et la sélection naturelle— en imposant certaines contraintes et en sélectionnant soigneusement les meilleures plantes. Lorsqu'il se fut avéré possible de provoquer artificiellement des mutations, de nombreux spécialistes de la sélection des plantes cherchèrent à contrôler ce troisième élément de l'évolution.

Mais dans les premiers temps, on connaissait mal la radiosensibilité des semences, l'effet de la condition physiologique de la semence au moment du traitement, l'effet des rayonnements sur la plante et la manière dont les générations suivantes se développeraient. Même lorsque l'on fut parvenu à réaliser avec succès des mutations, on ne put les appliquer de manière satisfaisante car on n'avait pas bien vu la nécessité de fixer des objectifs déterminés à la sélection, de choisir des «parents» appropriés et de traiter en conséquence les générations suivantes. De ce fait, les «miracles» attendus ne se produisirent pas.

Toutefois, quelques spécialistes de la sélection des plantes, notamment le professeur Gustafsson, de l'Université de Lund, comprirent que cet échec n'avait rien à voir avec le principe des mutations induites, mais qu'il tenait à d'autres facteurs. Leurs travaux permirent de renverser la situation.

Principes et application

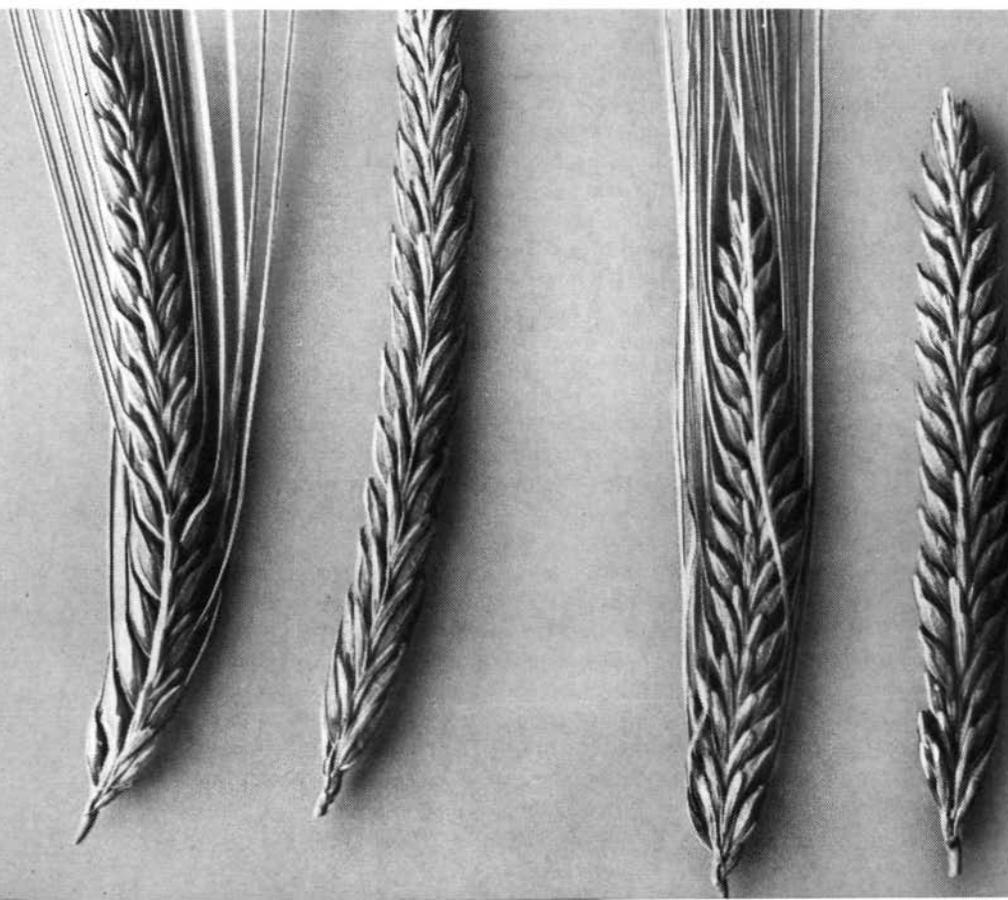
Récemment encore, les rayons X et les rayons gamma étaient les principaux agents utilisés pour provoquer des mutations. Ils n'étaient pas toujours efficaces car on ne s'était pas bien rendu compte qu'il était

A gauche, orge normal; à droite, un mutant induit par irradiation aux neutrons rapides. On voit nettement que l'épi est plus court, plus fourni.
Pour plus de clarté, les barbes des épis de droite (orge normal et mutant) ont été supprimées.

important de contrôler les conditions physiques de la semence — essentiellement sa teneur en oxygène et son degré d'humidité — au moment du traitement. Par ailleurs, l'irradiation par des neutrons s'accompagne de la difficulté de mesurer exactement les doses dans des réacteurs nucléaires, particulièrement lorsqu'on utilise des neutrons rapides ou de haute énergie.

Les difficultés inhérentes à l'utilisation efficace de ces deux types d'irradiation ont été récemment résolues à la suite d'études intensives faites par des équipes de biologistes, de chimistes et de physiciens, qui ont permis de provoquer des mutations de manière bien plus efficace. La plupart des spécialistes de la sélection des plantes peuvent maintenant se procurer facilement des rayonnements ionisants: ce sont des rayons X émis par des tubes à rayons X et d'autres dispositifs, des rayons gamma émis par des radioisotopes (essentiellement le cobalt 60 et le césium 137) et des neutrons produits dans des réacteurs ou par des générateurs de neutrons spéciaux. Il convient toutefois de préciser que de nombreux perfectionnements restent encore à apporter.

On peut provoquer des mutations non seulement à l'aide de rayonnements ionisants, mais également au moyen d'un certain nombre de mutagènes chimiques qui produisent des effets tellement comparables à ceux des rayonnements qu'on les a qualifiés de substances radio-imitatives. Les plus efficaces sont constitués par plusieurs dérivés de l'acide sulfonique, en particulier le sulfonate d'éthyle méthane. Les mutagènes chimiques sont inefficaces lorsqu'ils sont appliqués sur l'appareil végétatif d'une plante et ceci limite considérablement leur utilisation. De ce fait, pour l'instant, on ne s'en sert que comme complément aux rayonnements dans le traitement des semences. Lorsque l'on sélectionne



des plantes, on fait en général appel à plusieurs mutagènes pour assurer la production d'un nombre maximum de mutations. De nombreux spécialistes ont pour habitude de traiter différents lots de semences avec des rayons gamma, des neutrons et un seul mutagène chimique, par exemple le sulfonate d'éthyle méthane. Puis ils opèrent un choix parmi les mutants obtenus à partir de ces trois traitements. On a constaté que l'on n'avait pas intérêt à traiter les mêmes semences avec plusieurs mutagènes.

Les mutations induites peuvent être utilisées dans la sélection des plantes de manières très diverses. Le moyen le plus direct consiste à multiplier la semence du mutant induit et à la mettre sur le marché dès qu'on en a produit un nombre suffisant. Un des avantages de cette méthode est qu'elle permet de mettre au point une variété améliorée dans des délais relativement courts.

L'utilisation directe des mutants induits a pour autre avantage que l'amélioration obtenue est généralement hautement spécifique. Une application idéale de ce principe pourrait se traduire par la renaissance d'une variété habituellement bien adaptée et cultivée avec succès mais qui est en voie de disparition parce qu'il lui manque une caractéristique agronomique déterminée, telle que la rigidité de la tige, ou la résistance à une maladie. Une autre solution consisterait à trouver la caractéristique manquante dans une autre variété, à réaliser une fécondation croisée entre cette variété et celle qui se trouve sur la marché puis à entreprendre un long procédé de sélection en choisissant tous les caractères positifs de la variété originale, plus celui que l'on veut prendre dans l'autre variété. Ce résultat n'est pas toujours facile à obtenir, étant donné que le caractère recherché peut être lié à un gène dépendant du même chromosome que d'autres gènes donnant des caractères non souhaitables. Il est souvent difficile de séparer par des moyens classiques des gènes qui sont ainsi liés. Même dans ce cas, un traitement aux mutagènes est utile, car il peut permettre de rompre ce lien, c'est-à-dire de séparer le gène que l'on veut sélectionner de tous les autres.

Le traitement par les mutagènes de la variété commercialisée peut évidemment se traduire par une mutation provoquant directement le caractère recherché sans qu'il faille réaliser une fécondation croisée. D'une manière générale, une plante ayant subi une telle mutation induite conserve ses autres caractères agronomiques importants, bien qu'il y ait des exceptions.

Les pâtes ont retrouvé leur qualité

Cette caractéristique des mutations induites est extrêmement importante et offre au spécialiste de la sélection des plantes un moyen unique de compléter son œuvre. Plusieurs variétés commerciales ont été mises au point à partir de ce principe. Les nouvelles variétés de blé dur italien en sont un bon exemple. Les pâtes italiennes ne font honneur à leur réputation que si elles sont fabriquées à partir de variétés particulières de blé dur. La variété italienne courante, dite Cappelli, est une variété ancienne considérée comme ayant un rendement élevé. Lorsqu'on a augmenté le rendement du blé à pain en appliquant de grandes quantités d'engrais et en cultivant de nouvelles variétés de blé qui réagissaient bien à l'engrais, on a constaté que les anciennes variétés de pâtes italiennes avaient perdu en qualité. Cela s'explique de la manière suivante. Lorsqu'on applique davantage d'engrais aux anciennes variétés de blé,

celles-ci, à la différence des nouveaux types nains, réagissent en poussant en hauteur. Les tiges s'affaiblissent et, en particulier, par temps de pluie et de vent, elles ne peuvent supporter le poids des épis. Alors les plantes se couchent, c'est-à-dire que leurs tiges se penchent ou se brisent, ce qui provoque une diminution du rendement au lieu de l'augmentation escomptée. On a remédié à la situation en croisant l'ancienne variété de blé avec d'autres variétés à haut rendement et résistant à la verse mais la qualité des pâtes en souffrit.

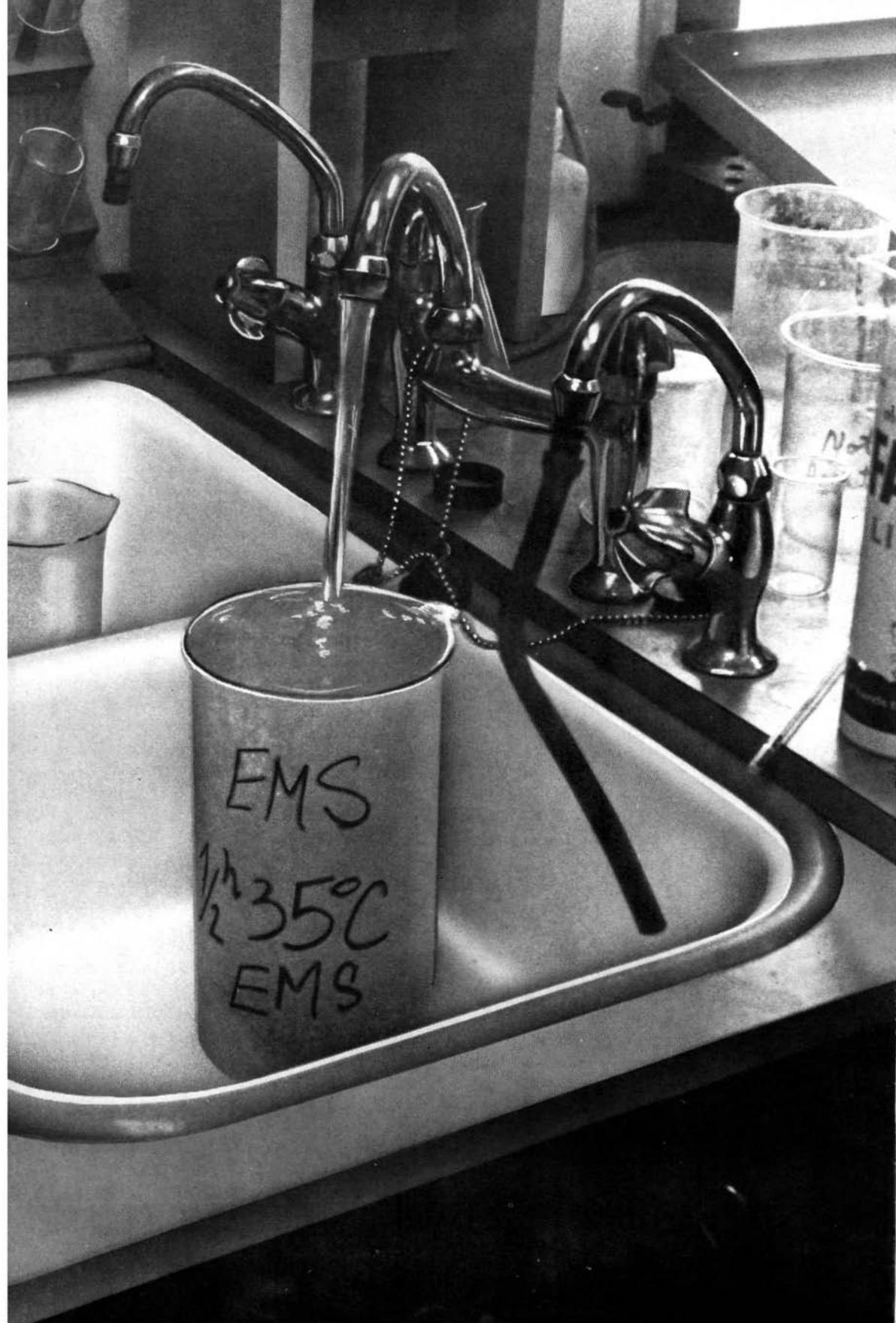
G.T. Scarascia-Mugnozza, qui travaillait alors au Centre de recherche nucléaire italien de Casaccia, a résolu le problème en irradiant aux neutrons des semences de Cappelli, puis en sélectionnant des mutants présentant des tiges plus courtes et plus fortes et à rendement élevé mais qui conservaient les autres qualités de Cappelli. Les deux nouvelles variétés de mutants, dénommées Castelfusano et Castelporziano, ont des tiges beaucoup plus courtes que celles de Cappelli et beaucoup plus fortes, ce qui leur permet ainsi de résister à la verse. Leur rendement est plus élevé et la qualité du grain demeure à peu près la même que celle de Cappelli pour l'un des mutants; l'autre est d'une qualité inférieure, mais encore acceptable.

Cela vaut-il vraiment la peine?

L'attitude des spécialistes de la sélection des plantes envers les possibilités qu'offrent les mutations radioinduites, va d'un enthousiasme exagéré au scepticisme. La Division mixte FAO/AIEA s'est efforcée de s'en tenir à un moyen terme entre ces deux extrêmes. A partir de ses propres expériences et de conseils fournis par d'éminents spécialistes de la sélection, elle a établi un Manuel sur la sélection par mutations, qui a été publié en 1970. Le Laboratoire de l'Agence à Seibersdorf, près de Vienne, et le Centre autrichien de recherches sur l'énergie atomique, ont mis au point ensemble une installation permettant d'irradier des semences au moyen de neutrons dans des réacteurs nucléaires. L'installation agit comme écran vis-à-vis des rayons gamma et des neutrons lents, de telle sorte que l'on peut déterminer avec précision la dose de neutrons rapides.

Des programmes de recherches coordonnées ont été organisés dans plusieurs pays. Un programme typique en cours d'exécution en Asie du Sud-Est a permis de sélectionner plusieurs souches de mutants de riz amélioré qui font l'objet d'essais de culture poussés. Des agronomes coréens et japonais travaillant en collaboration ont isolé des mutants résistant au *Piricularia oryzae*, qui dévaste les cultures. Un groupe de chercheurs indiens a amélioré la qualité de cuisson du riz en transférant au type «japonica» le grain fin caractéristique du type «indica» qui ne colle pas et est riche en amylose, tout en conservant tous les autres caractères de la souche japonica, y compris la résistance à la nielle. Il s'agit d'une réalisation particulièrement importante, étant donné les difficultés qu'avait posé le croisement des deux types que, pendant vingt ans, l'on s'était efforcé de réaliser avec un succès limité.

En collaboration avec d'autres institutions intéressées, la Division mixte FAO/AIEA a organisé des essais internationaux en pleine terre de mutants de riz et de blé prometteurs. Les mutants de riz qui avaient été mis au point avant que le programme coordonné ne soit entrepris ont fait immédiatement l'objet d'essais, en collaboration avec l'Institut international de recherches sur le riz. Les mutants de la variété «indica» n'ont



EMS
1/2 35°C
EMS

pas donné un rendement tout à fait aussi bon que les nouvelles variétés à haut rendement des Philippines, bien que les qualités de table et la capacité d'adaptation locale de certains d'entre eux convinsent mieux aux pays dans lesquels ils avaient été mis au point. Le mutant de japonica «Reimei» était la souche à rendement le plus élevé parmi celles qui ont fait l'objet d'essais dans sa région d'adaptation. La Division envisage maintenant de procéder à des essais internationaux sur les souches de mutants qui ont été mises au point dans le cadre de son programme.

Les essais sur le blé ont notamment porté sur les mutants de blé dur mis au point en Italie par Scarascia-Mugnozza. Ces essais ont été effectués tous les ans depuis 1966 dans plusieurs pays du Bassin méditerranéen et du Moyen-Orient. Dans presque tous les pays, les mutants se sont toujours révélés supérieurs en rendement et dans leur résistance à la verse, aux meilleures variétés locales de blé dur et à d'autres variétés de contrôle.

La Division mixte FAO/AIEA envisage maintenant de coordonner la recherche relative à l'utilisation des mutations induites pour améliorer certaines caractéristiques spécifiques manquant à des plantes de grande culture. Une attention particulière est accordée aux problèmes liés à la résistance aux maladies et à la teneur en protéines; l'AIEA et la Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, à Munich, ont récemment conclu un accord sur la participation de la Gesellschaft à un programme mondial de recherches visant à améliorer la teneur en protéines et la qualité des cultures qui sont particulièrement importantes pour les pays en voie de développement. Une grande partie de la recherche appliquée relative à ce programme sera exécutée dans les pays en voie de développement eux-mêmes, en sus des travaux qui seront faits en République fédérale d'Allemagne et dans les propres laboratoires de l'Agence. Il est également prévu de coordonner les études sur l'application des rayonnements et des isotopes dans des techniques analytiques pour la sélection rapide de très grandes quantités de semences de plantes, en vue d'améliorer les protéines. Si ces entreprises étaient couronnées de succès, elles contribueraient grandement à résoudre les problèmes que pose la fourniture de quantités suffisantes de denrées nutritives pour alimenter une population mondiale en constante augmentation.