

## L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE AU SERVICE DE L'AGRICULTURE (\*)

Contrairement à ce qu'on pourrait penser, l'énergie nucléaire n'apporte pas une solution miraculeuse aux problèmes agronomiques, et ne représente pas un moyen direct capable d'augmenter la production, ou de provoquer une croissance exceptionnelle des végétaux.

L'utilisation de l'énergie nucléaire se situe plutôt au niveau de la recherche fondamentale ou appliquée ; elle se présente sous l'aspect de techniques permettant d'aborder certains problèmes quelquefois insolubles avec les méthodes traditionnelles.

Deux champs d'application très différents sont offerts aux agronomes :

- 1) *Les techniques d'irradiation*, qui utilisent les propriétés d'interaction des rayonnements avec la matière vivante, sont employées soit pour induire des modifications génétiques, soit pour détruire les organismes.
- 2) *Les techniques de marquage* fondées sur les propriétés de détection particulières aux radio-isotopes, permettent de résoudre une quantité de problèmes, liés au mouvement des ions nutritifs dans le sol et dans la plante, au déplacement d'insectes, etc...

Les techniques nucléaires ne sont guère utilisées que depuis une quinzaine d'années, au moment où les chercheurs ont pu disposer, à des prix abordables, de sources et de radioéléments fournis par les premiers réacteurs construits aux Etats-Unis.

A la première Conférence de Genève sur l'utilisation pacifique de l'énergie atomique, en 1955, l'éventail des diverses applications était déjà dressé.

Les exemples qui vont suivre sont puisés dans les différents domaines de la recherche agronomique et montreront, en même temps, l'intérêt que peuvent présenter les techniques nucléaires, et leurs limites.

(\*) par M. Louis A. BUSCARLET, Ingénieur agricole, Chargé d'une maîtrise de conférences à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de l'Université de Madagascar.

## 1. — AMÉLIORATION DES PLANTES

Les méthodes conventionnelles d'amélioration consistent, soit à créer de nouvelles variétés par hybridation, soit à sélectionner des variétés améliorées provenant de mutations naturelles, soit enfin à provoquer des mutations.

Les mutations se produisent dans la nature sous l'effet des rayons cosmiques et se traduisent par l'apparition d'un caractère nouveau, qui peut se transmettre à la descendance. Cette modification héréditaire peut provenir soit du changement de nature des gènes chromosomiques (mutation ponctuelle ou génique), soit d'une modification du stock chromosomique portant sur le nombre des chromosomes ou sur l'altération de certains d'entre eux (mutation chromosomique).

Les généticiens ont cherché depuis longtemps à provoquer des mutations par des agents physiques ou chimiques.

L'action mutagène des rayonnements X a été découverte en 1927 par MULLER sur la drosophile.

Depuis, tous les types de radiations ont été essayés et celles qui sont essentiellement utilisées aujourd'hui sont les rayons X, les rayonnements gamma, les neutrons et quelquefois les électrons.

Les caractères généraux de la mutagenèse par radiation sont actuellement assez bien connus ; en voici les grandes lignes :

— Chez les organismes les radiations produisent à la fois des mutations géniques et des remaniements chromosomiques sans action spécifique ni de la part des radiations, ni du matériel végétal.

— En gros, ce sont les mêmes mutations qui apparaissent dans la nature, mais avec une fréquence plus grande (100 à 1.000 fois).

L'action génétique est liée à la dose d'irradiation, à son intensité, à sa nature : l'efficacité des différents rayonnements repose sur la densité d'ionisation sur la trajectoire.

Une mutation chromosomique nécessite une quinzaine d'ionisations à travers le chromosome ; au-dessous on peut obtenir une mutation ponctuelle.

L'intérêt pratique des mutations provoquées par les radiations, dans l'amélioration des plantes cultivées, ressort des trois exemples suivants :

1) — Pour de nombreuses espèces cultivées il existe des variétés excellentes mais qui présentent un défaut (sensibilité aux maladies, à la verse, etc...).

La méthode génétique classique consiste à faire une succession de croisements en retour entre la variété A, dont on veut conserver l'ensemble des caractères (génome) et la variété B résistante à la maladie.

Dans le cas où le caractère de résistance est récessif, c'est-à-dire qu'il n'apparaît pas dans le croisement, la méthode est longue et laborieuse. La production artificielle de mutations peut alors être plus rapide ; en effet, les mutations se produisant de façon indépendante, si la bonne se produit, le reste du génome est conservé.

Comme exemple pratique on peut citer le travail effectué sur le riz Allorio par René MARIE (Institut National de la Recherche Agronomique de Montpellier). La variété Allorio cultivée entre 1942 et 1943 présentait des bonnes caractéristiques mais ne résistait pas à la verse ce qui rendait sa culture incompatible avec la mécanisation de la culture.

Irradié aux rayons X, ce riz a donné une mutation favorable portant sur la taille de la plante (0,80 m au lieu de 1 m. 40). En outre le rendement a été accru fortement.

2) — Les mutations peuvent être utiles au sélectionneur dans le cas où l'espèce à améliorer présente une variabilité génétique faible : espèces de domestication récente comme le colza ou la moutarde pour lesquels les Suédois ont obtenu des variétés plus productives, actuellement commercialisées.

A M'Bambey, au Sénégal, BILQUEZ a entrepris des travaux de sélection sur mutants d'arachide et de mil induits par irradiation X, et obtenu des variants supérieurs aux parents pour la grosseur des graines, le port érigé des tiges et la compacité des gousses. La valorisation économique du fruit et les facilités de récolte mécanique représentaient d'énormes progrès pour cette culture.

Chez le mil, l'obtention d'une meilleure précocité permettait de cultiver dans tout le Bassin du Sénégal une variété à l'abri des déprédations par les oiseaux.

3) — L'irradiation des plantes à reproduction asexuée (arbres fruitiers, plantes ornementales) est utilisée dans des « champs gamma » pour provoquer des mutations somatiques qui se conservent par multiplication végétative. Des champs gamma de ce type existent dans divers pays. Celui de Brookhaven, aux Etats-Unis, comporte une source de cobalt de 1.800 Curies située au centre d'un terrain de 3 hectares. (Fig. 1).

## 2. — CONSERVATION DES DENREES ALIMENTAIRES

La détérioration des denrées alimentaires tient à plusieurs causes, qui sont liées à des altérations physiques, chimiques ou enzymatiques, soit à l'action des parasites de toutes sortes comme les insectes et les micro-organismes.

La propriété de destruction des insectes et des micro-organismes offerte par l'irradiation a conduit à envisager une méthode de conservation. Dès 1953, un programme d'étude portant sur les possibilités de conservation de 21 aliments a été confié au quarter master food and container institute des Forces Armées des Etats-Unis.



Actuellement beaucoup de nations se préoccupent de ce problème dans le but d'étendre les ressources techniques en matière de conservation, en face des besoins toujours croissants de la consommation.

En tant que procédé de conservation, l'irradiation des aliments présente de nombreux avantages. Néanmoins, comme ces radiations peuvent provoquer des réactions chimiques et nucléaires, l'utilisation des denrées traitées pose des questions de santé et de sécurité. C'est pourquoi les recherches entreprises actuellement tendent surtout à donner une réponse à ces questions et, en second lieu, à déterminer la manière la plus rentable d'associer à l'irradiation d'autres procédés traditionnels de conservation.

*Effet de rayonnements sur les aliments :*

a) — L'action des rayonnements sur les insectes et les parasites s'exerce, comme l'indique le tableau suivant sur une gamme étendue des doses d'irradiation :

On peut facilement observer que la radiorésistance comparée des différents organismes augmente au fur et à mesure que l'on descend l'échelle de l'évolution.

**EFFETS DES RAYONNEMENTS EN FONCTION DES DOSES  
APPLIQUEES EN RADS**

— Mutation sur les plantes par irradiation directe .....	100 —	3.000
— Mutation sur les plantes issues de graines irradiées .....	1.000 —	20.000
— Stérilité des insectes .....	2.000 —	20.000
— Inhibition de la germination des bulbes et tubercules .....	5.000 —	12.000
— Destruction des insectes doses létales ....	10.000 —	300.000
— Action sur les helminthes parasites des viandes .....	20.000 —	50.000
— Radiopasteurisation .....	100.000 —	500.000
— Destruction des salmonelles dans les œufs	200.000 —	400.000
— Radiostérilisation .....	1.500.000 —	5.000.000
— Destruction des enzymes .....	> 5.000.000	

b) — Les modifications nucléaires, chimiques et organoleptiques entraînées par l'irradiation ne sont relativement importantes que lorsque les doses dépassent 5 Megarads. On estime que moins de 0,02 % des liaisons chimiques sont rompues pour cette dose de 5 Megarads.

La radioactivité ne peut être induite dans les aliments que par des neutrons lents ou des rayons  $\gamma$  de grande énergie : Pour éviter tout danger de cet ordre les sources pratiquement utilisées sont le Cesium 137 ( $\gamma$  de 0,66 MeV) le cobalt ( $\gamma$  de 1,33 MeV) et des accélérateurs de particules dont l'énergie reste inférieure à 10 MeV.

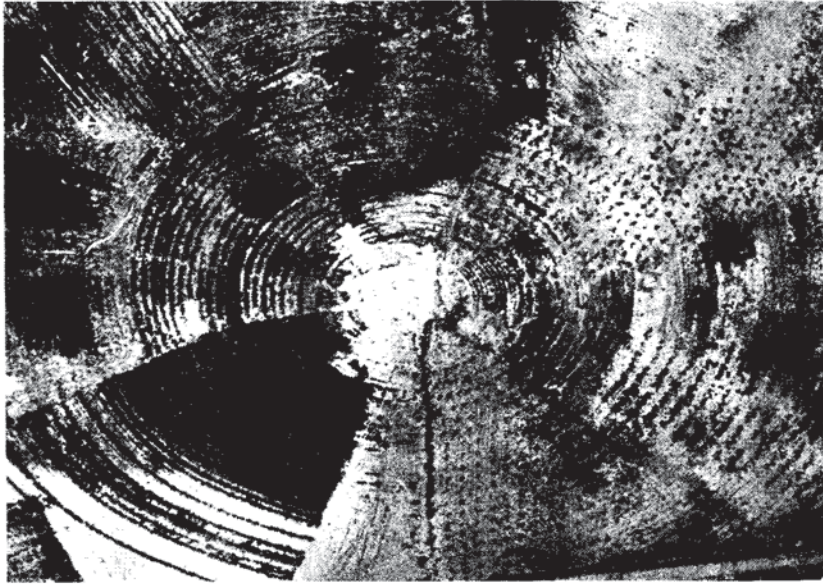


Fig. 1

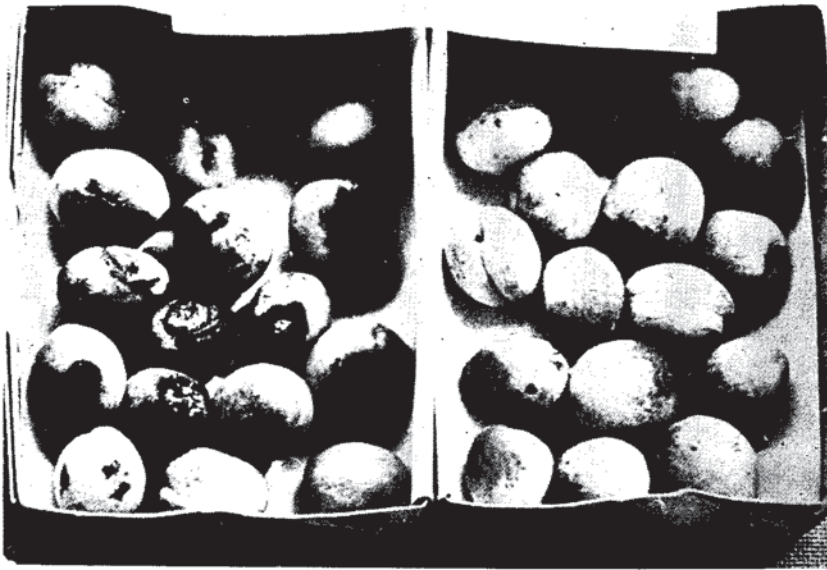


Fig. 2

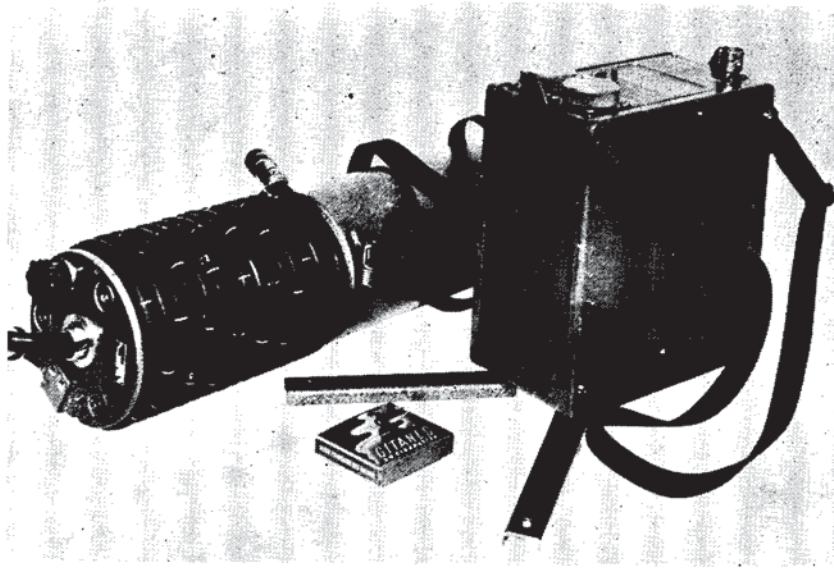


Fig. 3

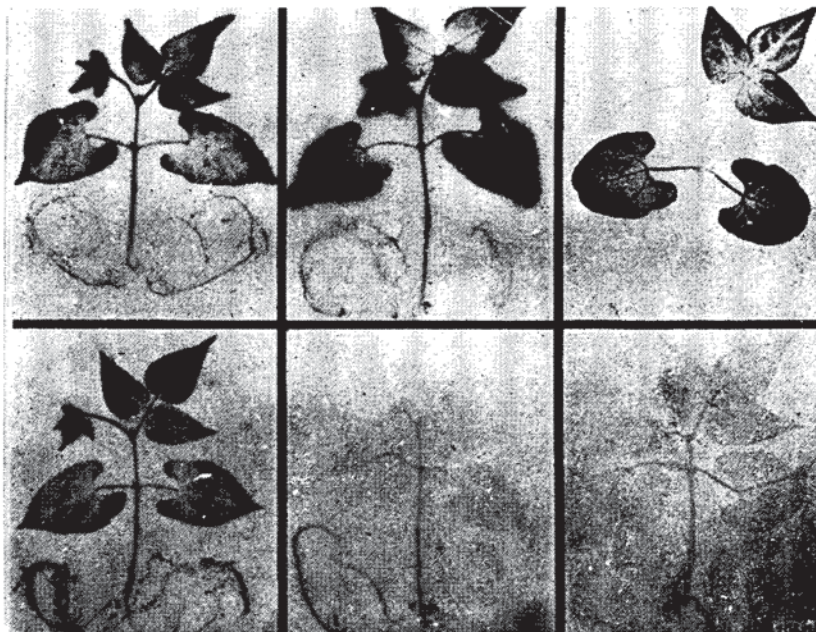


Fig. 4



Les effets chimiques sont liés, en premier lieu, à la radiolyse de l'eau qui entraîne la formation de radicaux libres et de composés très actifs.

Les modifications organoleptiques observées dans certains aliments sont dues essentiellement à la formation d'aldéhydes et de cétones à partir des graisses, et de composés sulfurés provenant de la dégradation des chaînes peptidiques.

Les altérations des vitamines sont du même ordre que celles constatées dans les techniques classiques, et jusqu'à maintenant on n'a jamais fait la preuve que l'irradiation pouvait provoquer la formation de substances toxiques ou cancérogènes.

*Le contrôle de la comestibilité et de l'innocuité des aliments* est assuré par un certain nombre de tests qui permettent de décider si les denrées traitées sont consommables. Ces tests reposent sur les analyses chimiques et les expériences d'alimentation animales permettant de déceler la toxicité et les facteurs de carence des aliments considérés ; on soumet également les aliments à la consommation de volontaires humains qui jugent de leur qualité organoleptique.

Malgré toutes les précautions prises pour le contrôle des denrées, la législation actuellement en vigueur en France maintient une réglementation très sévère qui écarte momentanément toute commercialisation de ces denrées dans l'attente d'une connaissance plus approfondie des effets de l'irradiation.

Dans d'autres pays certains aliments sont déjà autorisés : citons aux Etats-Unis, le Bacon irradié à 4,5 megarads, les pommes de terre dégermées entre 5.000 et 10.000 rads et le blé soumis à des doses de 20.000 à 50.000 rads.

*Association de l'irradiation avec d'autres procédés : Traitements combinés.*

Afin de limiter les risques d'altérations chimiques, les doses d'irradiation ne doivent pas dépasser, en général, un seuil de 50 kilo/rads. Dans certains cas, il est intéressant de combiner l'irradiation à des traitements physiques, chimiques ou microbiologiques. Cette association permet de prolonger la durée de conservation ou d'assurer une rentabilité meilleure des traitements traditionnels.

Ces traitements combinés sont applicables aux fruits frais qui peuvent se conserver 2 à 3 fois plus longtemps à des températures de 4° C à 7° C lorsqu'ils ont été soumis à des doses de 100.000 à 200.000 rads. (Fig.2).

Les fruits de mer peuvent se conserver plus longtemps avec des doses de 100.000 à 500.000 rads, à une température de 1° C. On peut doubler la conservation des produits frais (viandes et volailles) avec des doses de 150.000 à 250.000 rads combinés à une température de 0° C.

Un exemple intéressant concerne la conservation des grains : le maïs récolté humide doit subir un traitement de ventilation et séchage pour éviter la prolifération des moisissures de surface et la fermentation du grain. Une irradiation de 100 à 300.000 rads permet de limiter par pasteurisation le développement de ces moisissures et de retarder pendant quelque temps le traitement de ventilation. L'étalement du traitement présente un intérêt économique très appréciable pour une installation de séchage.

### 3. — LUTTE CONTRE LES INSECTES PARASITES PAR STÉRILISATION DES MÂLES

L'idée d'utiliser les rayonnements pour stériliser les insectes dans la lutte autocide contre les parasites est apparue en 1938 avec KNIPLING qui pensa à appliquer une telle méthode contre le Screw-worm.

Le principe est extrêmement simple : il consiste à lâcher dans la nature des mâles stériles mais actifs ; leurs accouplements provoquent des pontes stériles en proportion croissante et par là même l'extinction progressive de la population.

Pour être applicable cette méthode doit rencontrer plusieurs conditions favorables :

- l'élevage de l'insecte doit être facile, réalisable industriellement à un prix assez bas ;
- la stérilisation doit laisser aux mâles leur potentiel d'accouplement normal et ils doivent être acceptés par les femelles ;
- l'accouplement unique de la part de la femelle est un facteur favorable mais non indispensable ;
- la population naturelle de l'insecte doit être assez faible, soit en permanence, soit périodiquement ;
- enfin, les territoires où la lutte sera pratiquée doivent être protégés contre une réinfection facile. Les meilleures barrières sont naturelles, une étendue de mer, des massifs montagneux, une zone désertique.

La réussite spectaculaire de la lutte contre le screw-worm a été redevable de toutes ces conditions favorables ; le screw-worm (*Callitroga Hominivorax*) est un diptère qui pond ses œufs dans les blessures du bétail et provoque leur dépérissement.

Cet insecte venant du Mexique est apparu en 1933 en Floride et s'est étendu dans le Sud-Ouest des États-Unis en causant des dégâts évalués, il y a quelques années, à 20 millions de dollars par an.

En 1950, un programme de stérilisation était lancé, et l'île de Curaçao (437 km<sup>2</sup>) choisie comme terrain d'essai pour tester la méthode. La stérilisation des mâles était obtenue en irradiant, à des doses de 8.000 à 7.000 roentgens, les pupes après 5 jours de leur formation.



Deux cents mâles stériles étaient lâchés par avion, par km<sup>2</sup>, par semaine. Cinq mois après, la lutte était complètement achevée.

Encouragés par ce succès les Américains mirent sur pied une opération d'éradication en Floride sur une zone de 150.000 km<sup>2</sup>. Menée en deux ans, l'opération a coûté 10 millions de dollars, c'est-à-dire un chiffre correspondant aux pertes annuelles dues au parasite.

Appliquée à d'autres insectes, la méthode rencontre rarement les mêmes garanties de réussite : c'est le cas de la mouche des fruits que cherchent à éliminer les Hawaïens. Néanmoins des résultats encourageants ont été obtenus contre *Ceratis Capitata*, la mouche méditerranéenne dont on envisage d'étendre l'éradication en Tunisie.

#### 4. — UTILISATION DES RADIOISOTOPES DANS L'ETUDE DU SOL ET DE LA PLANTE

Avec les radioisotopes s'ouvre un nouveau champ d'application aux investigations des chercheurs et des agronomes soucieux d'étendre les connaissances pratiques ou fondamentales susceptibles d'améliorer la productivité des cultures.

Leur utilisation permet d'accéder bien souvent à la compréhension des mécanismes dont l'effet peut être observé par le praticien : la détection des carences dans la plante est relativement facile, mais, le rôle joué par chaque micro-élément dans la croissance végétale n'apparaît qu'au terme d'une analyse détaillée qui nécessite des méthodes fines et précises : les radioisotopes se situent le plus souvent à ce niveau de la recherche.

Radioisotopes, éléments de même nature chimique que leur homologue naturel, émetteurs de radiations : la définition seule fait entrevoir les possibilités offertes par ces corps, appelés également éléments « marqués ».

La facilité de leur détection permet de les suivre aisément au cours de leur cheminement à travers les tissus de la plante, ou de les différencier de leur élément semblable, lorsqu'il s'agit, par exemple, de distinguer leur origine nutritive à partir de deux sources distinctes. L'autoradiographie facilite grandement les études de migration en permettant de dresser une carte de répartition de l'élément marqué dans telle ou telle partie de la plante à un moment donné.

Les radioisotopes sont des étiquettes qui peuvent s'appliquer à toutes sortes de corps décrivant un itinéraire, des insectes évoluant dans leur domaine, des molécules participant au métabolisme de la plante, des ions nutritifs pénétrant dans les racines, etc...

Par ailleurs, l'extrême sensibilité de leur détection est mise également à profit dans certaines méthodes de microdosage.



#### 4.1. Utilisation des radio-éléments en physiologie végétale.

##### 4.1. 1. *Marquage des ions minéraux :*

Une question qui a préoccupé pendant longtemps les physiologistes est le mécanisme d'absorption des ions par la racine.

Pour expliquer un certain nombre de phénomènes excluant le rôle passif de la membrane cellulaire, on a dû admettre que le passage des ions était commandé par une activité métabolique de la racine.

Les radioisotopes ont facilité l'étude de la dynamique du transport biologique des ions en permettant le dosage très sensible des faibles quantités d'ions mis en cause, et la distinction, dans le végétal, entre les ions occupant initialement les tissus et ceux qui proviennent du milieu extérieur.

Parmi les précurseurs dans ce domaine, EPSTEIN a pu montrer que le passage des ions à travers la membrane était assuré par un « véhiculeur », dont le comportement est différent selon les espèces d'ions, et possédant différents groupes fixateurs d'affinité plus ou moins spécifiques pour divers ions. Une interférence compétitive intervient dans le cas où le véhiculeur présente les mêmes sites de fixation pour plusieurs espèces ioniques.

Les expériences qui ont conduit à ces résultats utilisent des racines excisées de plantes, placées dans une solution contenant un ion marqué dont on recherche la présence après un certain temps dans la racine.

L'exploitation cinétique des résultats s'est appuyée sur une analogie entre le mécanisme d'absorption racinaire et le mécanisme de l'action enzymatique dont les lois réactionnelles ont pu être utilisées dans l'interprétation du phénomène d'absorption.

••

Toujours appliquée au marquage des ions, la technique isotopique rend d'inestimables services dans l'étude du mouvement des éléments nutritifs à travers les organes de la plante :

-- Le sens du mouvement des différents ions, véhiculés par le courant transpiratoire (acropète) ou le courant assimilé (basipète) peut être déterminé très aisément par l'autoradiographie (Fig. 3).

Tandis que le Phosphore, le Sodium et le Potassium peuvent diffuser librement dans les deux sens, d'autres ions tels que le Calcium, le Baryum ne sont transportés que dans le sens acropète.

-- Une application à portée pratique immédiate concerne la nutrition foliaire dont l'importance économique s'est révélée avec l'emploi des pulvérisations de pesticides à grande échelle.

Dans ce domaine, les éléments marqués offrent la possibilité de chiffrer le rendement d'un apport foliaire en permettant de distinguer

l'origine de l'élément nutritif, appliqué sur la feuille, ou issu du sol. Le marquage est utilisé avec fruit dans la recherche des facteurs susceptibles d'améliorer ce rendement, tels que l'époque de pulvérisation, la localisation, l'action d'agents mouillants, etc...

Le marquage a permis également de constater que lors des périodes critiques de la végétation, caractérisées par des exigences élevées d'éléments nutritifs pour la formation des fleurs ou des fruits, une partie importante de l'alimentation pouvait être fournie par voie foliaire.

Les praticiens disposent, avec ces techniques, d'éléments d'information précis, capables d'assurer une conduite rationnelle de l'alimentation des cultures.

On sait depuis longtemps l'importance qu'il convient d'attacher au problème des carences en éléments mineurs dont le rôle et les fonctions ne sont pas toujours bien connus. Pour le praticien, le diagnostic peut être établi avec des méthodes relativement simples. Mais certains problèmes peuvent bénéficier d'une étude plus détaillée concernant le mouvement ou le blocage de l'élément dans la plante.

Un exemple particulièrement intéressant concerne le destin du fer : pour identifier certaines causes de chlorose on peut séparer cet élément provenant de constituants suspectés de l'inactiver (Bicarbonate, Phosphore, etc...). Appliqué aux racines ou aux feuilles de plusieurs plantes le  $^{59}\text{Fe}$  radioactif a permis de rechercher les facteurs les plus actifs intervenant dans le blocage de son absorption.

Le rôle de la plupart des microéléments a été étudié à l'aide des radioisotopes, tels que  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ .

Dans le cas du Bore, THELLIER a proposé une technique qu'il est bon de mentionner : le Bore ne possède pas de radioisotopes mais l'isotope naturel  $^{10}\text{B}$  est reconnaissable par une réaction nucléaire du type.



Le marquage se fait alors avec le  $^{10}\text{B}$  et la détection s'opère après bombardement de l'échantillon végétal dans une pile de neutrons.

#### 4.1. 2. Marquage des molécules organiques :

En marge des préoccupations purement agronomiques, les études fondamentales abordées dans les questions liées à la photosynthèse n'ont pu progresser que grâce au concours des radioisotopes ou des isotopes stables, ( $^{32}\text{P}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) qui ont permis de mettre en évidence certains mécanismes des réactions aboutissant à la formation des composés organiques à partir du  $\text{CO}_2$  de l'air.



Certaines applications plus directes ont bénéficié de la technique de marquage des composés photosynthétisés à partir du CO<sub>2</sub> marqué placé dans une enceinte entourant la plante : par exemple l'étude de l'influence de déficiences NPK sur la photosynthèse de la canne à sucre.

L'utilisation des molécules marquées se prête à une gamme étendue de recherches débouchant plus ou moins directement sur des problèmes pratiques :

Les études biochimiques sur la synthèse du caoutchouc à partir du latex assurent un moyen perfectionné de calculer le rendement de la transformation promoteur marqué — caoutchouc et donnent le moyen de sélectionner les variétés les plus productives.

Les molécules marquées interviennent avec fruit dans le domaine des herbicides et pesticides, utilisés de plus en plus en agronomie. Bien que l'étude de l'efficacité de ces produits repose avant tout sur une expérimentation aux champs, les techniques de marquage apportent un supplément d'information sur l'absorption, la translocation, le métabolisme, et le mode d'action des produits qui permet en fin de compte de mieux diriger les traitements.

Pour citer un exemple, l'action toxique d'un herbicide dépend de son mode et sa vitesse de pénétration dans le feuillage ou les racines, son transport à travers le liber ou le bois, son accumulation dans certains organes, etc... C'est en connaissance des caractéristiques de mobilité du produit que peut être préconisé le mode de traitement.

#### 4.2. Utilisation des radio-éléments en Science du Sol.

##### 4.2. 1. *Fertilité phosphorique des sols :*

Le Phosphore, qui fait partie des 3 éléments majeurs de la nutrition végétale, est celui qui pose le plus de problèmes en science du sol :

Sur le plan physico-chimique, les liaisons retenant les ions PO<sub>4</sub> en phase solide, qui sont d'ailleurs mal connues, font intervenir le pouvoir absorbant des colloïdes argileux ou humiques par l'intermédiaire de cations tels que Ca, Fe et Al ; ces liaisons peuvent également être purement chimiques, les phosphates formés étant plus ou moins solubles.

Sur le plan agronomique, les ions PO<sub>4</sub> constituent un ensemble de formes et de fractions caractérisées par une aptitude plus ou moins grande à passer en solution, et de-là, à accéder à la plante.

L'extraction chimique utilisée comme méthode analytique de détermination des formes dites « assimilables » présente de nombreux inconvénients en raison de l'incertitude pesant sur le dosage des for-

mes réellement utilisables par la plante, incertitude qui ne fait que s'accroître lorsque la comparaison des types les plus divers de sols est en question.

Dans ce domaine, l'emploi du  $^{32}\text{P}$  a largement contribué à préciser les caractères de la rétention des ions en matérialisant les doubles flèches par lesquelles on représente les échanges d'ions entre particules colloïdales et solution libre. Ces doubles flèches correspondent à des mouvements permanents d'ions de chaque espèce dans les deux directions, mouvements qui se compensent statistiquement dans le système en équilibre.

Par le jeu de cette « dilution isotopique » du  $^{32}\text{P}$  parmi les ions  $\text{PO}_4$  mobiles du système représenté par un sol en suspension dans l'eau, et qui correspondent théoriquement au stock disponible pour les plantes, il est désormais possible de définir avec plus de précision cette notion restée vague de « Phosphore utilisable » du sol.

Le principe sur lequel repose la détermination du Phosphore « isotopiquement échangeable » repose sur l'uniformité de distribution des isotopes à l'équilibre dans le sol en suspension :

En appelant  $R$  la radioactivité introduite initialement,  $r$  la radioactivité retrouvée à l'équilibre en solution,

$M_i$  le stock isotopiquement échangeable de Phosphore qu'on cherche à déterminer,

$M_r$  la quantité de  $\text{PO}_4$  introduite avec  $^{32}\text{P}$  comme entraîneur,  $m$  la quantité de  $\text{PO}_4$  retrouvée en solution, nous pouvons appliquer la relation de BARBIER :

$$\frac{R}{M_i + M_r} = \frac{r}{m}$$

En matière de fertilisation phosphatée, l'emploi des engrais marqués constitue une ressource appréciable permettant l'accès aux problèmes d'utilisation des engrais par telle ou telle culture.

Le marquage est destiné dans ce cas à distinguer dans la plante l'origine du Phosphore fourni par le sol ou par l'engrais.

Pour appliquer cette méthode l'expérimentateur doit respecter certaines conditions garantissant la validité de l'essai :

1) — l'engrais marqué doit être épandu localement car son mélange avec toute la masse du sol ferait naître des réactions d'échange entre le  $\text{P}$  de l'engrais et celui du sol, réactions qui fausseraient la distinction recherchée entre les deux sources nutritives.

2) — l'engrais doit être marqué de façon homogène ce qui dans la pratique n'est pas toujours facile à réaliser.

Le calcul du coefficient d'utilisation de l'engrais est alors aisé. Par définition, le coefficient d'utilisation est exprimé par la relation

$$D = \left( \frac{31 \text{ P engrais}}{31 \text{ P engrais} + 31 \text{ P sol}} \right) \text{ Plante}$$

Le 31 P retrouvé dans la plante provenant de l'engrais est associé avec le 32 P venant de l'engrais selon le rapport :

$$\left( \frac{31 \text{ P} \leftarrow \text{engrais}}{32 \text{ P}} \right) \text{ plante} = \left( \frac{31 \text{ P}}{32 \text{ P}} \right) \text{ engrais}$$

connaissant l'activité spécifique du Phosphore de l'engrais  $\left( \frac{31 \text{ P}}{32 \text{ P}} \right)$  et celle du P de la plante retrouvé après analyse des cendres, on en déduit facilement.

$$D = \frac{\text{Activité spécifique P plante}}{\text{Activité spécifique P engrais}}$$

Comme applications pratiques de cette technique citons comme exemple :

- la comparaison du pouvoir nutritif de plusieurs engrais ;
- l'effet de la granulation ;
- l'époque et la localisation des épandages ;
- l'effet du chaulage ;
- la comparaison des cultures, etc...

4.2. 2. Les autres éléments majeurs se prêtent également à des études du même type, à signaler toutefois que l'isotope radioactif du Potassium a une durée de vie très courte qui l'écarte des études de longue durée. En ce qui concerne l'Azote, l'isotope utilisé pour le marquage est stable (15 N) et demande un spectromètre de masse coûteux pour sa détection.

## 5 — SONDES A NEUTRONS ET GAMMA DENSIMETRES

5.1. Utilisation de la sonde à neutrons pour mesurer l'humidité en profondeur des sols.

L'alimentation en eau des cultures est un des facteurs essentiels de la production agricole et intervient à ce titre dans les problèmes de mise en valeur des zones désertiques ou arides pour lesquelles sont mises en place à grands frais des installations d'irrigation.

En rappel de quelques notions nécessaires à une meilleure compréhension du problème, l'alimentation en eau des cultures est liée aux réserves disponibles du sol et aux besoins de la plante.

Les réserves se situent entre deux profils hydriques particuliers, présentés par le sol à sa capacité de rétention et à son point de flétrissement. Ces caractéristiques dépendent du type de sol, et sont étroitement liées au potentiel capillaire de l'eau.

Les besoins en eau des plantes sont rattachés à la notion d'évapotranspiration potentielle définie comme étant la perte d'eau d'un couvert végétal abondant, largement alimenté en eau.



Cette valeur ne dépend que des conditions climatiques, non du sol ou de la culture. Elle exprime l'optimum d'alimentation en eau requis pour assurer la transpiration végétale, par voie de conséquence l'activité photosynthétique, et finalement la production de matière sèche. On s'aperçoit aisément que les rendements sont directement liés à l'évapotranspiration potentielle, qui fixe un seuil aux besoins en eau de la plante.

La mesure des profils hydriques revêt donc une certaine importance si on s'attache à contrôler l'alimentation en eau des cultures ; le profil représente l'état actuel des réserves, il permet d'évaluer les quantités d'eau nécessaires à apporter par irrigation, de fixer les doses et la fréquence d'apport.

Etudié dans son évolution hebdomadaire ou mensuelle, le profil indique également la quantité d'eau qui a été évaporée, quantité qu'on peut comparer à l'évapotranspiration potentielle pour savoir si les besoins ont été ou non satisfaits.

Dans l'éventail assez pauvre des méthodes pratiquées pour mesurer l'humidité du sol en profondeur, la sonde à neutrons (Fig. 4) apporte une solution qui peut être rapide et précise, non destructive du milieu et répétitive au même point du champ d'essai. Dans un tube de 4 cm de diamètre enfoncé au préalable dans le sol on laisse glisser une sonde qui récupère à chaque niveau de profondeur choisi des informations directement liées à la teneur en eau existant à ce niveau.

Le principe de diffusion des neutrons dans le sol sur lequel repose la méthode confère à l'Hydrogène un rôle prépondérant :

— Les neutrons émis par la source de Radium-Beryllium située dans la sonde sont ralentis par diffusion élastique dans le milieu. La perte d'énergie est d'autant plus grande que l'élément cible est plus léger : l'hydrogène intervient comme l'élément modérateur de loin le plus efficace par rapport aux autres constituants du sol.

— Les neutrons dits thermiques, ou ralentis, sont dénombrés par un tube compteur à trifluorure de Bore, situé également dans la sonde. Les impulsions sont transmises, par l'intermédiaire d'un câble, à un ictonètre, appareil de mesure.

Sur l'ictonètre, il suffit de lire la position d'une aiguille dans son cadran et rapporter la mesure à une courbe d'étalonnage préétablie. Pour espérer le maximum de précision, l'étalonnage de l'appareil doit être effectué pour chaque type de sol étudié, ce qui représente en fait le principal inconvénient de la méthode.

Pratiqué sur le terrain cette opération est laborieuse et manque de rigueur si on ne s'attache pas à accumuler un grand nombre de mesures. Il s'agit dans ce cas de relier les mesures faites avec la sonde aux déterminations de teneur en eau effectuées par prélèvement d'échantillons autour du point de mesure.

Dans cette relation, il faut faire intervenir la densité du sol sec en place pour convertir en teneur en eau volumique (dont dépend la mesure) l'humidité exprimée en % de terre sèche déterminée sur l'échantillon de sol.

Les méthodes d'étalonnage en fût peuvent être pratiquées par des laboratoires bien équipés et très spécialisés dans l'utilisation des sondes.

Encore réservé à l'usage d'organismes de recherche compétents cet appareil peut rendre de grands services à condition de prendre un certain nombre de précautions au moment de la mise en place des tubages et pendant les mesures.

#### 5.2. Utilisation du densimètre gamma pour mesurer la densité en profondeur des sols.

Conçu dans le même esprit que celui qui été adopté pour la réalisation de la sonde à neutrons, le densimètre gamma comporte une sonde renfermant une source de Cesium 137 et un compteur Geiger-Muller qui transmet ses informations au même icitomètre que celui de la sonde à neutrons.

La diffusion des rayons gamma dans le sol est liée à la densité du sol en place et donne le moyen de la mesurer. Cet appareil qui est moins utilisé par les agronomes, offre malgré tout des possibilités d'application dans ce domaine.

#### CONCLUSION.

Le tour d'horizon que nous venons de faire, place les techniques nucléaires dans un vaste champ d'applications, ouvert à toutes les branches de l'Agronomie, accessible aussi bien aux études pratiques qu'aux recherches fondamentales.

Il faut se garder de penser que l'énergie nucléaire peut remplacer les anciennes méthodes et résoudre tous les problèmes — c'est seulement un outil de plus à la disposition du chercheur, quelquefois indispensable, ou simplement plus perfectionné.

Néanmoins, ces techniques ne sont pas universelles, c'est pourquoi avant de faire appel aux techniques nucléaires, il est bon de se demander si les possibilités qu'elles offrent sont réellement supérieures à celles des méthodes traditionnelles.

Il est bien difficile d'évaluer le bénéfice pratique tiré de telles applications dont les incidences sur les progrès cultureux vont de pair avec ceux de la Recherche Agronomique.

Sans vouloir proposer un bilan même approximatif, il est certain que dans les domaines de la fertilisation, de l'amélioration des plantes, la conservation des denrées alimentaires, le profit retiré de l'utilisation de l'énergie nucléaire est très appréciable.

## ANNEXE

*Eléments de physique nucléaire :*

1. Rayonnements	NATURE	CHARGE	ABSORPTION par la matière	IONISATION
Alpha $\alpha$	noyau d'Helium	+ 2 e	très grande	grande
Beta $\beta$	électron	- e ou + e	assez grande	assez grande
Gamma $\gamma$	photon	0	faible	faible
neutron	noyau d'hydrogène	0	milieu hydro- géné	indirecte

2) *Radio-isotopes :*

Même nature chimique que l'élément homologue, émetteur de radiations



M symbole atomique

A nombre de masse

Z nombre de protons

A — Z nombre de neutrons

Pour deux isotopes Z est constant.

— Loi de décroissance radio-active

$$A = A_0 e^{-693 t/T}$$

$A_0$  Activité initiale  $t = 0$

A Activité au temps  $t$

T Période

$$t = T \text{ pour } \frac{A}{A_0} = \frac{1}{2}$$



## — Liste des principaux radioisotopes utilisés

RADIOISOTOPE	PERIODE	ENERGIE BETA Maximum MeV	ENERGIE GAMMA Maximum MeV
(peu dangereux)			
th B. Hevesy .....	10,6 h	0,58	0,30
sodium-24 .....	15,1 h	1,39	1,38
potassium-42 .....	12,4 h	3,58	1,51
cuiivre-64 .....	12,8 h	0,65	1,34
chrome-51 .....	27,8 j		0,32
manganèse-52 .....	6,0 j	0,58	1,46
brome-82 .....	35,9 h	0,46	1,31
(modérément dangereux)			
tritium-H3 .....	12,5 a	0,02	
carbone-14 .....	5 600 a	0,16	
phosphore-32 .....	14,3 j	1,71	
sodium-22 .....	2,6 a	0,58	1,28
soufre-35 .....	87,1 j	0,17	
chlore-36 .....	440 000 a	0,71	
manganèse-54 .....	300 j	1,0	0,84
fer-59 .....	45,1 j	0,46	1,3
cobalt-60 .....	5,3 a	0,31	1,33
zinc-65 .....	250 j	0,32	1,11
rubidium-86 .....	19,5 j	1,82	1,1
strontium-89 .....	53 j	1,50	
molybdène-99 .....	2,8 j	1,22	0,14
iode-131 .....	8,1 j	0,81	0,72
cesium-137 .....	33 a	0,52	
barium-140 .....	12, 8 j	1,02	0,54
(très dangereux)			
calcium-45 .....	152 j	0,25	
fer-55 .....	2,9 a		capture-K
strontium-90 .....	19,9 a	0,54	
yttrium-90 .....	2,5 j	2,18	
yttrium-91 .....	61 j	1,54	1,22
radium-226* .....	1600 a		

\* Emetteur alpha se localisant dans les os.

**UNITES.***Activité :*

Le curie : quantité de radio-élément produisant  $3,7 \times 10^{10}$  désintégrations par secondes.

*Energie :*

Electron Volt, énergie acquise par un électron accéléré pour une différence de potentiel de 1 Volt..

*Dosimétrie :*

Roentgen = Dose d'exposition telle que l'émission corpusculaire associée produit dans 1 cm<sup>3</sup> d'air des ions des deux signes transportant 1 u e s.

Rad = unité de dose absorbée, correspondant à 100 ergs/g de substance.

## SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 — Première Conférence de Genève sur l'utilisation pacifique de l'énergie atomique, 1955, vol. XII.
- 2 — PEREAU-LEROY P. — *Radiogénétique végétale*. Conférence à l'Institut des Sciences et Techniques Nucléaires, octobre 1960.
- 3 — PELEGRIN P. — *Conservation des denrées alimentaires par irradiation*. Journées d'Etudes pour utilisateur des Radio-isotopes, Dakar, mars 1963.
- 4 — MOUTON Robert. — Applications de sources intenses de radiation aux aliments et médicaments biosynthétiques.  
in : *Industries Atomiques*, 1964.
- 5 — FERON M. — La lutte contre les insectes par les méthodes autocides.  
in : *Revue de Zoologie agricole et appliquée*, 1963, n° 4 — 6.
- 6 — EPSTEIN E. — Mechanism of ion absorption by roots.  
in : *Nature*, n° 10, 1953.
- 7 — The international journal of Applied.  
*Radiation and isotopes*. Vol. 13, July-August 1962.
- 8 — *Radioisotopes in soil plant Nutrition studies*. AIEA, Symposium de Bombay, mars 1962.
- 9 — BARBIER. — in : *Comptes rendus Académie des Sciences*. t. 236, 1953.
- 10 — OECE. — Rapports, n° 396 I et II.
- 11 — LEFORT (Marc). — *Les radactions nucléaires*. Collection « Que sais-je », n° 844.
- 12 — COMAR. — *Radioisotopes in Biology and Agriculture*. Mc Graw, Book Cy, inc.

