

énergie nucléaire et agronomie

P. PELEGRIN

Pour situer les points d'impact de l'énergie nucléaire en agriculture, je vais raconter la vie d'une plante.

Il y a d'abord le support : le sol dont la fonction nutritive peut être appréciée à l'aide de l'azote 15, isotope stable mesuré par la technique de spectrométrie de masse, du phosphore 32, radioisotope émetteur β facile à manipuler malgré sa demi vie de 14 jours, ainsi que du potassium du calcium ou du soufre. Il est aussi possible d'utiliser l'analyse par activation pour nombre d'oligo-éléments.

Par ailleurs, dans le sol, la teneur en eau est un facteur que la sonde à neutrons détermine fort bien.

Après le sol interviennent l'énergie lumineuse et l'air. Ici encore, les études de photosynthèse et de physiologie végétale sont des clientes de longue date des isotopes qu'ils soient stables avec l'oxygène 18, le carbone 13 ou le deutérium 2 ou bien radioactifs (carbone 14, tritium).

Nous semons ou plantons le végétal. Le radio généticien, par les rayonnements X, γ ou neutrons, va chercher à faire muter ou à déchimériser. Parfois même, il espère stimuler la croissance.

Nous en sommes à la plante adulte. Les insectes, champignons, anguillules l'attaquent. Ici encore, l'énergie nucléaire est au rendez-vous : elle autorise la "stérilisation des mâles", elle permet de marquer les insectes ou les anguillules pour suivre leur comportement.

Enfin avec un peu de chance, la récolte vient. Si cette dernière est infestée d'insectes, l'irradiation les tuera. Sinon, elle peut aider à murir, à détruire les microorganismes qui l'enveloppent, à assainir le produit stocké.

Je ne vais développer ici que trois chapitres où l'énergie nucléaire est concernée :

La radiogénétique

L'entomologie nucléaire

La radio conservation des denrées alimentaires.

RADIOGENETIQUE

C'est généralement à la génétique que l'on pense d'abord lorsqu'on envisage des domaines où l'irradiation a des chances de succès. Nous verrons que c'est peut-être dans cette discipline que le bilan est le plus réduit bien qu'il reste toutefois prometteur.

Nous distinguerons trois voies de recherches :

- l'obtention de mutations
- la stimulation de croissance
- l'exploitation des chimères.

1. Les mutations

Entreprise depuis plus de 40 ans avec les rayons X, l'étude des mutations radioinduites reste le sujet le plus fréquemment abordé en génétique.

Des résultats sont à noter :

- En Juillet 1969, MURRAY, chercheur américain travaillant sur la menthe poivrée dont la saveur est inimitable et qui risquait de disparaître du fait d'une maladie sans que l'hybridation ait pu apporter l'équivalent, a réussi par irradiation à induire un gène de résistance.
- R. MARIE chercheur de l'INRA à Montpellier et Conseiller Scientifique à l'IRAT vient de faire homologuer une nouvelle variété de riz appelée "Delta" obtenue par irradiation gamma de la variété Césarot bien connue en Provence. Ce "Delta" présente un allongement du grain et une amélioration de sa translucidité ce qui lui confère une valeur marchande supérieure.
- Un bilan a été fait par l'AIEA et la FAO. Au 1er Juillet 1969, on relève 77 variétés obtenues par irradiation dont 49 correspondent à des mutations héréditaires et 28 à des mutations somatiques transmissibles par boutures ou greffons. 74 ont été remises à des agriculteurs dont près de 50 depuis 1964. Les 49 mutations obtenues sur graines concernent des plantes de culture mondiale et tout particulièrement l'orge (11 variétés), le blé (10), le haricot (7), l'avoine (4), le riz (4) et le soja (4). Les 28 mutations somatiques ne concernent que des plantes ornementales.

Ces mutations ont été obtenues par irradiation aux rayons X ou γ , parfois aux UV ou neutrons thermiques et mêmes rapides. Les doses pour les X ou les γ s'échelonnent de 0,3 à 25 krad et exceptionnellement 45 krad en ce qui concerne les graines sèches.

A noter que les doses utilisées pour les plantes ornementales s'établissent entre 1 et 4 krad pour des raisons d'état physiologique et de teneur en eau.

En réalité, un certain nombre de mutations que l'on vient de citer ont été réalisées au prix de traitements combinés irradiation-hybridations. Les cas où, directement, le généticien a obtenu une mutation sous le seul effet de l'irradiation sont assez rares. Ainsi il m'est difficile de tirer un bilan des résultats précédents. Il y a quelques mois, j'aurais eu tendance à le trouver maigre. Les 49 mutations sur graines s'étalent sur plus de 30 ans, si l'on excepte un essai fait en 1930 sur tabac en Indonésie (rayons X). De plus, il s'écoule souvent entre l'irradiation et l'homologation de la nouvelle variété rarement moins de 5 ans et, le plus souvent, 10 ans.

Il est vrai aussi que le nombre des variétés produites augmente vite. Les 49 mutations issues de graines ont été homologuées de la façon suivante, par tranches de 5 ans.

Avant 1955 : 6
 1955-1959 : 8
 1960-1964 : 13
 1965-1969 : 22

Toutefois si le bilan n'est pas très intéressant pour les pays où l'agriculture est très évoluée et où un effort de création de variétés par hybridation est poursuivi depuis fort longtemps, il n'en est pas de même pour beaucoup de pays tropicaux ou, du fait d'études moins poussées naguère, il est plus facile de diversifier le matériel végétal.

La présentation des résultats précédents, distinction faite des mutations intéressant les variétés des régions tempérées et de celles des pays tropicaux, est significative :

	Non tropicales	Tropicales	Total
Avant 1955	5	1	6
1955-1959	6	2	8
1960-1964	9	4	13
1965-1969	16	6	22
	36	13	49

Il semble bien que ce soit dans les pays tropicaux, où les besoins alimentaires en quantité et en qualité sont loin d'être satisfaits, que les plus grands espoirs sont permis.

Et au passage voilà une occasion de signaler que, souvent, les techniques nucléaires reçoivent une application dans les pays les moins développés parce que justement la marge de progrès possibles est plus grande. Ceci est très encourageant et, ce fait, à lui seul, pourrait justifier la présence d'un irradiateur à Madagascar.

Selon SIGURBJÖRNSSON, de la division mixte FAO/ATFA, la variété de riz japonaise à haut rendement REIMEI (= renouveau) obtenue en 1966 après irradiation de semences sèches à 20 krad au ⁶⁰Co et capable de concurrencer les variétés résultant des méthodes classiques par son haut rendement aurait une teneur en protéines double de la variété d'origine (cf. colloque Juin 1970). En Inde, on a obtenu en 1969 par irradiation à 1,4 krad en neutrons thermiques un ricin très hâtif puisqu'au lieu de 270 jours pour l'ascendant il mûrit en 120. Sa culture est entreprise : les agriculteurs sont d'abord certains d'avoir une récolte mûre avant les intempéries et peuvent ensuite pendant 120 jours cultiver un blé.

Le maïs, plante rencontrée depuis l'équateur jusqu'en Belgique, est en passe de voir son rendement augmenter dans des proportions encore inconnues.

Ainsi donc après plusieurs décennies de résultats ponctuels et souvent médiocres, on entre dans une période où l'irradiation, facteur essentiel d'amélioration des plantes, a toutes chances de faire une percée spectaculaire.

Citons également un très bel exemple dû à SEARS en 1955 bien qu'il s'agisse d'un transfert de gènes et non d'une vraie mutation. Ce chercheur a réussi à transférer à la variété de blé Chinese Spring la résistance à la rouille noire. Il a croisé Chinese Spring avec un amphidiploïde d'Aegilops et

d'un triticum non cultivé. Cet amphidiploïde possède de l'Aegilops la résistance à la rouille noire mais aussi des caractères défavorables. Par des croisements en retour avec le blé cultivé, SEARS a éliminé une partie des caractères défavorables mais pas tous. C'est alors qu'intervinrent les rayons X qui, par rupture des chromosomes, permirent d'aboutir au résultat recherché, un peu au hasard, il faut en convenir.

Et pour en terminer avec les mutations, nous allons rapidement situer leur impact génétique :

- a. l'irradiation augmente d'un facteur 10 à 100 le taux naturel de mutation qui, bien que faible, n'est pas négligeable. A titre d'exemple, l'oielet William Sim à fleurs rouges a produit depuis 1947 un grand nombre de "sports", mutations somatiques naturelles, dont plus de 100 ont été commercialisées.
- b. l'irradiation donne de meilleurs résultats que les substances chimiques mutagènes telles que l'éthylène imine ou le méthane sulfonate d'éthyle (M.S.E.) mais ceci sur les plantes à reproduction végétative alors que ces mutagènes chimiques sont plus efficaces sur les graines mais probablement moins utilisés.
- c. par rapport aux mutations naturelles, irradiation ou substances chimiques n'agissent pas spécifiquement sur le type de mutation, mais sur leur taux qu'elle augmente.
- d. les mutations naturelles ou provoquées présentent toujours une grande majorité de mutations récessives et également de mutations défavorables. Encore faudrait-il s'entendre sur ce terme. Car, si en 1940 les mutations de céréales à paille courte étaient peu prisées par suite des besoins en paille, il n'en est plus de même en 1970 où l'utilisation intensive des engrais incite à rechercher une variété résistante à la verse.
- e. Néanmoins, il faut considérer les mutations provoquées comme un complément aux méthodes classiques car elles permettent un réarrangement de gènes dont par hybridation et sélection, le spécialiste extraira les caractères favorables.
- f. si l'on recherche une mutation dominante, il sera nécessaire de disposer d'un matériel considérable et le résultat restera aléatoire. Si le caractère désiré est qualitatif et monogénique, l'observation individuelle des plantes aboutira à isoler la mutation dès la 2ème ou 3ème génération. Par contre, si le caractère est quantitatif et polygénique, par exemple le rendement, il sera nécessaire de recourir à la biométrie et l'on sera vite envahi par le matériel végétal.
- g. l'efficacité mutagène comparée des substances chimiques et des rayonnements varie avec les organes considérés et les variétés. Le M.S.E., sur graines d'espèces diploïdes, donne 4 à 10 fois plus de mutations chlorophylliennes que des doses de rayonnement gamma ayant un effet analogue sur la survie des plantes.
- h. la ploïdie du matériel expérimental joue un grand rôle. Les rayonnements ionisants sont plus efficaces sur les espèces polyploïdes que les agents chimiques.
- i. la dose optimale du traitement fait l'objet d'études nombreuses. Les traitements qui donnent la plus grande quantité de mutations ne sont pas nécessairement ceux qui produisent le plus de mutations utilisables. PEREAU-LEROY a pu constater sur oielet, après irradiation des boutures,

que les mutants obtenus à forte dose présentent très souvent un ou plusieurs caractères défavorables (forme irrégulière de la fleur, diminution de vigueur, etc ...) associé à une mutation favorable recherchée telle que la couleur de la fleur modifiée.

La dose à employer est fonction du mode de propagation de l'espèce considérée.

Les fortes doses conviendront mieux aux plantes à reproduction sexuée dont les graines sont irradiées à l'état sec et pour lesquelles, par hybridation ultérieure, on pourra éliminer les caractères défavorables induits.

2. La stimulation de croissance

L'idée est ancienne puisque en 1898 MALDINEY et THOUVENIN faisaient mention d'un effet de stimulation de croissance par irradiation aux rayons X. On comprend qu'elle ait pu séduire théoriciens et praticiens. Allait-il suffire d'irradier aux rayons X ou gamma, à des doses annoncées comme faibles (de 1 à 10 krad), de grandes quantités de graines pour obtenir, sans que ce soit héréditaire, des récoltes plus abondantes ou plus précoces ?

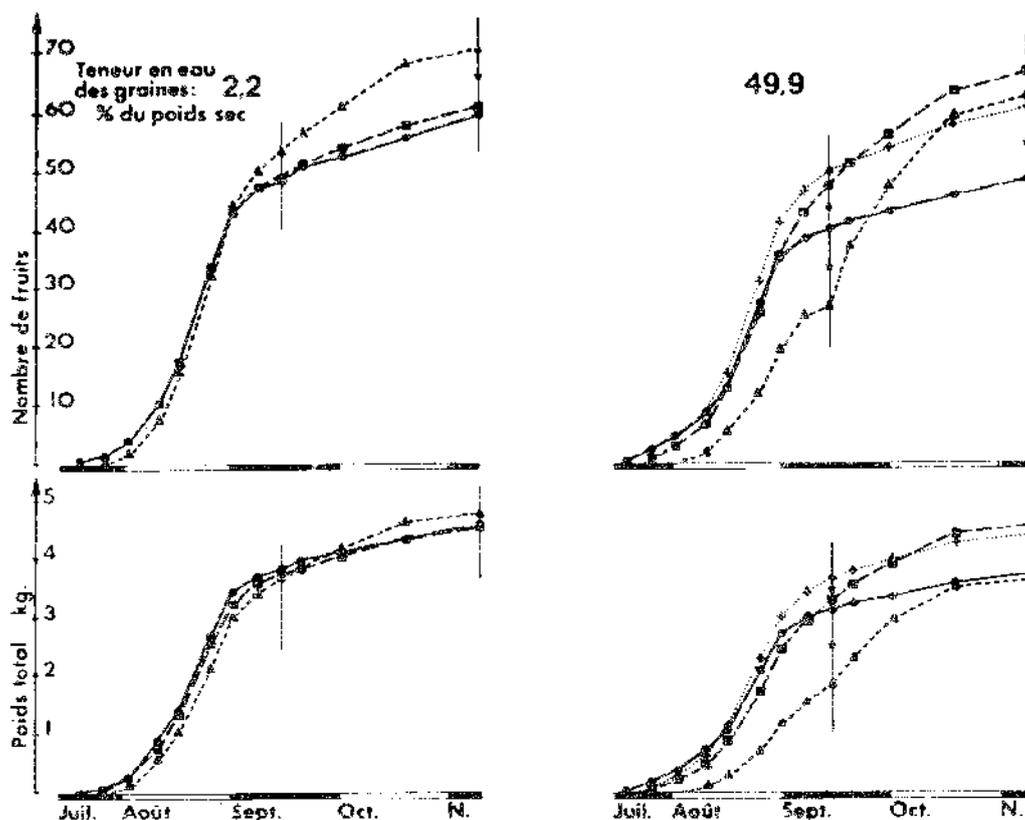
A Saclay, puis à Cadarache, A. SILVY de 1961 à 1966, a repris cette question sous l'angle, non pas physiologique, mais agronomique, c'est-à-dire qu'il avait pour objectif de voir si précocité ou rendement de 8 espèces d'intérêt agricole (carotte, radis, épinard, pomme-de-terre, tomate, orge, riz et maïs) dépendait d'une irradiation préalable. Ces essais réalisés avec le plus grand soin au laboratoire, en serre et au champ et suivis par des analyses statistiques rigoureuses n'ont montré aucun résultat global intéressant au niveau pratique.

De nombreux facteurs interviennent pour perturber les résultats observés. Par exemple, l'humidité de la graine, la date d'observation ont une importance considérable sur les conclusions. Il est ainsi difficile de comparer des résultats.

Nous commenterons un graphique de A. SILVY dans un article paru en 1968 dans la revue "Industries Agricoles" où l'auteur cite le cas de la variété de tomate Primabel dont les graines ayant une teneur en eau de 2,2 ou 49,9% du poids sec ont été irradiées à 0, 2,5, 5 ou 10 krad. Les courbes relatives du nombre de fruits et du poids total ne permettent pas de conclure à un

effet de stimulation les graines à forte teneur en eau ne correspondent pas à des rendements supérieurs à ceux des témoins de faible humidité.

— Essai de stimulation sur tomate var. Primabel. Récoltes cumulées par plant. Analyses statistiques : 14 septembre et 11 novembre; différences significatives = *.
Doses d'irradiation : ●—● témoin ; ■—■ 2,5 krad ; ▲—▲ 5 krad ; +—+ 10 krad.



En 1970 puis en 1971, A. SILVY a examiné de près des essais décrits par divers auteurs, russes en particulier. Dans tous les cas, il était audacieux d'affirmer que la stimulation de croissance peut être obtenue par irradiation au point de vue agricole. En général, les auteurs ne retenaient que certains des traitements et ne procédaient pas à une analyse statistique correcte.

3. L'exploration des chimères

C'est à P. PÉREAU-LEROY que j'emprunterai ici le maximum de données, en particulier pour ses travaux sur les oeillets.

C'est un fait bien connu que l'oeillet comporte plusieurs couches de tissus ayant une vocation différente au point de vue de l'histogenèse. Les spécialistes parlent de l'assise interne et la nomment "Corpus" et des deux assises externes : en surface la "Tunica T₁" et la "Tunica T₂". La couleur de la fleur d'oeillet est le fait de la seule couche épidermique. Mais des mutations peuvent se produire en T₂ ou dans le corpus. Si elles se rapportent à un caractère de couleur, il sera nécessaire que la couche T₁ disparaisse pour permettre aux cellules mutées de venir s'extérioriser dans la couche superficielle en reformant l'épiderme. L'irradiation est un moyen de parvenir à ce résultat lorsqu'elle nécrose la couche T₁, libérant T₂ ou le

corpus. Elle agit à la façon d'un fin scalpel ainsi que parfois le réalise l'insecte qui ronge sur une partie du méristème la couche T₁.

L'oeillet William Sim initialement rouge a eu des mutations en chimères dans les couches T₁ ou T₂ ce qui donne naissance à de nouvelles variétés blanches, roses, striées ou jaunes. Mais par irradiation de ces types nouveaux, on peut retrouver le type original enfoui dans le plus profond du méristème.

Les résultats obtenus jusqu'ici sont très encourageants : la déchimérisation présente d'inappréciables avantages. Faisant apparaître de nouvelles couleurs ou de nouveaux mélanges de couleur, elle conserve néanmoins, très généralement, les aptitudes physiologiques de la plante-mère. Et l'oeillet vigoureux et résistant aux maladies courantes a de très fortes chances de le rester tout en devenant sur le plan de la couleur un prototype.

ENTOMOLOGIE NUCLEAIRE

Les techniques nucléaires ont été mises à l'essai en entomologie dans deux directions :

- l'irradiation avec la méthode dite de "stérilisation des mâles",
- l'utilisation des isotopes comme traceurs.

Nous allons donner des exemples et insister davantage sur l'avenir de ces techniques. Nous traiterons de la destruction des insectes dans les denrées alimentaires au chapitre suivant.

1. La stérilisation des mâles

L'appellation est inexacte car l'irradiation agit aussi bien sur les mâles que sur les femelles.

Nous donnerons quelques détails sur une belle réussite, celle représentée par la destruction de la Lucilie bouchère (Screw worm) ou *Cochlyomia hominivorax*. Elle a été conçue par KNIPLING en 1954, appliquée à petite échelle en 1955 et à grande échelle en 1960.

Le bétail piqué par ces mouches mourait par infection des plaies. Les dégâts étaient estimés à 10 millions de dollars par an en Floride et 20 millions de dollars pour le Sud-Est des U.S.A.

Le principe en est simple. Dans une population de ces insectes, on lâche des mâles stérilisés. Ces derniers sont irradiés à une dose d'environ 5 krad; l'animal conserve un comportement normal (en particulier, son accouplement est inchangé) mais il est stérile. Si le nombre de mâles lâchés est très supérieur à celui des mâles normaux déjà présents au sol (de l'ordre de 10 fois plus) les femelles ont plus de chances de s'accoupler avec un mâle stérile qu'avec un mâle fertile. Très vite, le taux de multiplication de la population va baisser puis s'annuler.

On comprend que le principal problème consiste à lâcher un nombre considérable d'insectes. Pour réussir l'opération en Floride, il a fallu disperser 500 mâles par mille carré et par semaine, ce qui nécessitait par semaine la production de 50 à 70 millions de mouches stériles. Un hangar d'aviation fut utilisé à cet effet. On a consommé par semaine 4.500 gallons de

sang de boeuf, 65 gallons de plasma, 35 gallons de miel et 40 tonnes de milieu de culture synthétique. L'opération a duré 2 ans et aucune mouche fertile n'a survécu.

Le bilan fut très positif, car les dépenses (usine, production des milieux synthétiques et utilisation d'une flotille d'environ 20 petits avions) furent approximativement du même ordre de grandeur que les dégâts annuels.

Selon (RUSHLAND (1970), les U.S.A. se protègent actuellement sur 4.200 miles de longueur et 250 de profondeur par endroits (Mexique). Ils consacrent annuellement 6 millions de dollars à ce contrôle qui, rappelons le, leur évite une perte de 20 millions de dollars.

Il convient cependant de faire remarquer que cette réussite assez exceptionnelle suppose des conditions favorables :

- il est souhaitable que la zone traitée ne puisse pas être réinfestée par l'extérieur (île, montagnes ou déserts);
- la population d'insectes est plus facilement détruite si elle accuse, à une époque de l'année, une décroissance dans sa multiplication car c'est à ce moment que l'on doit lâcher le plus de mâles stériles;
- si l'insecte n'a qu'un seul accouplement par cycle, on a une chance plus grande de l'éliminer rapidement;
- l'élevage artificiel sur milieu synthétique et à très grande échelle doit être possible;
- enfin et surtout la biologie, le comportement de l'animal doit être très bien connu. Il faut signaler que la réussite de l'opération "Lucilie bouchère" est due en grande partie à de nombreuses années de recherches entomologiques préliminaires.

Un exemple comme celui de la Lucilie bouchère a incité beaucoup de chercheurs à le reproduire. L'AIEA a organisé un "panel" en 1969 à Vienne sur la "technique du mâle stérile pour le contrôle des mouches des fruits". Ce panel faisant suite à 6 autres réunions consacrées au "mâle stérile" de 1963 à 1969. On y a enregistré des succès puisque après la réussite en 1960 de l'opération Lucilie bouchère en Floride, on a éliminé la mouche du melon (*Dacus cucurbitae*) de l'île de Rota en 1962 - 63 et la mouche orientale des fruits (*Dacus dorsalis*) de l'île de Guam en 1963.

Mais depuis 1963, les résultats spectaculaires sont rares. Et le panel précisé a bien indiqué que l'effort principal porte actuellement sur la mouche méditerranéenne des fruits (*Seratitis capitata*) pour toutes sortes de raisons : intérêt économique du problème, élevage aisé de l'insecte ainsi que très grande dispersion géographique. Très vite, les chercheurs ont conclu à la nécessité de développer les études biologiques pour les projets les mieux placés, c'est-à-dire l'Amérique Centrale, l'Italie et l'Espagne. Les succès obtenus à petite échelle incitent à passer au stade pilote, celui qui concerne 1.000 km². Le panel propose un projet à grande échelle (4.000 km²) au Nicaragua et au Costa Rica dans une zone infestée mais relativement isolée avec une production hebdomadaire de 500 millions de mouches. Le projet prévoit l'utilisation combinée d'insecticides et d'insectes radio-stérilisés. La durée de l'opération est de 4 ans et son prix estimé à près de 6 millions de dollars (1/4 frais de personnel, 1/4 avions, 1/4 pour la production d'insectes et l'utilisation d'insecticides, 1/4 divers).

Il est certain que cette technique, si elle est utilisée, doit l'être de façon complète et non pas comme à Capri où en 1967 des moyens insuffisants ont abouti à un échec.

Pour intéressante que soit la lutte contre la Cératite, il ne faut pas oublier les grandes endémies propagées par les insectes. Au cours du récent congrès de radioentomologie d'Athènes (Sept. 1970), il a été question de la lutte contre la tsétsé qui transmet la trypanosomiase. Ici la grande difficulté réside dans l'élevage artificiel de la mouche qui, en 1970, n'était pas résolu de façon satisfaisante.

Une autre voie de recherches récemment ouverte est celle de la stérilisation partielle utilisant des mécanismes génétiques où la mâle a été irradié à des doses telles qu'une partie des oeufs résultant du croisement avec une femelle normale soit fertile. La descendance perd de la vigueur et l'on espère arriver à stériliser en utilisant des doses assez faibles de 3 à 5 krad.



2. Utilisation des isotopes comme traceurs

Il semble bien que les opérations de stérilisation des mâles progressent lentement parce que la biologie et l'écologie de nombreux insectes est mal connue. Le marquage à l'aide des isotopes est alors d'un précieux secours.

Nous présenterons ce sujet sous trois aspects :

a. Repérage de l'insecte :

Cette technique utilise un isotope émetteur bêta énergétique tel que le phosphore 32 ou mieux émetteur gamma (or, fer, zinc, etc ...). Il faut s'assurer que le rayonnement émis par l'isotope ne perturbe pas le comportement de l'insecte. C'est ainsi que COURTOIS et LECOMTE ont étudié le déplacement des abeilles avec l'or 198, tandis que MORTREUIL a délimité en utilisant le phosphore 32 la répartition des nids primaires et secondaires de fourmis qui en Côte d'Ivoire, véhiculent les cochenilles sur ananas.

Les Russes ont marqué les sauterelles en les trempant dans du chlorure de cobalt.

b. Utilisation d'isotopes analysés par radioactivation :

C'est une technique plus récente que LASCEVE, BUSCARLET et BOSSY du Service de Radioagronomie, ont mise au point et publiée en 1971. Ils utilisent l'Iridium 191 isotope stable qui est mélangé à raison de 0,140 mg/g de milieu nutritif frais où sont déposés pour s'y développer, des oeufs de Carpocapse, ou ver des pommes, qui cause de très gros dégâts dans le monde. A cette dose, l'Iridium qui n'est pas radioactif et qui n'existe qu'à un très faible niveau chez le Carpocapse est assimilé et retenu par l'insecte en quantité suffisante pour être détecté sans que l'insecte en soit perturbé pendant toute sa vie adulte. Cette quantité a d'ailleurs été déterminée par l'administration à un autre lot de Carpocapse d'un homologue de cet Iridium 191, l'Iridium 192 qui lui est radioactif, émetteur γ .

L'insecte à qui l'isotope stable Ir 191 a été donné, est placé dans flux de neutrons provenant généralement d'un réacteur nucléaire. Il y a activation de l'Iridium 191 en Iridium 192 radioactif dont la mesure est facile. Elle est effectuée à divers stades de développement de l'insecte sur des lots différents car il est évident qu'à chaque mesure le carpocapse est tué. Les auteurs indiquent qu'ils dosent ainsi des masses extrêmement faibles pouvant atteindre 10^{-9} g d'Iridium stable après irradiation de 15 minutes dans un flux de 10^{13} n/cm²/sec alors que la quantité tolérable non toxique d'Iridium est 10 fois plus élevée.

On conçoit l'intérêt pour le cas où des lâchers d'insectes devraient être faits dans des régions peuplées où la dispersion d'isotopes radioactifs poserait au moins des problèmes psychologiques alors que l'isotope stable ne présente aucun danger.

c. Etude de la période biologique d'un isotope :

Une fois ingéré, l'isotope radioactif ou non suit un destin variable : ou bien il est conservé en totalité par l'organisme, parfois stocké dans un organe : c'est le cas de l'iode qui chez l'homme se localise dans la thyroïde :

- ou bien il est éliminé plus ou moins vite de façon régulière,
- ou encore son élimination se fait à plusieurs vitesses différentes dont l'effet apparaît progressivement.

Si l'on connaît au départ le nombre d'impulsions de l'isotope radioactif, déduction faite de la décroissance radioactive typique de chaque isotope, la mesure du nombre d'impulsions à un moment donné déterminera l'allure de l'élimination physiologique de l'isotope. C'est ce qu'on appelle la période biologique. Inversement, si l'on connaît cette période biologique on pourra calculer depuis combien de temps l'insecte a été lâché après marquage.

En outre, une étude précise des facteurs externes et internes qui agissent sur la période biologique permettra d'aller encore plus loin et de connaître le comportement physiologique de l'insecte marqué de façon connue.

Je renvoie à une publication récente de L.A. BUSCARLET qui est une mise au point bibliographique de la période biologique des radioéléments chez les insectes (Annales de zoologie - Ecologie animale 1970).

Ce chercheur esseye actuellement par des marquages avec plusieurs radioisotopes émetteurs γ tels que le zinc et le fer, en effectuant sur des insectes des grains vivants et observés fréquemment par scintillation en milieu solide, de relier l'élimination des isotopes à des comportements physiologiques tels que ponte, déplacement ou variation du métabolisme basal. Il convient bien sûr de maîtriser complètement toutes les causes de variation de la période biologique (température, sexe, poids de l'insecte, etc ...) en utilisant des cellules de culture perfectionnées.

C'est dans ce secteur, croyons-nous, que l'utilisation des isotopes a le plus d'avenir en entomologie.

RADIOCONSERVATION DES DENREES ALIMENTAIRES

Depuis près de 20 ans, la possibilité de conserver par irradiation les denrées alimentaires est considérée comme une des applications majeures de l'énergie nucléaire. Le fait que insectes, microorganismes ou enzymes puissent être détruits ou annihilés sans élévation de température ni changement apparent de la structure du produit en est la raison principale. On va voir que la question n'est pas de constater qu'une denrée se conserve après irradiation, mais, en plus, de prouver son innocuité.

Et pour cela, qu'on me permette d'abord de préciser ce qu'est une denrée alimentaire en 1971.

Denrée alimentaire

Il y a d'abord les produits frais, légumes, fruits ou viandes que l'on consomme directement avec ou sans cuisson. Il y a aussi les produits transformés, soit qu'on les ait séchés, soit qu'on leur ait adjoint d'autres substances de base comme par exemple l'amidon. De plus en plus, les denrées alimentaires se présentent sous forme de poudre qu'il suffit de diluer et de réchauffer pour la consommer. Ainsi la chaleur n'agit plus comme agent de stérilisation et, si le produit est pollué, il sera de consommation dangereuse. De 1959 à 1966, la valeur des denrées consommées à l'état brut est passée en France de 26 à 29 milliards de francs; celles des produits élaborés de 46 à 77 milliards. En République Fédérale d'Allemagne 106.000 tonnes de potage en sachets ont été fabriqués en 1966. On évolue rapidement vers une alimentation stockée en poudre, sous emballage étanche et à consommer après un simple réchauffage.

Historique de la conservation des denrées alimentaires par irradiation

Au début, on fit de "l'épicerie". C'est-à-dire que dans beaucoup de pays, on a irradié toutes sortes de produits. On a déterminé les doses auxquelles ces derniers se conservaient. Le bilan est simple : alors que l'homme est tué à 0,6 krad environ et que les mutations sur plantes requièrent entre 1 et 20 krad, la germination des tubercules et bulbes est arrêtée entre 7,5 et 15 krad. La désinsectisation est acquise de 10 à 20 krad. Les spores de champignons sont touchés entre 100 et 500 krad. Les salmonelles des oeufs demandent 500 krad. Par contre, pour stériliser les viandes, il faut atteindre 2.000 à 3.000 krad et les enzymes sont altérées à plus de 5.000 krad.

Ce tableau général acquis, des essais non seulement de comestibilité mais aussi et de plus en plus d'innocuité, que nous exposerons, ont permis d'accorder des autorisations concernant l'irradiation des denrées. C'est l'URSS qui, la première en 1958 (14 Mars), a autorisé l'irradiation des pommes de terre à 10 krad avec les rayons γ du Cobalt 60.

Notons au passage qu'une autorisation doit être demandée pour chaque denrée, chaque type de rayonnement et pour une dose.

Viennent ensuite :

entre 1960 et : 9 Novembre 1960, Canada, pommes de terre ^{60}Co 10 krad
1963 14 Juin 1963, Canada, pommes de terre ^{60}Co 15 krad
8 Février 1963, U.S.A., bacon ^{60}Co 4,5 à 5,6 Mrad

Retenons bien : 23 Août 1963, U.S.A., bacon électrons 5 Mev 4,5 à 5,6 Mrad
cette date 21 Août 1963, U.S.A., blé et produits à ^{60}Co 20 à 50 krad
base de blé

En 1964 : aux U.S.A. le bacon pour 4,5 à 5,6 Mrad avec le Cs 137
aux U.S.A. le bacon pour 4,5 à 5,6 rayons X d'électrons de 5 Mev.
aux U.S.A. le blé pour 4,5 à 5,6 20 à 50 krad de Cs 137
ainsi que les pommes de terre pour 5 à 10 krad au ^{60}Co ou au ^{137}Cs

En URSS à : 1. Les fruits et légumes pour 200-400 krad avec le ^{60}Co
titre d'essai 2. Diverses viandes pour 600 à 800 krad au ^{60}Co .

- En 1965 : les oignons au Canada (^{60}Co 15 krad)
le bacon aux U.S.A. (électrons de 10 Mev pour 4,5 à 5,6 Mrad)
les pommes de terre aux U.S.A. (Cs 137 pour 5 à 15 krad et non 10)
- En 1966 : L'URSS autorise l'irradiation des fruits déshydratés, pour 100 krad du ^{60}Co et les concentrés d'aliments déshydratés pour 70 krad toujours avec le ^{60}Co .
Les volailles vidées sont à titre d'essai, autorisées pour 600 krad avec le ^{60}Co .
- En 1967 enfin l'URSS autorise, *pour essais*, les oignons à 6 krad avec le ^{60}Co , diverses viandes emballées pour 800 krad ^{60}Co et Israël accorde sa première autorisation sur les pommes de terre (15 krad avec le ^{60}Co).

Telle était la situation du début de 1968 au moment où un rapport douteux de STEWARD mettait en cause certains effets mutagènes d'aliments irradiés. Combattu, ce rapport n'en a pas moins été à l'origine d'une campagne anti-irradiation et il est intéressant de relever ce qui reste autorisé à la fin de 1970 selon la division mixte AIEA/FAO.

L'URSS n'a rien modifié. Le Canada a ajouté à ses autorisations le blé et ses produits pour la désinfection 75 krad du ^{60}Co en 1969. Israël a ajouté en 1968 pour 10 krad du ^{60}Co l'inhibition de la germination des oignons. Deux autres pays ont autorisé pour la première fois l'irradiation des denrées l'Espagne pour les pommes de terre (5 à 15 krad du ^{60}Co en 1969). Les Pays-Bas en 1969 pour des lots expérimentaux d'asperge, de cacao en fèves, de fraises en pour la pasteurisation des champignons à 250 krad avec le ^{60}Co ou les électrons de 4 Mev. En 1970, ce même pays vient d'ajouter les pommes de terre pour 15 krad (^{60}Co et électrons). Mais surtout c'est le cas des Etats-Unis qui mérite attention: on ne conserve que le blé et ses dérivés pour 20 à 50 krad et les pommes de terre pour 5 à 15 krad. Le bacon se voit retiré de la liste des produits autorisés. La France dans cette affaire hésite à autoriser les pommes de terre dont le premier dossier fut pourtant présenté en 1963. Il semble toutefois que l'autorisation soit en vue.

Pour en terminer sur ce bilan, nous citerons l'exemple de la Turquie pour laquelle l'AIEA avait accordé vers 1968 une aide substantielle en la dotant d'un irradiateur industriel en vue de désinsectiser les grains, donc à des doses faibles de l'ordre de 20 krad. Une campagne de presse axée sur la crainte de transformer la Turquie en cobaye pour les autres pays a eu un succès tel que l'irradiateur a dû être démonté et renvoyé à l'Agence.

En fait, on se trouve actuellement dans une période de réflexion et des preuves doivent être données pour que, massivement, des autorisations soient accordées.

Une prospective de l'irradiation

Nous examinerons quatre cas où l'irradiation a de fortes chances de devenir un procédé privilégié dans la décennie prochaine :

- 1er cas* : L'arrêt de la germination, comme d'ailleurs le ralentissement de la maturation de certains fruits (bananes, mangues, tomates) semble présenter un certain nombre d'avantages et aucun inconvénient. Des études précises ont montré qu'il n'y a pas induction de produits toxiques, et que l'innocuité du produit traité est certaine.

2ème cas : La désinsectisation semble prometteuse surtout pour les pays en voie de développement. A ce sujet, un spécialiste canadien de l'irradiation des denrées alimentaires K.F. Mc QUEEN a rappelé en 1967 que, selon la FAO, si l'on pouvait réduire de 50% les pertes mondiales de céréales imputables aux rongeurs, insectes et micro-organismes, on récupérerait 9 millions de tonnes de protéines, c'est-à-dire assez pour nourrir quelques 300 millions de personnes. Contre les insectes, l'irradiation est une arme efficace. Toutefois, les doses un peu plus élevées que celles utilisées dans le 1er cas imposent que des tests de comestibilité soient effectués. Car il ne suffit pas d'autoriser en un pays l'irradiation d'une denrée. Le principal problème est de pouvoir la vendre à l'étranger. Les pays clients doivent eux aussi avoir autorisé cette technique.

3ème cas : A des doses plus fortes, de l'ordre de quelques centaines de krad, l'irradiation joue vis-à-vis des microorganismes le rôle d'une pasteurisation, c'est ce qu'on appelle la radurisation. Ainsi selon les conclusions d'un colloque sur l'irradiation des produits de la mer, tenu à Venise en 1969, on a la possibilité de prolonger parfois de plusieurs semaines la conservation de divers poissons et crustacés. Souvent d'ailleurs, la solution consiste à combiner l'irradiation et le froid ou la chaleur. Toutefois, à des doses de 100 à 300 krad, il est certain qu'en 1971 les hygiénistes du monde seront beaucoup plus exigeants qu'on ne l'était vers 1968 et qu'il faut prévoir de longs et coûteux tests toxicologiques. Il n'en demeure pas moins que les pays en voie de développement, qui ne disposent pas d'une chaîne continue de froid peuvent envisager avec l'irradiation une voie nouvelle de conservation du poisson frais.

4ème cas : Assainissement des produits alimentaires pulvérulents. Nous l'avons dit, il semble bien que ce soit vers cette forme de présentation, sous emballage étanche, que beaucoup de produits vont évoluer. En outre, c'est ainsi que se présentent nombre de matières premières utilisées par l'industrie alimentaire (amidon, féculé, farine). Les normes tolérées au niveau des microorganismes présents sont de plus en plus sévères ne serait-ce que parce que de plus en plus souvent ces produits ne sont pas cuits avant consommation. Par ailleurs, l'irradiation qui peut abaisser le nombre de germes pathogènes permet de ce fait de réduire les barèmes de stérilisation lorsqu'on doit recourir à cette technique. On a dans le même temps, un traitement économique qui évite l'altération des valeurs nutritives et gustatives du produit. L'état sec du produit et l'emballage étanche empêchent la recontamination. Actuellement, pour assainir des produits pulvérulents on doit recourir à des traitements chimiques (anhydride sulfureux, chlore, oxyde d'éthylène ou de propylène) souvent dangereux et parfois même non autorisés. Il est certain qu'actuellement, on s'oriente vers le remplacement de ces procédés par autre chose et c'est là qu'est la chance de l'irradiation.

Tel est d'ailleurs le thème de travail d'une des équipes du Service de Radioagronomie qui à Cadarache étudie l'assainissement de l'amidon extrait du maïs, produit modèle type. Nous allons achever ce tour d'horizon sur l'irradiation des denrées en examinant d'un peu plus près à quelques études entraînent ce sujet de recherche. Nous empruntons l'essentiel à L. SAINT-LEBE et G. BERGER.

Comment aborder l'étude de l'assainissement de l'amidon emballé

Successivement, le programme porte sur la détermination de la dose, l'appréciation de l'effet technologique, l'évaluation toxicologique sur animaux, l'identification des produits de radiolyse et les cultures bactériennes.

1. Détermination de la dose :

Les germes aérobies peu gênants sont détruits à 95% avec 200 krad. Les moisissures et levures ne résistent pas à 150 krad. On peut affirmer que, en général, la "stérilité commerciale" est obtenue à moins de 300 krad.

2. Effet technologique de l'irradiation :

L'étude rhéologique faite avec un viscosographe Branender ainsi que le test d'étalement de la crème pâtissière confirment qu'il n'y a aucun inconvénient à irradier jusqu'à 200 krad. Néanmoins, des travaux sont ici encore nécessaires.

3. Essais sur animaux :

Il est demandé normalement des essais à court terme puis à long terme pour étudier la descendance. Après de longues discussions avec les hygiénistes français et étrangers, un essai semi-chronique sur rat durant 18 mois a débuté en Mai 1971. Il a pour but d'évaluer si la radiopasteurisation ne modifie pas la digestibilité et le pouvoir nutritif, n'incute pas la formation de produits toxiques et ne perturbe pas l'ensemble des processus de reproduction, la lactation et la croissance des jeunes. Il convient de donner à consommer de l'amidon cru et cuit, car souvent la cuisson fait disparaître des produits de radiolyse, ou provoque l'apparition d'autres substances. On travaille sur groupes de 40 mâles et 40 femelles avec de l'amidon irradié à 300 ou 500 krad et un témoin. Les analyses biochimiques, hématologiques, histopathologiques faites au 4ème, 7ème et 14ème mois seront poursuivies sur trois générations.

4. Produits de radiolyse :

Trois produits ont été mis en évidence :

- l'aldéhyde malonique 0,5 µg/g immédiatement après irradiation à 300 krad. Il peut d'ailleurs servir de test d'irradiation, fait très important car on demande un tel test pour prouver que le produit a été irradié à la dose convenable.
- l'aldéhyde formique 6 à 7 µg/g d'amidon commercial irradié à 25 et 300 krad. En 3 mois, la quantité diminue de moitié.
- l'eau oxygénée qui n'apparaît qu'après 100 krad car les traces de SO_2 présentes dans l'amidon (35 µg/g) empêchent les peroxydes de se former.

5. Cultures bactériennes :

C'est la phase de latence dans le développement de *Pseudomonas putida* et *Escherichia coli* cultivés en présence d'extraits d'amidons irradiés qui est mesurée. On a là un réactif très sensible.

L'avenir de l'irradiation des denrées alimentaires

Une notion se dégage, en France en particulier. Une autorisation a plus de chances d'être accordée si les procédés classiques utilisés ne sont pas sans reproche. En ce cas, l'irradiation est un progrès, d'autant plus qu'on demande d'apporter la preuve de son innocuité. Songeons qu'il est question dans certains cas d'interdire l'anhydride sulfureux.

Un autre fait important concerne l'aspect économique. Le service de la répression des fraudes de France n'accepte de n'étudier que les dossiers pour lesquels les nouveaux procédés de conservation présentent un véritable intérêt économique ou si l'on veut ceux qui concernent des produits pour lesquels les traitements actuels sont coûteux.

Enfin et c'est le cas de la Hollande, une autorisation a plus de chance d'être accordée lorsque le produit concerné (ici les champignons) est consommé en très petite quantité par un individu au cours d'une année.

Dans ces conditions, il est probable qu'après la période actuelle de stagnation, qui verra d'autres pays accorder des autorisations pour des doses d'irradiation faibles relatives à l'inhibition de la germination des tubercules de bulbes et à la destruction des insectes des grains, on sera amené à une coordination internationale des législations pour aborder les produits dont la dose d'irradiation se situe entre 100 et 500 krad. Vers 1964, un projet international avait été élaboré sous l'impulsion de l'OCDE et avec l'aide de l'AIEA, de la FAO et de l'OMS. Il concernait un modèle (le jus de fruit) et était pris en charge par l'Autriche à Seibersdorf. Ce projet a échoué par suite d'un manque d'intérêt des pays participants et surtout peut être parce que le modèle n'avait pas d'impact économique.

En complément aux suggestions du Comité mixte AIEA/FAO/OMS d'experts sur la salubrité des aliments irradiés (Genève 1969), il a été proposé de reprendre ce projet. En 1971, l'Allemagne a été retenue comme pays hôte. L'objectif du nouveau projet, sis à Karlsruhe, est d'apprécier sur deux modèles principaux (pommes de terre et farine de blé) les effets de l'irradiation sur l'innocuité des produits et de satisfaire aux recommandations de ce comité d'experts. Par des contrats passés aux pays participants les mieux équipés, ces diverses études doivent être menées dans un délai qu'on espère de l'ordre de 3 à 5 ans.

D'autre part, et afin d'ouvrir la voie aux pays moins industrialisés, il est prévu d'étudier d'autres produits de grande consommation tels que poissons, amidon, sorgho, etc ...

C'est de la sorte, croyons-nous, que l'on peut espérer faire passer l'irradiation des denrées alimentaires du niveau artisanal à la phase industrielle.

Ainsi donc par les trois exemples que nous avons rapidement présentés : radiogénétique, entomologie nucléaire et radioconservation des denrées, nous espérons avoir attiré l'attention sur les possibilités nouvelles et la spécificité propre des techniques nucléaires. Il serait très intéressant de faire ce même bilan dans une décennie.