

L'ionisation des denrées alimentaires

Par Jacques FOOS¹ et Grégoire BINET²

Janvier 2007

¹ Professeur au Conservatoire National des Arts et Métiers (Cnam), titulaire de la chaire « Rayonnements, Isotopes et Applications, directeur du laboratoire des Sciences Nucléaires du Cnam, Président du Pôle Environnement du Cnam

² Ingénieur au Commissariat à l'Energie Atomique, Ingénieur Cnam en Sciences et Technologies Nucléaires

Les préoccupations de sécurité alimentaire prennent aujourd'hui une place importante, à l'échelon national et à l'échelon européen. Certes, la qualité sanitaire des aliments est aujourd'hui, en France comme en Europe, globalement satisfaisante et meilleure que dans un passé parfois idéalisé mais les crises récentes liées à l'alimentation animale ont montré la difficulté de maîtriser certains risques, comme la salmonellose.

L'irradiation des aliments (appelé aussi ionisation) est un procédé mis au point depuis plus de 70 ans et qui, recourant à des rayonnements (photons, électrons, rayons X) d'énergie suffisante, permet d'assurer une qualité optimale sur le plan de l'hygiène (élimination de Salmonella ou Listeria) ou de prolonger le délai de conservation et de commercialisation d'aliments, de réduire les pertes au cours du stockage (destruction des insectes dans les céréales) ou de se substituer à des substances chimiques, de présenter une solution alternative à l'autoclavage pour l'alimentation stérile (cosmonautes, malades immunodéprimés,...) ou autres applications par exemple d'ordre technologique (amélioration du rendement d'extraction en jus de fruits...). L'intérêt de l'ionisation en agro-alimentaire est double. Il réside essentiellement dans la pénétration du rayonnement au cœur de la denrée à travers l'emballage (évitant ainsi toute recontamination) et sans élévation de température (produits frais ou congelés).

Malheureusement ce procédé est mal connu et il est considéré avec suspicion par certains consommateurs chez lesquels il évoque de façon totalement infondée et irrationnelle un « danger radioactif » et ses risques éventuels.

1. INTRODUCTION SUR L'IONISATION DES DENREES ALIMENTAIRES

1.1. La nécessaire conservation des aliments

La conservation des aliments a pour but la conservation des propriétés gustatives et nutritives, et bien sûr de la comestibilité des aliments. Les denrées périssables se dégradent sous l'action d'animaux (tels que certains insectes et rongeurs), de champignons ou de germes microbiens. Ces dégradations provoquent des modifications de texture, de couleur et de goût, et peuvent rendre un aliment impropre à la consommation.

A l'origine de ces techniques, l'objectif était de pouvoir stocker des aliments en période d'abondance, afin d'éviter à faire face à la disette ou la famine durant des périodes moins fastes (fin de l'hiver, année à faible productivité...). De plus la civilisation industrielle s'est accompagnée de l'accroissement du transport des aliments depuis les campagnes vers les villes où la population s'est tournée vers des activités ne produisant pas de nourriture.

1.2. Historique des travaux internationaux

Le traitement ionisant des aliments n'est pas un procédé nouveau : en 1898, l'Allemand Reider démontre l'action létale des rayons X ; en 1904, l'Américain Green précise les propriétés stérilisantes du radium ; en 1930, le Français Wurtz dépose un brevet sur la stérilisation des aliments par rayons durs pénétrants.

Il faudra attendre les années 1970 pour voir apparaître un intérêt conséquent porté à ce procédé, ce qui a permis de lancer des études plus approfondies sur les effets, sur les principes nutritifs et le potentiel cancérigène et mutagène du traitement des aliments par ionisation. Cet intérêt est également marqué par la mise en place dès 1972 d'un vaste programme international en matière d'ionisation (Karlsruhe), patronné par l'OCDE³ et financé par 24 pays.

De très nombreuses études ont depuis établi l'innocuité des aliments ionisés, dans un premier temps jusqu'à 10 kGy (OMS⁴ 1981), puis sans limitation de dose commerciale (OMS 1997).

³ Organisation de Coopération et de Développement Economique

⁴ Organisation Mondiale de la Santé

2. LES MECANISMES D'ACTION DES RAYONNEMENTS IONISANTS

2.1. Interaction des rayonnements et de la matière

Lors de l'application des traitements ionisants à l'assainissement et à la conservation des denrées alimentaires, on emploie des rayonnements qui possèdent une énergie suffisante pour séparer un électron orbital des milieux biologiques irradiés, convertissant ainsi ces atomes en ions positifs et générant dans la substance exposée, une ionisation.

Les atomes sont globalement neutres d'un point de vue électrique. S'il manque un ou plusieurs électrons ou si, artificiellement, il en a été arraché aux couches orbitales d'un atome, cet atome est alors dit "ionisé" et sa charge électrique globale est devenue positive. Pour ioniser, il faut donc apporter une énergie suffisante pour arracher un électron. Parfois, l'énergie apportée par le rayonnement est simplement absorbée par l'atome, sans éjection d'électron. On dit alors que l'atome est excité et on parle d'excitation.

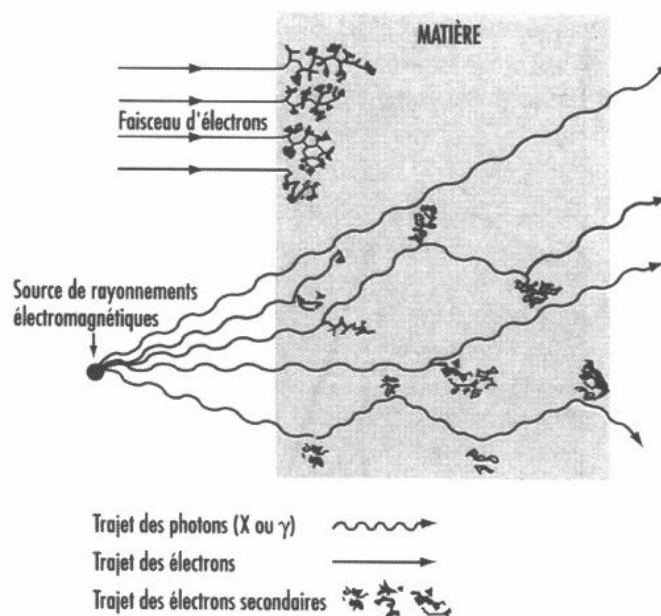
Ionisation et excitation sont deux phénomènes concomitants. Cette énergie d'ionisation et d'excitation peut se véhiculer sous la forme :

- d'ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde est de l'ordre de l'angström : 1 dix-millionième de millimètre (10^{-10} mètre) : rayons X ou γ .
- de particules, essentiellement des électrons, dont l'énergie est limitée à 10 MeV (c'est l'énergie que possède un électron lorsqu'il est soumis à un potentiel de 10 millions de volts).

Les électrons et les rayons X sont produits par des accélérateurs de particules, les rayons γ sont fournis par des sources radioactives : ^{60}Co et ^{137}Cs .

Les énergies de ces rayonnements sont certes suffisantes pour arracher un électron aux atomes de la matière rencontrée mais se situent en dessous du seuil d'activation. Ceci veut dire qu'il est impossible d'induire le phénomène de radioactivité dans l'aliment traité. Ceci est très important et une condition sine qua non pour l'utilisation de ce procédé de conservation.

Interaction des rayonnements ionisants avec la matière.



2.2. Effets du rayonnement sur le milieu

Les électrons, comme les rayonnements X ou γ , ont la propriété de pénétrer différents matériaux auxquels ils apportent leur énergie, provoquant ainsi l'ionisation du milieu traversé. En pénétrant dans un aliment, les électrons accélérés ou ceux formés in situ à partir de rayonnements électromagnétiques (X ou γ), vont perdre leur énergie en interagissant avec les électrons des atomes du milieu traversé.

2.2.1. Dose et débit de dose

On définit la dose comme l'énergie déposée par les rayonnements dans un échantillon de matière. Une source radioactive émet dans toutes les directions. Une partie des rayonnements est absorbée par l'air, les écrans mis en place et les matériaux rencontrés avant d'atteindre l'échantillon. La dose de dépôt d'énergie tient compte de ces facteurs géométriques et de ces absorptions. En principe, la dose se calcule en multipliant ces facteurs par l'activité de la source et par l'énergie moyenne déposée par le rayonnement. Ce calcul est difficile et, dans la pratique, on utilise des dosimètres pour évaluer ces doses. Le choix du dosimètre dépendra de sa gamme de lecture, de la stabilité et de la reproductibilité de sa réponse, de la simplicité de mise en œuvre, mais également de son coût d'utilisation.

L'unité de dose est le gray (Gy), qui correspond à une énergie absorbée équivalente à un joule par kilogramme de matière. On appelle débit de dose, la dose délivrée par unité de temps qui s'exprime en gray par seconde (ou en kilogray par heure). La dose varie de 0,05 à 10 kGy environ dans le domaine alimentaire.

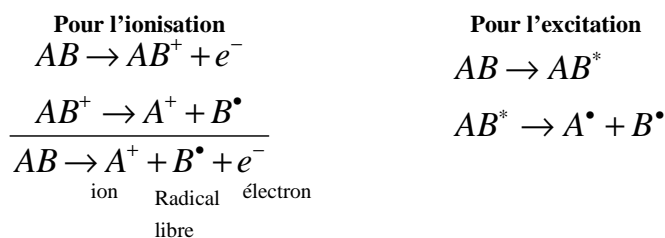
L'importance des transformations des aliments sera fonction de l'énergie déposée et donc de la dose absorbée.

2.2.2. Effets chimiques

Des processus chimiques accompagnent l'ionisation et l'excitation de la matière traversée par les rayonnements. L'importance des effets induits dépend de l'état dans lequel se trouve la substance irradiée. En phase solide où les interactions moléculaires demeurent relativement limitées, seul intervient un effet direct du rayonnement. En phase aqueuse où s'opèrent les recombinaisons liées aux propriétés diffusives du milieu, un effet indirect s'ajoute à l'effet direct.

Effet direct : mécanismes des réactions de radiolyse

Les processus d'ionisation et d'excitation entraînent la rupture des liaisons chimiques unissant les atomes d'une molécule ainsi que l'apparition de fragments moléculaires doués d'un grand pouvoir d'oxydation et appelés radicaux libres (notés X^\bullet).

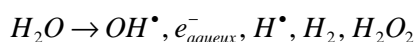


Effet indirect : radiolyse de l'eau et des solutions aqueuses

L'interaction entre une particule chargée (ou une radiation électromagnétique) et une molécule d'eau peut conduire soit :

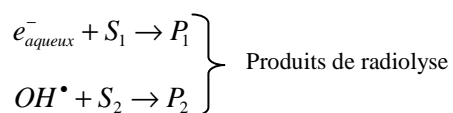
- à l'ionisation de cette molécule en provoquant l'arrachement d'un électron orbital,
- à l'excitation de cette molécule si l'énergie du rayonnement est trop faible pour l'ioniser.

Ceci provoque la formation de radicaux libres. Ces espèces possèdent un électron dit célibataire, c'est-à-dire non apparié à un autre électron, ce qui formerait une liaison entre deux atomes. Cela le rend très réactif parce qu'il essaie d'apparier cet électron célibataire avec un autre appartenant à un autre radical libre.



H_2 et H_2O_2 sont des produits de radiolyse, recombinaisons respectives de $2 H^\bullet$ et de $2 OH^\bullet$ entre eux.

Ces radicaux libres vont réagir sur des solutés S éventuellement présents



Il convient de noter l'importance particulière de l'oxygène en tant que soluté, car cette molécule biradicalaire (possédant deux électrons célibataires) est très réactive avec les radicaux libres et les molécules insaturées. Elle forme avec les produits de radiolyse, entre autres, des ponts peroxydes responsables notamment du rancissement des matières grasses en réagissant avec des lipides insaturés.

Les produits de radiolyse sont donc des molécules étrangères qui ne se trouvent pas dans l'aliment avant son traitement puisqu'elles sont consécutives à l'irradiation.

Il est à noter que ces produits de radiolyse sont de même nature que les produits de thermolyse (c'est-à-dire les composés étrangers consécutifs à un traitement par chaleur à des fins également de conservation). De plus ils sont produits par ionisation en moindre quantité que dans les « stérilisations » par chaleur.

2.3. Effets biologiques

Ce sont les effets biologiques des rayonnements ionisants qui sont principalement recherchés lors de leur utilisation dans le domaine agroalimentaire, et plus précisément leur action sur les agents d'altération alimentaire : microorganismes indésirables (virus, bactéries, levures ou moisissures), parasites ou métabolismes d'altération.

L'absorption d'énergie se traduit par des effets physico-chimiques directs, et par des effets indirects résultant de la radiolyse de l'eau présente dans le milieu ionisé. L'ionisation a des effets au niveau moléculaire, cellulaire ou au niveau de l'organisme entier. Mais le principal élément visé par le traitement est l'ADN (acide désoxyribonucléique), molécule très radiosensible.

Deux éléments se dégagent des analyses expérimentales :

- la radiosensibilité augmente avec la taille et le degré d'organisation de la cellule,
- pour un type d'organisation donné, la radiosensibilité croît avec la quantité d'acide nucléique contenue dans la cellule.

Les effets biochimiques induits sur les constituants organiques du vivant par les traitements ionisants sont relativement modérés dans le domaine d'énergie utilisée. La proportion de chacun des produits de radiolyse formés est faible (0,1 à 0,2 partie par million (ppm)).

	Effets
protéines	Négligeables
glucides	Négligeables
lipides	Réactions possibles sur les lipides insaturés : formation de peroxydes (rancissement)

2.4. Principales applications et limitations de l'ionisation

2.4.1. Les applications

Trois termes sont utilisés pour caractériser les différentes applications possibles :

la radurisation : application de doses ionisantes réduisant sensiblement la charge microbienne du produit en vue d'allonger légèrement sa durée de vie commerciale (doses inférieures ou égales à 5kGy),

la radication : application de doses d'irradiation suffisantes pour réduire le nombre de micro-organismes pathogènes de façon à ne pouvoir les mettre en évidence par aucune méthode microbiologique connue (doses inférieures ou égales à 10 kGy),

la radappertisation⁵ : application de doses d'irradiation suffisantes pour réduire le nombre de microorganismes vivants de façon à ne pouvoir les mettre en évidence par aucune méthode microbiologique connue (doses comprises entre 20 et 50 kGy).

2.4.2. Les limitations

Nous avons vu que le Comité d'Experts de la FAO ⁶, de l'OMS et de l'AIEA⁷ a rendu un avis tout d'abord en 1981 : "*l'ionisation de n'importe quel aliment jusqu'à une dose de 10 kGy (...) n'induit aucun problème d'ordre nutritionnel (...)*", puis un second avis en 1997 : "*(...) des doses supérieures à 10 kGy (...) ne provoquent pas de pertes d'éléments nutritifs au point d'avoir un effet négatif sur l'état nutritionnel des individus ou des populations*".

Les limitations ne concerneront donc pas le domaine nutritif, en revanche les techniques d'ionisation peuvent entraîner des modifications au niveau de la flaveur (goût, odeur) des aliments, de leur texture et/ou de leur odeur. Ces modifications organoleptiques proviennent de la radiolyse des constituants alimentaires entraînant souvent des changements qualitativement très mineurs (mais suffisants) de la structure de certains constituants. Ceci ne présente aucun risque pour le consommateur mais rend impossible la commercialisation des produits traités.

⁵ Cette application est une stérilisation. Elle n'est, jusqu'à présent, utilisée qu'à des fins expérimentales, compte tenu des doses utilisées. Aucune autorisation n'a encore été délivrée pour ce genre d'application, bien qu'autorisée depuis 1997 par le comité d'Expert de la FAO, de l'OMS et de l'AIEA

⁶ FAO : Food and Agriculture Organisation = Organisation des Nation Unis pour la Nourriture et l'Agriculture.

⁷ AIEA : Agence Internationale pour l'Energie Atomique.

On peut réduire l'apparition de ces modifications par :

- un abaissement de la température lors de l'ionisation,
- une absence d'oxygène lors de l'ionisation,
- une limitation de la formation des produits de la radiolyse en optimisant la dose en fonction des objectifs fixés.

Mais pour certains aliments, ces phénomènes nécessiteront tout de même une restriction du champ d'application.

Pour les viandes :

Le but essentiel de ce genre de traitement est de prolonger la durée de conservation et d'éliminer les bactéries pathogènes. Les doses délivrées seront comprises entre 1 et 5 kGy.

On peut tout d'abord observer une apparition d'odeurs désagréables "de chien mouillé" si la dose appliquée est trop importante. Cette limite de dose sera fonction du type de viande exposée ainsi que des conditions de traitement (emballage, atmosphère). On peut repousser cette limite en effectuant une ionisation en atmosphère inerte ou en abaissant la température lors de l'exposition (-20°C).

Il peut ensuite y avoir une modification de la couleur des viandes exposées. Mais un tel phénomène ne se produit qu'après ionisation à des doses très supérieures à celles habituellement pratiquées.

Enfin la texture de la viande peut être modifiée, mais il a été très fréquemment observé une augmentation de la tendreté des viandes ionisées, ce qui constitue plutôt un avantage.

Les produits de la mer :

Pour des doses d'exposition supérieures à 3 kGy, on peut noter l'apparition d'odeurs désagréables. Les doses couramment utilisées ne dépassent donc pas 2 kGy.

La texture des denrées peut être modifiée (durcissement) pour des doses très élevées et largement supérieures aux doses admissibles (10 kGy pour le homard, 15 kGy pour la truite).

On peut enfin noter une atténuation de la couleur (rose) du saumon au-delà de 3 kGy.

Les fruits et les légumes :

Pour des doses d'ionisation dépassant 2 kGy, on observe une altération de la texture (ramollissement) des fruits exposés en vue d'augmenter leur durée de conservation. Ceci provient de la cassure des chaînes pectiques qui constituent le squelette de la paroi végétale. On peut éviter ce phénomène en réalisant une fertilisation calcique en champ, pour les fraises notamment.

Le problème se pose moins pour les légumes, car ces derniers sont généralement consommés cuits. Il peut même y avoir un effet bénéfique de réduction du temps de cuisson.

Les pommes de terre et les oignons :

Ces denrées sont ionisées afin d'inhiber le processus de germination. Les doses d'exposition étant faibles (0,1 kGy), on n'observe que très peu de modifications organoleptiques.

On peut observer pour les pommes de terre une légère augmentation de la saveur sucrée lors d'une conservation prolongée. Quant aux oignons, il a été parfois noté une diminution de leur pouvoir lacrymogène et de leurs propriétés astringentes suite à leur traitement.

Le lait et les produits laitiers :

Ces produits sont sujets à l'apparition d'odeurs désagréables à la suite d'un traitement ionisant, et cela pour des doses assez faibles (0,05 kGy). De plus ils peuvent transmettre cette mauvaise odeur s'ils entrent dans la composition de plats cuisinés. Ce phénomène explique le peu d'intérêt que présente l'ionisation pour ce genre de produits.

3. INNOCUITE DES ALIMENTS IONISES

Y a-t-il un risque à consommer des aliments ionisés ?

Ce type de traitement ne peut se substituer au respect des bonnes pratiques en matière d'hygiène alimentaire. Il n'est pas appelé à remplacer les traitements actuels mais doit être considéré comme complémentaire des méthodes classiques (froid, cuisson...). Par contre il a l'avantage indéniable de remplacer l'utilisation d'agents de fumigation, notamment du dibromure d'éthylène⁸ (DBE) interdit depuis 1984, et d'autres agents de stérilisation comme l'oxyde d'éthylène⁹ et les nitrites¹⁰. Ces substances chimiques peuvent favoriser le développement de cancers et l'irradiation, en ce sens, pourrait avantageusement remplacer ces éléments. L'ionisation pourrait fournir également une bonne alternative écologique à l'utilisation du bromure de méthyle¹¹. Ce gaz est utilisé pour tuer les insectes et parasites durant les traitements de quarantaine des fruits et des légumes frais.

3.1. Irradiation et radioactivité

Les aliments irradiés ne deviennent pas radioactifs. L'énergie des rayons γ (qui émanent du cobalt 60 ou du césium 137) utilisés dans le processus d'irradiation est trop faible pour rendre les aliments radioactifs. En outre, les aliments n'entrent jamais en contact avec la source radioactive lors du processus et par conséquent, ne peuvent pas être contaminés. En effet, les sources industrielles sont réalisées et contrôlées selon des normes très strictes qui interdisent toute fuite de matériaux radioactifs. Elles ont une durée de vie limitée (10 ans en France) et doivent être retournées au fournisseur après la durée légale d'utilisation. Dans le cas des appareils utilisés pour irradier les aliments (accélérateurs d'électrons ou générateurs de rayons X), la réglementation impose des contraintes sur l'énergie des radiations visant les aliments afin que ces derniers ne puissent devenir radioactifs. Avec des photons d'une énergie inférieure à 5 MeV, le noyau atomique n'est pas atteint et aucune réaction nucléaire susceptible d'engendrer la création de corps radioactifs n'est à craindre. C'est pourquoi l'OMS a fixé le seuil énergétique à 10 MeV pour les électrons et à 5 MeV pour les photons X. Les photons γ sont, de façon naturelle, limités en énergie à 0,66 MeV pour le ¹³⁷Cs et 1,33 MeV pour le ⁶⁰Co.

⁸ Il éradique les moisissures, tue les insectes et les rongeurs. C'est un toxique et un poison, son utilisation a été stoppée grâce au protocole de Montréal pour protéger la couche d'ozone.

⁹ Ce toxique tue aisément tout type de micro-organismes.

¹⁰ Exercent une action anti-microbienne (sur *clostridium botulinum* et certains staphylocoques), une action sur la flaveur (exaleur d'arômes), une action sur la couleur (évite le brunissement). Leur utilisation entraîne des risques toxicologiques (cancérigène, risque de méthémoglobines chez le nourrisson).

¹¹ Utilisé pour la fumigation des sols et des denrées. Son utilisation est interdite à cause de son effet nocif sur la couche d'ozone.

3.2. Irradiation et salubrité alimentaire

L'irradiation contribue à diminuer le nombre de bactéries et autres micro-organismes pathogènes qui peuvent se trouver dans les produits alimentaires. Comme tous les autres aliments, ceux qui ont été irradiés doivent être manipulés, stockés et cuits de façon adéquate pour éviter la recontamination. Toutefois, les doses utilisées sont insuffisantes pour détruire la totalité des micro-organismes présents.

3.2.1. Sélection de flores radiorésistantes

Etant donné que tous les micro-organismes ne sont pas détruits lors du traitement, on pourrait se demander si une flore radiorésistante ne peut pas se développer, profitant de l'espace vital libéré par la destruction de flores moins résistantes. Cela peut être le cas de *Clostridium botulinum*, bactérie qui produit des toxines à l'origine de graves intoxications alimentaires (botulisme) pouvant entraîner la mort.

Il faut toutefois signaler que toutes les méthodes de conservation des aliments présentent le même type de problème et agissent de façon sélective sur les micro-organismes. L'ionisation ne peut donc pas être tenue responsable d'un risque supplémentaire qui ne puisse être rencontré avec aucune autre méthode de conservation conventionnelle.

3.2.2. La mutation

L'action des rayonnements ionisants à très faibles doses peut conduire à l'augmentation du taux de mutations génétiques chez les micro-organismes. Ces derniers pourraient être plus virulents, plus pathogènes et plus résistants que les souches mères.

Aucune observation scientifique n'a permis de mettre en évidence ce genre de modifications dans le cas d'ionisation de denrées alimentaires. En fait une ionisation unique ne permet pas d'obtenir des souches mutantes viables. Seule une succession bien contrôlée de cycles d'ionisation et de récupération de souches survivantes peut permettre d'observer des souches mutantes viables. Il faut également garder à l'esprit que ce phénomène n'est pas non plus spécifique au traitement ionisant et que des souches thermorésistantes de Salmonelles ont pu être isolées.

3.3. Irradiation et risque nutritionnel

La consommation d'aliments ionisés pourrait représenter un risque si ce traitement générerait des pertes importantes des qualités nutritionnelles des denrées.

Nous avons vu que ce traitement n'entraînait qu'une très faible dégradation des lipides, des protéines et des glucides et aucune dégradation des minéraux. Seules certaines vitamines sont légèrement altérées par ce traitement.

Le tableau suivant montre que l'affectation des éléments nutritifs par l'ionisation, si elle est réelle, est moindre que le traitement par chaleur.

Elément nutritif affecté	Témoin non traité	Traitement par chaleur	Stérilisation par le rayonnement
Méthionine	100	75	88
Lysine	100	85	95-100
Argénine	100	92	100
Phénylalanine	100	92	96-100
Leucine	100	96-100	96-100
Vitamine A	100	45-52	65-70

3.4. Le risque chimique

Plusieurs dizaines d'années de recherches n'ont pas permis de découvrir des produits de radiolyse spécifiques qui ne soient pas déjà présents dans l'aliment avant le traitement ou qui ne soient pas générés par des phénomènes d'autolyse (conservation), de thermolyse (chauffage) ou d'autres encore.

Les radicaux libres radio-induits dans les aliments vont immédiatement se recombinaison dans l'aliment lui-même avant d'être consommés. Ils ne présentent donc aucun risque toxique.

Les produits de radiolyse sont identiques à ceux obtenus par d'autres techniques de conservation. De plus la très faible quantité produite ne permet pas d'observer un effet toxique. Une étude a montré qu'il faudrait consommer tous les jours, plus de 800 poulets entiers ionisés à 3 kGy pour voir apparaître de tels effets.

Les emballages peuvent, sous l'effet des radiations, libérer des fragments polymériques de faible poids moléculaire et également être fragilisés, remettant en cause leur intégrité. Toutefois ces effets n'apparaissent qu'à des valeurs de rayonnement élevées et uniquement avec certains types de plastiques. De plus les matériaux les plus utilisés dans l'industrie alimentaire (polyéthylène et polystyrène) sont les plus radiorésistants et donc les mieux adaptés à l'emballage des aliments destinés à être ionisés.

Selon le docteur Fritz Kafenstein, Directeur du programme OMS de salubrité des aliments et d'aide alimentaire : *"plus de 50 années de recherche sur les réactions chimiques qui se produisent dans les aliments soumis à de fortes doses de rayonnements ionisants nous ont convaincu que l'on peut aller jusqu'à 75 kGy, comme cela a été fait dans certains pays, et que le résultat reste le même : les aliments traités sont sains et conservent leurs qualités nutritives"*. Le Dr Jeny Roberts, ancien Directeur du Service de Microbiologie de l'Institut de Recherche sur les aliments au Reading Laboratory (Royaume-Uni) a également déclaré : *"L'ionisation est peut-être la technique de traitement des aliments qui a fait l'objet des recherches les plus approfondies. Nous considérons qu'il a été prouvé scientifiquement que l'application de doses élevées donne des produits sains et de bonne qualité nutritive"*.

4. TECHNIQUES UTILISEES

L'irradiation des matières premières alimentaires est réalisée en recourant à l'un des équipements suivants :

- installations utilisant les rayons γ du cobalt 60, plus rarement ceux du césium 137 (pour la recherche),
- générateurs de rayons X,
- accélérateurs de particules.

Il s'agit d'installations nécessitant une ingénierie spécifique assurant la sécurité des manipulateurs. Relativement coûteuses (quelques centaines de milliers d'euros) et peu nombreuses, elles sont situées dans des zones de production agro-alimentaire utilisatrices de cette technique et obligent un transport souvent onéreux des denrées.

4.1. Installations à accélérateur d'électrons

4.1.1. Présentation générale

Une unité de traitement par faisceaux d'électrons se compose de quatre ensembles :

- La source de rayonnement : l'accélérateur d'électrons. Le tube accélérateur est implanté horizontalement ou verticalement ce qui correspond à un faisceau de rayonnement orienté de haut en bas ou horizontalement.
- L'aire de stockage des produits avant et après traitement.
- Le système de convoyage : il transporte les produits vers l'accélérateur, les fait défiler dans le flux de rayonnement et les évacue après le traitement.
- La cellule en béton qui entoure la source de rayonnement et protège le personnel.

Les dimensions de la cellule en béton et la technologie du convoyeur sont déterminées en fonction de la nature et de la présentation des produits à traiter.

En général le rayonnement utilisé est celui des électrons. Mais dans certains cas, on utilise les rayons X provenant d'une cible (généralement en tungstène) placée sur le parcours des électrons. Les rayons X étant plus pénétrants, on rejoint l'avantage des rayons γ . L'inconvénient de cette méthode est le faible rendement de conversion électron/rayons X (de l'ordre de 5%). Elle est peu utilisée pour l'ionisation des denrées alimentaires.

4.1.2. Caractéristiques d'un générateur électrique de rayonnements

L'utilisation d'un générateur électrique qui "ne rayonne qu'à la demande" présente un certain nombre d'avantages :

- pratique : démarrage et arrêt à volonté de l'accélérateur en fonction des traitements à effectuer, grande simplicité d'exploitation, pas de consommation hors traitement.
- sécuritaire : mesures de sécurité identiques à celles imposées à toute installation utilisant des hautes tensions électriques et ne détenant aucune source radioactive. Arrêt immédiat du générateur en cas d'anomalie. Aucun risque de contamination en cas d'incident majeur (incendie, explosion...).
- réglementaire : l'implantation et l'exploitation d'une unité d'ionisation équipée d'un accélérateur d'électrons à usage industriel sont soumises à des contraintes réglementaires moins strictes que dans le cas d'un irradiateur γ .

En revanche, le pouvoir de pénétration des électrons dans la matière $R(\text{cm})$ est faible. Il dépend de l'énergie $E(\text{MeV})$ des électrons et de la masse volumique $\rho(\text{g/cm}^3)$ de la matière irradiée. En traitement biface :

$$R = \frac{0,8xE}{\rho}$$

Ainsi $R = 8 \text{ cm}$ pour $E = 10 \text{ MeV}$ et $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$.

Ce faible pouvoir de pénétration dans la matière des électrons accélérés nécessite :

- une adaptation des épaisseurs des produits à traiter (quelques cm),
- un traitement généralement monocouche des produits conditionnés, le traitement "double face" nécessitant une maîtrise importante de l'épaisseur et de la densité du produit exposé.

Le but est d'obtenir l'effet recherché en limitant les effets secondaires indésirables.

Les accélérateurs seront donc spécialement bien adaptés au traitement "grande cadence" de produits défilant en couche mince tels que les céréales ou les produits pulvérulents par exemple. Les produits conditionnés seront nécessairement dépalettisés et repalettisés.

4.2. Irradiateurs gamma

4.2.1. Présentation générale

L'irradiateur est constitué d'une vaste cellule blindée de volume variable (quelques dizaines à quelques centaines de mètres cube). Au centre de cette cellule, sur un porte-source métallique sont déposées les sources isotopiques.

Le principe de fonctionnement est très simple : les produits circulent autour de la source et absorbent ainsi les rayonnements émis. A l'arrêt, la source est immergée dans une piscine aménagée sous la casemate. L'épaisseur d'eau est calculée de façon à absorber tout le rayonnement émis par les sources stockées au fond de la piscine.

4.2.2. Caractéristiques

Il convient d'utiliser des radio-isotopes émettant un rayonnement d'énergie inférieure à celle provoquant l'apparition d'une radioactivité induite. Les sources isotopiques les plus utilisées sont le cobalt 60 et le césium 137.

Dans la pratique industrielle, la plupart des centres d'ionisation optent pour le cobalt 60 (énergie 1,17 et 1,33 MeV). Ce choix est lié à la solubilité physique des sels de césium et par conséquent aux difficultés de stockage des sources en piscine. Les installations utilisant le césium 137 fonctionnent pour cette raison en stockage sec.

Le cobalt 60 (insoluble dans l'eau), provient du cobalt naturel (^{59}Co) auquel on ajoute un neutron par bombardement. Cette opération a lieu dans un réacteur nucléaire. Selon son origine, son conditionnement et sa date de fabrication, un crayon industriel au cobalt 60 renferme des activités de l'ordre de 185 TBq¹³ à 740 TBq (5 000 à 20 000 curies). Compte tenu de sa période courte¹⁴ (5,27 ans), le rechargement des sources doit être réalisé à raison de 12% par an en moyenne si on veut que son niveau d'activité reste constant.

Une activité de 2380 TBq (64 300 Ci) de cobalt 60 correspond à une puissance de 1 kW pour un accélérateur d'électrons.

Pouvoir de pénétration et capacité de production

Les sources de cobalt 60 présentent un fort pouvoir de pénétration qui permet de traiter des produits en vrac ou conditionnés en gros volume. Cependant la source rayonnant dans l'espace de façon permanente, le rendement en rayonnement ionisant varie de 20 à 30% en fonction de la configuration de la source. Le débit horaire de dose délivrée est de

¹³ TBq : téra (10^{12}) becquerel.

¹⁴ La période d'un élément radioactif est le temps au bout duquel la moitié de sa radioactivité a disparu

1 à 5 kGy. En conséquence, le temps d'exposition des produits est très long (0,2 à 30 heures).

La capacité de production d'une installation γ dépendra de son activité, du rendement en rayonnement et de la dose à appliquer.

L'activité globale de la source est dimensionnée en fonction du volume annuel de produits à traiter et des cadences de traitement. Elle peut varier de quelques centaines de milliers de curies à plusieurs millions (1000 curies = 37 TBq).

4.2.3. Système de convoyage

De nombreux systèmes sont envisageables : transporteur à rouleaux, convoyeur aérien à chaînes ou à arbres et galets, transporteur à rail incorporé au sol. Le choix est lié aux produits à traiter, leur volume, leur type de conditionnement.

L'entrée et la sortie des produits dans la chambre d'ionisation sont assurées par un sas en forme de labyrinthe ou plus rarement par une porte rotative creuse en plomb en forme de croissant. De tels systèmes d'accès rendent possibles l'alimentation et l'évacuation en continu des produits de la cellule. On peut également rencontrer des systèmes d'entrée-sortie comme une porte blindée en plomb munie d'un système de sécurité, qui permettent uniquement une alimentation en discontinu.

4.2.4. Les protections biologiques, la sécurité et le contrôle

Les murs en béton armé de la casemate et du labyrinthe servent de protection biologique pour le personnel amené à évoluer dans l'environnement immédiat de l'installation. Leur épaisseur est dimensionnée suivant la puissance maximale de source que peut renfermer l'ionisateur, et ce, conformément à la législation en matière de radioprotection. Elle avoisine généralement deux mètres.

Toutes les composantes électriques et électromagnétiques de la cellule ont été étudiées et éprouvées pour travailler dans des enceintes présentant un important niveau de radiations et pour garantir une fiabilité et une souplesse d'utilisation optimales.

Toutes les installations sont munies d'un dispositif de descente automatique du porte-source. Celui-ci se met en position de sécurité en fond de piscine dès qu'un incident intervient ou lors de la mise à l'arrêt de l'installation. Les opérations de montée et de descente du porte-source, de contrôle du mouvement des convoyeurs et des fonctions de sécurité sont programmées à partir d'une console située à l'extérieur de la cellule. Il est nécessaire de ventiler les locaux, car le stockage de la source en fond de piscine entraîne, entre autre, la production d'hydrogène par radiolyse de l'eau.

La validation consiste à vérifier la répartition des doses dans les containers de traitement, pour une des installations industrielles et pour un produit déterminé. Elle permet de déterminer les points de plus faible et de plus forte irradiation. Le contrôle de la dose est réalisé au moyen de films PVC déposés en diagonale sur le carton pour un traitement par palette ou au moyen de dosimètres pour un traitement en carton (la bobine de PVC utilisée doit correspondre à la série étalonnée). Après traitement, les films ou les dosimètres sont dissociés du container de traitement (palette ou carton) et introduits dans l'appareil de mesure. La dose est donnée par l'ordinateur et tous les résultats sont imprimés.

4.3. Comparaison des systèmes d'irradiation

	Source de ^{60}Co (γ)	Electrons	
		Rayons X	Electrons accélérés
Energie (MeV)	1,17 et 1,33	< 5	< 10
Pénétration (cm) (épaisseur maxi pour aliment de densité 1)	40	100	< 10
Arrêt	Obturbateur	Coupure du courant	Coupure du courant
Débit	+	++	+++
Procédure administrative	Autorisation nécessaire, procédure lourde	Simple déclaration	Simple déclaration
Durée du traitement	Long (*)	Court (minutes)	Court (secondes)

(*) : d'une dizaine de minutes à plusieurs heures en fonction de l'activité de la source de cobalt

Les deux technologies ne peuvent pas être considérées comme directement concurrentes, compte tenu de leurs caractéristiques spécifiques, de leurs avantages et leurs inconvénients respectifs. Le choix de la technologie à mettre en œuvre, cobalt 60 ou faisceau d'électrons, est très délicat. Il est fonction de facteurs techniques et économiques très imbriqués mais aussi du degré d'incertitude concernant l'évolution future de ces facteurs.

Dans l'absolu, le critère fondamental de choix entre ces deux technologies est la nature des produits à traiter et en particulier leur densité.

En effet, le pouvoir de pénétration des rayonnements est le facteur limitant de leur action. Conséquence directe, un faisceau d'électrons est adapté au traitement des produits peu denses tandis que le rayonnement γ est apte à traiter les produits les plus denses. Les produits pulvérulents présentent une densité de 0,5, les produits alimentaires surgelés une densité de 1. Le débit de dose et l'épaisseur du produit entrent également en jeu.

La dose

Les forts débits des faisceaux d'électrons impliquent des temps de traitement très faibles, donc des temps de transit dans la cellule de traitement de quelques minutes seulement. Cela permet de limiter les coûts en automatisant la manutention. Pour une installation γ , les temps de transit sont de quelques heures.

Donc, les accélérateurs sont intéressants pour le traitement des produits qui craignent un réchauffement mais ne sont pas adaptés aux traitements à très faibles doses.

L'épaisseur du produit

La faible pénétration des électrons implique des conditions géométriques et physiques (densité et homogénéité) beaucoup plus strictes que celles nécessaires dans le cas d'une installation γ .

Un traitement biface est souvent indispensable. Cette propriété a une influence directe sur la présentation du produit : le traitement de chargement sur palette est quasi impossible.

Le procédé à faisceau d'électrons est plus efficace sur les produits de faible épaisseur. Cette technologie est donc moins polyvalente que la technologie γ .

5. REGLEMENTATION DE L'IONISATION DES DENREES ALIMENTAIRES

La réglementation des aliments est fondée sur deux principes :

- La protection et la santé des consommateurs : la réglementation et les contrôles de l'application de celle-ci doivent s'appuyer sur une base scientifique. Le but est de gérer un risque, c'est à dire de le réduire à un niveau acceptable. L'appréciation des risques est une démarche qui doit être menée par des scientifiques en toute indépendance. La gestion des risques appartient pour sa part aux décideurs politiques ;
- La loyauté des transactions commerciales qui implique que les aliments doivent être présentés de manière loyale (respect du consommateur et saine concurrence). Ceci entraîne la nécessité de communiquer aux consommateurs tous les éléments lui permettant de connaître en profondeur les aliments qu'il consomme : leur nature, leur composition et même leur histoire (origine et procédés de production ou de transformation).

5.1. La législation européenne

Le droit d'intervenir des Etats membres de la Communauté en matière de réglementation des aliments est de plus en plus restreint. Les instances communautaires sont intervenues au moyen de deux textes principaux : la Directive cadre n° 99/2 du 22 février 1999 à laquelle s'ajoute une directive d'application n° 99/3 de même date.

Il est important de noter qu'une directive oblige les Etats, si nécessaire, à modifier ou compléter leur réglementation nationale pour la rendre conforme aux dispositions de la directive. L'application de la directive ne peut donc en principe pas être exigée tant que le droit national ne l'a pas transposée.

5.1.1. Directives

Directive cadre 1999/2/CE du Parlement européen et du Conseil relative au rapprochement des législations des États membres sur les denrées et ingrédients alimentaires traités par ionisation.

La directive couvre les aspects généraux et techniques de l'exécution de la transformation, les modalités d'étiquetage des aliments irradiés et les conditions d'autorisation de l'irradiation alimentaire.

Directive de mise en œuvre 1999/3/CE du Parlement européen et du Conseil établissant une liste communautaire de denrées et ingrédients alimentaires traités par ionisation.

À ce jour, la liste de produits pouvant être irradiés sur le territoire de l'Union Européenne (UE) ne contient qu'une seule catégorie d'aliment, à savoir les "herbes aromatiques séchées, épices et condiments végétaux".

La directive cadre précise que :

- L'irradiation des denrées alimentaires n'est autorisée que si :
 - elle est justifiée et nécessaire d'un point de vue technologique,
 - elle ne présente pas de risque pour la santé et est pratiquée conformément aux conditions proposées,
 - elle est bénéfique pour le consommateur,
 - elle n'est pas utilisée pour remplacer des mesures d'hygiène et de santé ou de bonnes pratiques de fabrication ou de culture.



- Toutes les denrées alimentaires traitées par ionisation ou contenant des ingrédients alimentaires ionisés doivent être étiquetées. Le symbole international identifiant les aliments irradiés est le radura (ci-contre).
- Un avis favorable du Comité Scientifique de l'Alimentation Humaine (CSAH)¹⁵ est requis avant de pouvoir mettre un aliment spécifique sur la liste européenne des produits pouvant être irradiés.

En 1986, 1992 et 1998 le Comité Scientifique de l'Alimentation Humaine (CSAM) a émis des avis favorables concernant l'irradiation de fruits, de légumes, de céréales, de bulbes farineux, d'épices et de condiments, de poissons, de coquillages, de viandes fraîches, de volailles, du camembert au lait frais, des cuisses de grenouille, de la gomme arabique, de la caséine et des caséinates, du blanc d'œuf, des flocons de céréales, de la farine de riz et des produits sanguins. Le comité scientifique de l'alimentation humaine a souligné que l'irradiation alimentaire ne peut être utilisée pour couvrir une quelconque lacune dans le traitement des aliments ou masquer leur impropreté à la consommation en tant qu'aliments.

Le 4 avril 2003, le CSAH a émis un avis révisé concernant l'irradiation des aliments. Le CSAH a confirmé sa position antérieure en concluant que seules les doses d'irradiation spécifiques et les classes alimentaires pour lesquelles on dispose d'informations toxicologiques, nutritionnelles, microbiologiques et techniques adéquates peuvent être soutenues.

Les autorisations nationales, relatives aux denrées et ingrédients alimentaires destinés à la consommation humaine pouvant être soumis à un traitement par ionisation au sein des États membres ainsi que les restrictions ou les limitations les concernant, sont maintenues jusqu'au moment où la liste européenne complétée de produits pouvant être irradiés entrera en vigueur.

Les États membres mettront tout en œuvre pour garantir la validation ou la normalisation des méthodes analytiques utilisées en vue de détecter les aliments destinés à la consommation humaine qui ont été traités par irradiation. Le Comité européen de normalisation (CEN) a standardisé un nombre de méthodes analytiques qui ont été développées avec le soutien financier de la Commission européenne.

Les aliments ne peuvent être irradiés que dans des unités agréées pour le traitement par ionisation dans les États membres ou dans des unités agréées dans les pays tiers pour l'irradiation de denrées alimentaires.

L'agrément d'unités dans les États membres est accordé par les autorités nationales compétentes de l'État concerné. Les décisions concernant l'agrément communautaire d'unités dans les pays tiers reposent sur les résultats d'inspections menées par l'Office alimentaire et vétérinaire (OAV) de la Commission européenne.

Les États membres doivent notifier à la Commission les coordonnées de leurs autorités compétentes.

5.1.2. Le nécessaire développement des méthodes de détection

L'innocuité des aliments ionisés est reconnue depuis 1980 par l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S.). Le procédé est utilisé dans plus de quarante pays dans le monde pour assurer une meilleure conservation des aliments mais reste encore interdit dans de nombreux autres. Apporter la preuve de l'ionisation, c'est donc se donner les moyens de contrôler les échanges commerciaux des aliments concernés (lutte contre les fraudes) et

¹⁵ Ce comité traite les questions scientifiques et techniques, concernant la santé des consommateurs et la sûreté alimentaire, relatives à la consommation de produits alimentaires et en particulier les questions relatives à la toxicologie et l'hygiène dans l'ensemble de la chaîne de production alimentaire, à la nutrition et aux applications des technologies agro-alimentaires. Il s'intéresse également aux matériaux qui sont en contact avec les produits alimentaires tels que les emballages.

de valider l'étiquetage des produits traités (contrôle qualité), condition nécessaire à l'information tant des industriels que des consommateurs.

La non spécificité des produits de radiolyse rendait le problème très difficile mais la situation a évolué rapidement ces dernières années. Au début des années 1990, la Commission européenne avait subventionné par le biais du Bureau Communautaire de Référence (BCR) un programme de recherche bisannuel pour l'élaboration et la validation des méthodes de détection des denrées alimentaires traitées par ionisation. Au cours de ce programme, une série de méthodes efficaces fut développée.

En 1993, la Commission européenne a mandaté le Comité Européen de Normalisation (CEN) pour standardiser ces méthodes.

Ces normes européennes ont été adoptées par la Commission du Codex Alimentarius¹⁶ comme méthodes générales et sont reprises dans la 'Norme Générale Codex pour les Aliments Irradiés'.

5.2. La situation réglementaire en France

5.2.1. Historique

Le fondement juridique de la réglementation est la loi du 1^{er} août 1905 sur les fraudes et falsifications en matière de produits et de service. Son article 11 prescrit notamment qu'un décret en Conseil d'Etat pourra définir les traitements licites applicables aux marchandises.

Pendant la période 1954-1959, on se trouve tout d'abord devant un vide juridique. Il a été comblé par la décision de se référer à l'article 5235 du Code Français de la Santé Publique et la fixation du processus de reconnaissance confié au CNERNA (Centre national d'études et de recommandations sur la nutrition et l'alimentation).

En 1960, un document intitulé "Renseignements à Fournir à l'appui d'une demande d'autorisation en vue du traitement des matières alimentaires par les rayonnements ionisants", est établi.

En 1962 la première demande d'autorisation est déposée par CONSERVATOME : elle concerne le traitement des pommes de terre. A partir du décret du 8 mai 1970¹⁷ qui constitue la reconnaissance officielle du procédé, les demandes d'autorisations se succèdent.

Ce décret pose les principes suivants :

- l'irradiation doit avoir lieu dans les conditions et limites déterminées par un arrêté. Il s'agit d'un système de "liste positive" (liste de denrées autorisées).
- l'irradiation doit avoir été effectuée par des rayonnements non susceptibles de créer une radioactivité induite dans le produit. Trois types de sources sont autorisées : le cobalt 60, le césium 137 et le faisceau d'électrons.
- les denrées traitées doivent porter un étiquetage indiquant le traitement ionisant.
- les mesures de surveillance pendant et après le traitement sont déterminées par l'arrêté.

¹⁶ La Commission du Codex Alimentarius a été créée en 1963 par la FAO (Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture) et l'OMS (Organisation mondiale de la santé) afin d'élaborer des normes alimentaires, des lignes directrices et d'autres textes, tels que des Codes d'usages, dans le cadre du Programme mixte FAO/OMS sur les normes alimentaires. Les

¹⁷ Décret portant règlement d'administration publique pour l'application de la loi du 1^{er} août 1905 sur la répression des fraudes en ce qui concerne le commerce des marchandises irradiées susceptibles de servir à l'alimentation de l'homme et des animaux.

Il a institué également une procédure d'autorisation au cas par cas, qui suppose le dépôt préalable d'un dossier complet présenté par le demandeur à la DGCCRF (Direction générale de la consommation, de la concurrence et de la répression des fraudes).

Depuis le 26 juillet 1993 les différentes lois de bases applicables aux aliments ont été regroupées dans le Code de la Consommation. Ce code prévoit que peuvent être adoptés, lorsque c'est nécessaire, des textes d'application (décrets et arrêtés définissant les pratiques autorisées et les règles d'étiquetage à respecter).

5.2.2. Les textes réglementaires

Jusqu'au mois de mai 1997, 20 arrêtés ont été pris dont 3 seulement avant 1982 : 10 concernant des produits végétaux, 9 des produits d'origine animale, 8 des produits secs, 1 des matériaux au contact d'aliments, 1 les aliments d'animaux de laboratoire, 1 des fromages.

Les arrêtés définissaient très strictement les conditions d'utilisation des traitements ionisants pour un produit précis dont :

- le champ d'application,
- les doses d'irradiation,
- l'étiquetage,
- les modalités de contrôle,
- les caractéristiques de la matière première, en particulier sa qualité microbiologique initiale.

Depuis 1999 et la publication des directives européennes, l'architecture réglementaire a été simplifiée

6. CONCLUSION

Sur le plan scientifique, la recherche fondamentale sur l'irradiation agroalimentaire n'est plus à faire. Il est seulement nécessaire que la recherche se tourne vers des études de recherche et de développement pour adapter le procédé, notamment aux pays du tiers-monde. Le problème dans les pays développés est essentiellement socioculturel (qui ne se pose d'ailleurs pratiquement pas pour les médicaments).

Du point de vue économique, les investissements liés à une installation d'ionisation restent très lourds. Néanmoins, leur capacité de traitement permet d'obtenir un coût limité pour le traitement de produits dans le domaine de l'agro-alimentaire (inférieur à un euro).

Au niveau des circuits de distribution, de nombreux industriels ou distributeurs hésitent à mettre sur le marché des produits étiquetés "traités par rayonnements ionisants" ou "ionisés" par la "peur de la réaction du consommateur". Ils en arrivent même à utiliser (ou réutiliser) des traitements de fumigation (interdits et dont la toxicité est prouvée) à la place du traitement ionisant, dont la non toxicité est elle aussi démontrée.

Le public reste trop peu informé sur l'ionisation, ce qui peu laisser libre court à de nombreux fantasmes. Le consommateur ne peut choisir lui-même puisque le procédé n'est que très peu appliqué. De plus la législation drastique s'appliquant particulièrement à cette technique n'a pas favorisé son développement. En particulier, il a fallu onze ans avant que la directive européenne, spécifique à l'ionisation des aliments, ne voie le jour. La liste des produits autorisés au niveau européen n'est toujours pas définie à ce jour, même si les techniques de détection des aliments ionisés sont au point. Les secteurs de l'ionisation et de la recherche sont favorables à l'ionisation, les organisations de consommateurs sont plus méfiantes et donc la plupart des producteurs et des distributeurs de denrées alimentaires s'opposent à l'inclusion de leur produit dans la liste positive par crainte d'une réaction négative des consommateurs.

Toutefois, les pathologies issues d'intoxication alimentaires préoccupent de plus en plus les autorités sanitaires nationales ou internationales. L'innocuité des aliments ionisés, sans limite de dose, vient tout récemment d'être reconnue par les instances internationales. Au niveau mondial, ce procédé commence à se développer, particulièrement aux États-Unis. De plus, depuis les années 1960, chaque fois qu'un pays a modifié sa législation sur l'irradiation des aliments, cela s'est toujours fait dans le sens du développement du procédé. La dernière autorisation étant celle donnée par la Nouvelle Zélande et l'Australie pour la radio-débactérisation des épices et des plantes à infusion. Avec l'ouverture accrue des frontières aux échanges commerciaux, ceci constitue l'occasion d'un nouvel élan pour l'ionisation. Les prochaines années diront si l'ionisation se positionne en réponse adaptée aux besoins des industries agroalimentaires. Peut-être en abordant la question de l'ionisation des aliments sous un autre angle : y a-t-il un risque à consommer des aliments non ionisés ? Si on se réfère au nombre d'intoxications alimentaires (76 millions de cas ayant entraîné 325000 hospitalisations et 5000 décès en 1998 rien qu'aux USA), on comprend aisément pourquoi les USA ont récemment décidé d'autoriser le traitement de viandes rouges (1997).

Denrées pouvant être traitées par ionisation et doses maximales d'ionisation en France

Denrées et ingrédients alimentaires autorisés au traitement conformément à l'article 4, paragraphe 6, de la directive 99/2/CE

CATÉGORIE DE DENRÉES	DOSE GLOBALE moyenne absorbée (kGy) (valeur maximale)
Herbes aromatiques surgelées	10
Oignons, aulx, échalotes	0,075
Légumes et fruits secs	1
Flocons et germes de céréales destinés aux produits laitiers	10
Farine de riz	4
Gomme arabique	3
Viandes de volailles	5
Viandes de volailles séparées mécaniquement	5
Abats de volailles	5
Cuisses de grenouilles congelées	5
Sang animal, plasma et cruor déshydratés	10
Crevettes surgelées ou congelées, décortiquées ou étêtées	5
Blanc d'œuf liquide, déshydraté ou congelé	3
Caséine, caséinates	6

CATÉGORIE DE DENRÉES	DOSE GLOBALE moyenne absorbée (kGy) (valeur maximale)
Aliments pour animaux de laboratoire	60
Colostrum bovin pour l'alimentation des veaux	10

Denrées et ingrédients alimentaires autorisés au traitement conformément à l'annexe de la directive 99/3/CE

CATÉGORIE DE DENRÉES	DOSE GLOBALE moyenne absorbée (kGy) (valeur maximale)
Herbes aromatiques séchées, épices et condiments végétaux	10

Quantités de denrées alimentaires irradiées en France en 2002

Denrées alimentaires	Quantité [t]	Dose globale moyenne absorbée (kGy)
Épices, herbes aromatiques, légumes secs	1265	10
Herbes aromatiques surgelées	10	10
Fruits séchés	14	1
Gomme arabique	146	3
Viandes de poulet séparées mécaniquement, viande et abats de poulet	2812	5
Cuisses de grenouilles congelées	882	5
Total	5129	