



HAL
open science

Ionizing radiation as a food preservation method: state of the art

Michel M. Federighi

► **To cite this version:**

Michel M. Federighi. Ionizing radiation as a food preservation method: state of the art. *Revue de Médecine Vétérinaire*, 2019, 170 (4-6), pp.58-72. hal-02620585

HAL Id: hal-02620585

<https://hal.inrae.fr/hal-02620585v1>

Submitted on 28 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les rayonnements ionisants comme méthode de préservation des aliments : état de l'art

M. FEDERIGHI

Oniris, Unité Hygiène & Qualité des Aliments, La Chantrerie, Route de Gachet, CS 40706, 44307 Nantes cedex 03, France

* Auteur chargé de la correspondance : michel.federighi@oniris-nantes.fr

RÉSUMÉ

La conservation de la nourriture a toujours été une préoccupation importante pour l'Homme. Des méthodes le permettant sont régulièrement apparues au cours des siècles, parmi lesquelles l'ionisation. L'ionisation des aliments consiste à exposer les denrées alimentaires à un rayonnement d'énergie suffisante pour y créer des ions. L'effet de ces derniers sur les agents biologiques présents dans les denrées permet généralement de prolonger la durée de vie des aliments et d'améliorer la sécurité microbiologique de ceux-ci. La nature et les propriétés des rayonnements utilisés sont évidemment à l'origine des effets escomptés, mais également d'une large controverse sociétale et d'une réglementation spécifique. Cette synthèse bibliographique se propose de faire le point sur cette méthode de préservation des aliments sur le plan de la nature des rayonnements utilisés, de leurs effets sur les micro-organismes et des applications de cette technique.

Mots-clés : Aliments, rayonnements ionisants, méthode, préservation, micro-organisme

SUMMARY

Ionizing radiation as a food preservation method : state of the art.

The conservation of food has always been a major concern for humans. Methods allowing it have appeared regularly over the centuries, including ionization. Ionization of food consists of exposing foodstuffs to radiation of sufficient energy to create ions. The effect of these on the biological agents present in the foodstuffs generally makes it possible to prolong the life of the foodstuffs and to improve the microbiological safety of these. The nature and the properties of the radiation used are obviously at the origin of the expected effects, but also of a wide societal controversy and a specific regulation. This bibliographical summary aims to take stock of this method of preserving foods in terms of the nature of the radiation used, their effects on micro-organisms and applications of this technique.

Keywords: Foods, ionizing radiation, method, preservation, micro-organism

Introduction

Depuis la fin des années soixante, la stérilisation des articles médicaux à usage unique constituait l'application majeure des traitements par rayonnements ionisants, puis sont venus des applications concernant l'amélioration des propriétés des matériaux, réticulation des plastiques et des câbles, vulcanisation du caoutchouc, greffage de polymères, ... à très fortes doses (de 40 à 100 kGy, Cf. *infra*). Concomitamment, les Industries Agro-Alimentaires (IAA) se sont intéressées à ce procédé qui leur semblait pouvoir présenter certains avantages comparativement aux traitements thermiques, alors en plein développement. Elles eurent alors l'idée d'utiliser des rayonnements ionisants sur diverses denrées alimentaires afin d'en améliorer la sécurité microbiologique et/ou d'en prolonger la durée de vie. L'ionisation des aliments devint alors une réalité dont il a fallu construire au cours des années le cadre réglementaire et scientifique. En particulier, l'effet des rayonnements sur les agents microbiologiques et l'éventuelle toxicité des molécules radio-induites ont fait l'objet de nombreux travaux [32]. Ces travaux ont accompagné le développement, finalement modeste, de ce procédé dont, par exemple et régulièrement, on re-découvre l'existence à la faveur des différentes crises sanitaires liées aux dangers biologiques transmis par les

aliments. Même modeste, le développement de ce procédé dans certaines parties du monde est réel et la globalisation des échanges peut amener certains aliments (ou ingrédients) ionisés sur n'importe quel territoire. Il apparaît donc utile de faire la synthèse de l'état des connaissances nécessaires à la compréhension du procédé et de ses effets sur les agents biologiques.

Définitions – Nature & propriétés des rayonnements utilisés

Les rayonnements ionisants sont des rayonnements électromagnétiques ou corpusculaires dont l'énergie est suffisante pour arracher un électron à une structure atomique ou moléculaire. Dans le domaine des IAA, les rayonnements les plus étudiés et/ou usités sont les rayons α (alpha) et β (bêta) pour ceux corpusculaires, et les rayons γ (gamma) et X pour ceux électromagnétiques.

L'ionisation des aliments consiste donc à exposer des aliments à l'action de rayonnements ionisants appropriés afin d'en améliorer leurs qualités hygiéniques. Le terme d'irradiation est quelquefois utilisé, mais souvent de manière inexacte. En effet, une radiation est toujours très précise et mono-énergétique, les rayonnements ionisants sont poly-

énergétiques, ils correspondent à une juxtaposition de radiations, en quelque sorte. Comme nous venons de le voir, les rayonnements utilisés dans le domaine de l'ionisation sont de deux natures différentes :

- les rayonnements corpusculaires (rayonnements β ou faisceaux d'électrons). Les rayons α ne sont pas utilisés dans les IAA.

- les rayonnements électromagnétiques (X ou γ). Les rayons X sont principalement utilisés pour détecter des corps étrangers dans les aliments, les rayons gamma sont utilisés en radioconservation.

L'énergie des rayonnements utilisables dans l'industrie est limitée à 5 MeV pour le rayonnement électromagnétique et à 10 MeV pour les faisceaux d'électrons (1 MeV = $1,6 \cdot 10^{-13}$ joule). Compte-tenu de leur nature et de ces limitations en énergie, ces rayonnements ne peuvent perturber les noyaux de l'atome et de ce fait, en aucun cas, induire dans la matière ionisée, le phénomène de radioactivité. Il est admis que pour les faisceaux d'électrons, le trajet des rayonnements dans le produit est prévisible et on l'estime en moyenne à 3,5 cm/densité du produit pour une énergie de 10 MeV. On s'accorde pour dire que ces traitements sont plutôt réservés à des produits homogènes et de faible épaisseur, pour lesquels on effectue des traitements « double-face » par retournement du produit entre deux passages. De tels traitements permettent de s'assurer que le centre du produit a reçu la dose voulue. Pour les rayons γ le trajet moyen, bien que peu prévisible, est estimé à 12 cm/densité du produit pour une énergie de 5 MeV. Pour être sûr de traiter la totalité du volume, les traitements se font tous en « multi-face » dans des installations spécialisées.

Mode d'obtention et mode d'action des rayonnements β et γ

Bien qu'il y ait une différence fondamentale entre le mode d'obtention des rayonnements β , issus d'un accélérateurs d'électrons, et celui des rayonnements γ , issus de la désintégration d'une source radioactive, nous verrons que le mode d'action est identique, ainsi que la perception du traitement par l'opinion.

LES ACCÉLÉRATEURS D'ÉLECTRONS

Les accélérateurs d'électrons sont des machines électriques permettant d'obtenir un flux d'électrons dont les caractéristiques en termes d'énergie, d'intensité et de géométrie sont maîtrisées. Les principes d'accélération sont variés mais les organes principaux de ces machines restent toujours les mêmes : une source d'électrons (cathode), un tube accélérateur et un système de mise en forme du faisceau. Pour décrire ces machines, l'analogie avec le principe des anciens systèmes de télévisions dites « à tube cathodique » est très souvent faite, à juste titre. Très schématiquement, une cathode (en tungstène par exemple) est excitée électriquement et va émettre des électrons qui seront repris et soumis à une différence de potentiel dans un canon à

électrons [9]. Les électrons sont ainsi accélérés à une énergie proportionnelle à la tension utilisée, puis mis en forme pour constituer un faisceau qui sera dirigé vers le produit à traiter. Généralement, les produits à traiter défilent sous le faisceau grâce à un système de convoyage adapté aux principes de radioprotection. Lorsque l'excitation électrique de la cathode cesse, il est bien évident que le flux d'électrons cesse également. Ce fonctionnement on/off peut permettre l'installation de ces équipements dans des usines de production, l'émission de rayonnements n'étant pas permanente [9].

LES SOURCES DE RAYONNEMENT γ

Les installations industrielles utilisent principalement le rayonnement généré par le Cobalt 60 (^{60}Co). Le Cobalt 60 est un radionucléide artificiel produit dans des réacteurs nucléaires à partir du Cobalt 59, métal stable non radioactif. Le Cobalt 60 radioactif émet un rayonnement β^- puis, en cascade, 2 photons γ d'énergie 1,17 et 1,33 MeV. La période radioactive est de 5,27 ans (temps au bout duquel la quantité de rayonnement émise diminue de moitié). La mise en oeuvre des traitements aux rayons γ se base sur l'exposition du produit, pendant un temps donné, aux rayonnements émis par la source radioactive. Il est à noter que l'on peut également avoir recours au Césium 137 pour ces traitements [17].

Le Cobalt 60 utilisé dans les installations industrielles est constitué de barreaux de quelques mm de diamètre empilés sur quelques dizaines de cm dans une double enveloppe en acier inoxydable. Ces sources sont positionnées dans des porte-sources de géométrie variable (plane, cylindrique, carrée, ...) en fonction du type d'installation.

L'activité globale mise en oeuvre dans les installations industrielles varie de quelques centaines de milliers à quelques millions de curies. Un curie (Ci) équivaut à $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq (Becquerel) = 1 Bq = 1 désintégration par seconde. Il faut noter qu'à ce niveau d'activité, une installation de traitement aux rayons γ est considérée comme une Installation Nucléaire de Base (INB). En position de stockage, la source est plongée dans la plupart des cas dans une piscine remplie d'eau de grande profondeur (8 mètres environ). Protégé par cet écran d'eau, le personnel peut intervenir dans la cellule d'irradiation [17]. L'entrée et la sortie des produits à traiter sont assurées par un système de convoyage à travers un sas en forme de labyrinthe adapté aux contraintes de radioprotection, soit plus simplement par une porte blindée permettant une alimentation en discontinu (par lot de traitement). De façon générale, les stations d'ionisation au Cobalt 60 sont mises en oeuvre par des sociétés de traitement à façon et sont généralement beaucoup plus répandues que les accélérateurs d'électrons. A titre d'exemple, en Chine en 2009, on recensait 103 installations au cobalt 60 pour 6 accélérateurs d'électrons [23].

Effets sur les micro-organismes

MODE D'ACTION DES RAYONNEMENTS

Il est important de retenir que quel que soit le type de rayonnements (β ou γ) le mode d'action sur les cellules est le même : il s'agit de l'ionisation. Les différents processus d'interaction de ces rayonnements avec la matière conduisent, tout au long de leur trajet, à la libération d'électrons ayant une certaine énergie cinétique (électrons secondaires). La perte de l'énergie cinétique de ces électrons dans le produit entraîne localement l'ionisation et l'excitation de la matière traversée par les rayonnements. L'absorption de cette énergie par la matière se traduit par des effets physico-chimiques directs auxquels se rajoutent des effets indirects en cas de présence d'eau dans le milieu. De plus, la rupture des liaisons covalentes engageant des électrons éjectés aboutira à la formation de produits de radiolyse (radicaux libres) dont la nature est indépendante du type de rayonnement (β ou γ). Il est à noter, et c'est important, que les radicaux libres formés ont, le plus souvent, une très faible durée de vie et, sauf exceptions, ne peuvent pas servir d'indicateurs du traitement, en cas d'analyse. Leur quantité dépendra de la dose de rayonnement absorbée et du degré d'hydratation du produit. Dans certains cas, comme pour des produits secs ou avec os, certains radicaux libres auront une longue durée de vie et ne se recombieront pas immédiatement après leur formation. Leur recombinaison dépendra de la réhydratation du produit, comme pendant la mastication ou après l'ingestion. Les produits stables radio-induits dans les os comme les 2-alkylcyclobutanones constituent un des exemples de molécules traces des traitements ionisants de viandes de poulets avec os [28].

Les aliments exposés étant, le plus souvent, fortement hydratés, ce sont essentiellement les produits de la radiolyse de l'eau de constitution des denrées qui, malgré leur caractère très transitoire, seront à l'origine des effets d'inactivation des micro-organismes.

Par conséquent, il est admis depuis longtemps que le mode d'action des rayonnements ionisants consiste en une

dénaturation plus ou moins prononcée du matériel cellulaire. Il est tout aussi consensuel d'affirmer que le matériel nucléaire (ADN, ARN) reste la cible privilégiée, même s'il n'est pas irraisonnable de dire que le mode d'action puisse être multi-cibles. On s'accorde aussi pour indiquer que, sans mésestimer l'effet direct sur les cibles des électrons accélérés (β) ou des rayons γ , l'effet indirect, radiochimique, est l'effet principal. Cet effet radiochimique est dû, comme vu plus haut, aux radicaux libres formés qui vont, majoritairement, endommager les acides nucléiques mais également d'autres matériel ou compartiment cellulaires (membranes, enzymes-clés...). C'est le plus souvent le radical hydroxyle OH° qui est désigné comme l'un des principaux responsables compte-tenu que, du fait de son très fort pouvoir oxydant, il modifie, le plus souvent de manière irréversible, les molécules biologiques à proximité immédiate du site où il a été produit [19]. D'autres entités très réactives sont formées lors de la radiolyse de l'eau et jouent également un rôle important, on peut citer : H_3O^+ , H° , e^- hydraté (l'électron hydraté) [9].

UNITÉS DU SYSTÈME INTERNATIONAL (S.I.)

L'inactivation des microorganismes par les rayonnements ionisants dépend étroitement de la dose appliquée. La cinétique de survie est, comme nous le verrons ci-après, de type exponentiel, le logarithme du nombre de survivants N diminuant linéairement en fonction de la dose. L'unité pour décrire la dose absorbée par l'aliment (c'est-à-dire la quantité d'énergie par unité de masse exposée) est le Gray (Gy). Les équivalences suivantes sont admises : $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rads} = 1 \text{ joule/kg}$.

La figure 1 positionne les différentes cibles potentielles des traitements en fonction de la dose (pour rappel la Dose Létale (DL) pour l'homme est de 10 Gy).

Les virus à ADN simple et de petite taille comptent parmi les organismes les plus résistants à l'ionisation (figure 1). Viennent ensuite les spores bactériennes ou de moisissures, au cytoplasme peu hydraté, puis les cellules végétatives de bactéries, les moisissures et levures sur une plage de doses relativement étendue. Pour affecter les fonctions vitales des

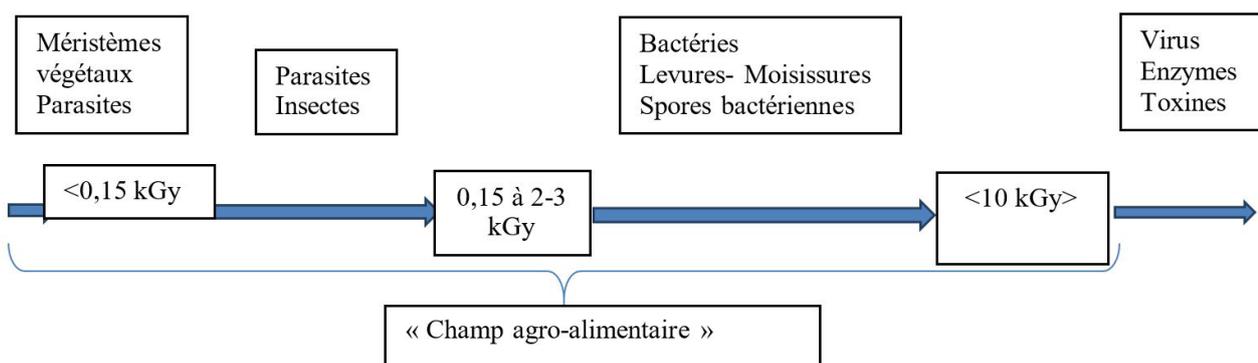


FIGURE 1 : Positionnement des principales cibles des traitements sur une gamme de doses de rayonnements ionisants.

insectes, les doses requises seront moins importantes. Les parasites et germes (de bulbes et tubercules par exemple) sont d'autant plus sensibles aux rayonnements ionisants, l'extrême de l'échelle pouvant être occupé par l'homme à l'ADN beaucoup plus complexe et au cytoplasme cellulaire très hydraté.

LOI DE RADIOBACTÉRIOLOGIE

Les rayonnements ionisants vont donc avoir des effets létaux pour les micro-organismes. Leur destruction va répondre à certaines conditions générales qui seront à moduler en fonction de divers facteurs de variations extrinsèques, intrinsèques, protecteurs ou favorisants. Les conditions générales obéissent à une loi mathématique régit par l'équation : $N = N_0 \cdot e^{-k \cdot \text{dose}}$. Cette équation nous rappelle évidemment celle, plus connue en thermobactériologie,

$$N = N_0 \cdot e^{-kt} \text{ (ou } N = N_0 \cdot 10^{-t/D} \text{ en logarithme) [5].}$$

Il existe donc comme le montre cette équation une équivalence entre le concept temps/température propre aux traitements thermiques et la notion de dose absorbée pour les rayonnements. Cette équation nous apprend donc :

- Que le nombre de micro-organismes détruit dépend du nombre initial (N_0) ;
- Qu'à chaque dose de rayonnements ionisants équivalente, il existe une proportion identique de population microbienne détruite (effet cumulatif) ;

- Qu'en vertu de la loi exponentielle on ne peut atteindre le zéro.

L'analogie avec les traitements thermiques a été poussée jusqu'à la définition, pour différents microorganismes, d'une Dose de Réduction Décimale (DRD également appelée D10) équivalente à la valeur D (temps de réduction décimale) utilisée en thermobactériologie [9]. On parlera pour un microorganisme donné de D10 ou DRD (Dose de Réduction Décimale), dose correspondant à l'inactivation de 90 % des microorganismes initialement présents. S'agissant d'une dose, la DRD ou D10 sera exprimée en Gray (Gy) et pourra être représentée schématiquement comme dans la figure 2 ci-dessous, il s'agira de l'inverse de la pente de la droite de survie.

Dans le cas de la figure 2 la DRD de la souche A est de 200 Gy, dose nécessaire pour l'abattement d'un Log. La souche B doit être considérée comme plus radiorésistante car la dose nécessaire pour abattre un Log de cette souche peut être grossièrement estimée à 300 Gy, donc supérieure à celle de la souche A (figure 2).

Cependant, de nombreux facteurs vont influencer sur cette D10 ou DRD, facteurs qu'il est nécessaire de connaître afin de mieux maîtriser le traitement et son résultat sur les populations microbiennes.

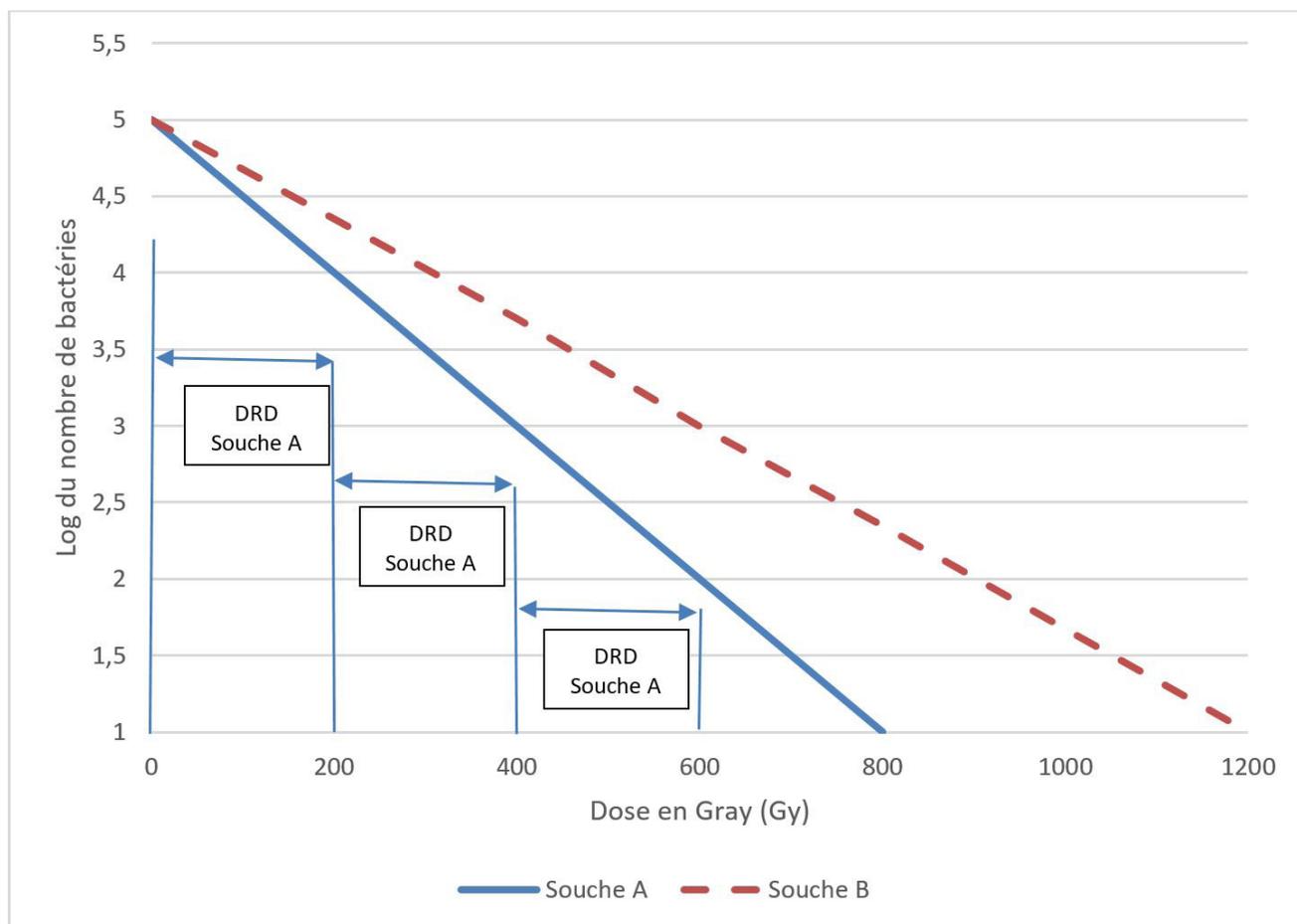


FIGURE 2 : Droites de survie de deux populations bactériennes (souches A & B) par rayonnements ionisants

Facteurs intrinsèques influençant les cinétiques de destruction des micro-organismes par rayonnements ionisants

INFLUENCE DE LA NATURE DU MICROORGANISME

La DRD dépend d'abord de la nature du microorganisme en question. En général, les bactéries sont plus radiosensibles que les virus par exemple comme vu dans la figure 1. Il est usuel de dire que la radiosensibilité est inversement proportionnelle au degré d'organisation/complexité de l'organisme (Cf. DL de l'Homme (10 Gy) versus DRD des virus (> 10 kGy)).

Les radiosensibilités varient énormément d'une bactérie à l'autre, en général avec des DRD d'environ 0,01 à 1 kGy pour les formes végétatives. Notons qu'il existe certaines bactéries pourtant non sporulantes telles que *Deinococcus radiodurans*, *Deinococcus radiophilus* et *Moraxella* sp. qui présentent la particularité d'être très résistantes à l'ionisation (DRD de 2 à 8 kGy). L'explication donnée pour ces résistances dans les années 80 et 90 était que ces espèces possédaient un(des) système(s) de réparation des lésions radioinduites de l'ADN particulièrement efficace(s) [9]. Dans les années 2000, d'intéressants travaux ont mis l'accent sur le rôle joué par le ratio des concentrations intracellulaires Mn/Fe. Les modèles étudiés étaient *Shewanella odeinensis* (riche en fer, pauvre en manganèse) radiosensible (DRD 70 Gy) et *Deinococcus radiodurans* (riche en manganèse, pauvre en fer) dont 10% de la population peut résister à 12 000 Gy. Il a ainsi été montré une très forte corrélation entre radiorésistance et ratio Mn/Fe élevé (Tableau I). Selon Ghosal et al. (2005) les ions manganèse (Mn(II)) accumulés dans les bactéries servent d'antioxydants, renforçant les systèmes enzymatiques de défense contre le stress oxydant [16].

Le microorganisme (hors virus) le plus radiorésistant, et d'intérêt en hygiène microbiologique des aliments, est *Clostridium botulinum* sous forme de spores (DRD de 1 à 3,3 kGy). D'une manière générale les spores bactériennes sont plus radiorésistantes que les formes végétatives. Notons également qu'il n'y a pas de correspondance directe entre résistance à la chaleur et résistance aux rayonnements ionisants. Ainsi,

Moraxella sp., très radiorésistant, est facilement détruit par la chaleur alors que *Bacillus stearothermophilus*, très résistant à la chaleur, est beaucoup plus sensible aux rayonnements ionisants. De ce fait, les combinaisons de traitement chaleur-ionisation peuvent être envisagées dans certains cas. Enfin, il a été constaté au laboratoire, qu'à l'instar d'autres traitements physiques de conservation, les cellules en phase exponentielle de croissance sont plus sensibles aux rayonnements ionisants que pour les populations microbiennes en latence ou en phase stationnaire [9]. Nonobstant, il a également été montré qu'un stress préparant comme la privation nutritionnelle par exemple (« starved cells ») pouvaient permettre une augmentation de la DRD d'une souche, toutes choses étant égales par ailleurs. Ainsi, Mendonca et al. (2004) ont comparé les valeurs DRD de *Listeria monocytogenes* scottA en phase exponentielle, stationnaire et après un stress de 12 jours en solution saline. Ils ont montré que la DRD pour les cellules stressées était significativement supérieure à celle des cellules en phase stationnaire, elle-même supérieure à celle des cellules en phase exponentielle (0,21 contre 0,09 et 0,07 kGy, respectivement, et en tampon phosphate). Le changement de milieu de traitement (viande de porc au lieu de tampon phosphate) n'a pas d'influence sur le classement des DRD qui deviennent alors 0,66, 0,42 et 0,35 kGy [26]. De même Buchanan et al. (2004) mettent en évidence chez *E. coli* O157:H7 une augmentation (1,2 à 3,3 fois) de la DRD de 7 souches ayant été pré-adaptées à un stress acide (plusieurs acides organiques testés) [3]. L'influence du milieu de traitement sur le résultat d'abattement microbien par un procédé physique n'est pas propre aux rayonnements ionisants puisque cet effet existe également pour les traitements thermiques ou par hautes pressions par exemple [5, 15]. La connaissance des effets des facteurs extrinsèques est absolument nécessaire pour ajuster le traitement. A ce titre, les travaux faits sur *Cronobacter sakazakii* dans les années 2000 sont intéressants. Ce micro-organisme (ex *Enterobacter sakazakii*) qui a posé d'importants problèmes dans les préparations lactées en poudre semble pouvoir être maîtrisé par des traitements ionisants pour Lee et al. (2007) et Osaili et al. (2007) [25, 30]. Selon Lee et al. (2007) [25] la valeur DRD de *E. sakazakii* dans une formulation infantile déshydratée est de 0,76 kGy, alors qu'elle est de 1,71 kGy dans une formulation de lait infantile déshydraté pour Osaili et al. (2007) [30]. Hong et al., en 2008, annoncent une valeur DRD pour *E. Sakazakii* de 4,83 kGy pour un aliment de sevrage

Souche	Taille du génome (Mb)	Nb de cytochromes C	Ratio Mn/Fe intracellulaire	DRD (kGy)
<i>Deinococcus radiodurans</i>	3,28	7	0,24	10-12
<i>Deinococcus geothermalis</i>	3,23	7	0,46	10
<i>Escherichia coli</i>	4,64	6	0,007	0,7
<i>Pseudomonas putida</i>	6,18	17	<0,001	0,25
<i>Shewanella odeinensis</i>	5,13	39	<0,001	0,07

TABLEAU I : relations entre le nombre de cytochrome-c, le ratio Mn/Fe et la radiorésistance de différentes souches bactériennes d'après [8].

déshydraté riche en farine de riz [21]. Ils expliquent cette forte différence par la formulation très différente de leur produit ainsi que sa composition, très riche en anti-oxydants, notamment en manganèse et le traitement par électrons accélérés contrairement aux deux autres études réalisées par rayonnement gamma [21].

INFLUENCE DES MILIEUX DE TRAITEMENT ET DE DÉNOMBREMENT

Pour la plupart des traitements physiques de préservation, il est assez fréquent de constater un écart entre le résultat d'abattement obtenu en matrice alimentaire et celui, déduit ou prédit plus important, sur la base de valeur DRD obtenue en milieux de laboratoire. On parle le plus souvent d'un « effet protecteur » de l'aliment. Les traitements ionisants n'échappent pas à cette règle, la nature du milieu de traitement, que ce soit par sa composition ou son état physique, influe sur la dose nécessaire pour abattre un Log, comparativement à celle nécessaire pour obtenir le même résultat en milieux de laboratoire (Tableau II).

Les exemples d'« effet protecteur » de l'aliment sont très nombreux et pour tous les types de micro-organismes, il faudra évidemment en tenir compte dans le choix de la dose à appliquer lors d'un traitement industriel, selon l'objectif poursuivi. Le choix de la méthode culturale et le moment de son utilisation pour le dénombrement des micro-organismes post-traitement sont également très importants. En effet, en général, l'utilisation d'un milieu de dénombrement sélectif riche en antibiotiques par exemple, donne des valeurs de D10 plus faibles qu'en milieu semi-sélectif ou non sélectif (Tableau III). Dans un milieu trop sélectif, les mécanismes

de réparation seraient inhibés et/ou retardés, le résultat étant un rétablissement plus lent des bactéries stressées par l'ionisation et donc un dénombrement plus faible de bactéries en ce milieu. Ce raisonnement s'applique d'ailleurs à tout autre stress subi par une bactérie (chaleur, froid, acides, ...).

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE ET DE LA TENEUR EN EAU LIBRE DU MILIEU DE TRAITEMENT

Nous avons vu, d'une part, que l'on pouvait combiner, ou plus exactement faire succéder, des traitements thermiques (à température létale pour les micro-organismes) et des traitements ionisants pour amplifier les effets assainissant. L'idée étant de cumuler les effets des traitements effectués à des niveaux sub-optimaux afin de limiter les effets néfastes sur les qualités organoleptiques du produit. De fait, Grant et Patterson (1995) ont montré sur *L. monocytogenes* qu'une pré-irradiation à 0,8 kGy la valeur D de cette bactérie à 60, 65 et 70°C qui passe, respectivement, de 90 à 44s, de 40 à 15s et de 23 à 6s [18]. On peut également, d'autre part, jouer sur l'état physique du milieu de traitement. Ainsi, il est connu que les microorganismes résistent mieux dans un milieu congelé que dans un milieu à température ambiante, ou encore dans un milieu sec que dans un milieu riche en eau (Tableau IV).

Cet effet de l'eau se retrouve également pour les milieux à faible Aw, pour lesquels une dose supérieure de rayonnements ionisants est exigée pour obtenir le même abattement, comparativement à un milieu à Aw élevée [9].

Pour le déparasitage des viandes, on va pouvoir ainsi véritablement combiner les effets antiparasitaires de la congélation et des rayonnements ionisants, pour les produits

Milieu	Moëlle osseuse	Corned beef	Œuf entier	Viande	Poudre de kaolin	Tampon phosphate
DRD	0,91	0,8	0,632	0,558	0,21	0,208

TABLEAU II : valeurs DRD (en kGy) de *Salmonella* Typhimurium obtenues dans différentes matrices alimentaires d'après [9].

Milieu de dénombrement	Milieu de traitement	
	Tampon phosphate	Viande de poulet
Gélose sélective pour <i>Listeria</i>	0,324	0,424
Gélose TSLA (Tryptone Soja Levure Agar)	0,404	0,481

TABLEAU III : valeurs DRD (en kGy) de *Listeria monocytogenes* obtenues dans différents milieux de traitement et de dénombrement d'après [9].

Milieu d'ionisation	Valeurs DRD (en kGy)	
	à température ambiante	à l'état congelé (-15°C)
Tampon phosphate	0,208	0,391
Viande	0,558	0,963
Noix de coco déshydratée	1,58	-

TABLEAU IV : valeurs DRD (en kGy) de *Salmonella* Typhimurium pour différents milieux de traitement et à différentes températures d'après [9].

autorisés à l'ionisation. Il est à noter également que le traitement de produits congelés est recommandé pour les doses élevées, les effets néfastes du traitement (apparition de saveurs désagréables pour certaines catégories de produits, modifications de la texture et de la couleur) étant moins prononcés que lors d'un traitement à température ambiante [10]. Cela a été bien démontré par Niemira et al. (2005) sur la couleur du brocoli [29]. Par surcroît, ces auteurs ont mis en évidence une augmentation significative de la valeur DRD de *L. monocytogenes* traité dans du brocoli à -20°C ou à -5°C (0,76 et 0,5 kGy respectivement).

INFLUENCE DE L'ATMOSPHÈRE AU MOMENT DE L'IONISATION

La présence d'oxygène au moment du traitement serait connue comme ayant un effet potentialisateur de l'effet létal de l'ionisation. Cependant, ce n'est pas toujours vérifié, un traitement sous vide peut amener à des valeurs D10 plus faibles que pour un traitement sous air sans doute en raison d'un "cumul" des stress auxquels est soumis le microorganisme. Ce n'est vraisemblablement pas un facteur sur lequel, il y aura une grande marge de manœuvre pour les traitements industriels.

EFFETS SUR LES BACTÉRIES

Il y a une grande diversité de comportement des bactéries aux rayonnements ionisants. De plus, les valeurs D10 obtenues de la littérature doivent être utilisées avec précaution même si elles apportent de précieuses informations sur la sensibilité attendue de l'ionisation du ou des microorganismes concernés par l'application recherchée (Tableaux V et VI).

En marge de ces données, il convient de noter que les toxines bactériennes sont très radio-résistantes, la toxine botulique présente des valeurs DRD comprises entre 17 et 60 kGy et la toxine staphylococcique entre 27 et 95 kGy. Il est donc évident que lorsque la toxine est déjà présente dans l'aliment, des traitements ionisants usuels ne permettront pas son élimination.

En matière de sécurité microbiologique des aliments on considère que c'est la résistance aux rayonnements ionisants des spores de *Clostridium botulinum* (pathogène le plus radio-résistant) qui est la référence en matière de radiostérilisation ou radappertisation (*Cf. infra*). Ainsi, si l'on applique le concept de « stérilité commerciale » (ou concept du 12D) [5] la dose minimale pour obtenir tout type d'aliment radappertisé est de 45 kGy. D'une manière générale, le Tableau V nous apprend que les principaux dangers bactériens sous forme végétative ne présentent pas de radiorésistance élevée. Il en est globalement de même pour les agents bactériens d'altération si ce n'est les lactobacilles qui, pour des bactéries non sporulantes, sont relativement radio-résistantes (Tableau VI).

EFFETS SUR LES LEVURES ET MOISSURES

Les levures et moisissures sont fréquemment présentes dans les aliments et leur développement sera le plus souvent à l'origine de diverses altérations des aliments (modifications de la texture, de la couleur, de la saveur, de l'aspect...). Cependant, certaines moisissures telles qu'*Aspergillus flavus* et *Penicillium viridicatum* sont susceptibles de produire des toxines (ici aflatoxines) dangereuses pour l'homme. La sensibilité aux rayonnements ionisants des levures et moisissures est en général du même ordre que celle des bactéries non sporulantes. Les mêmes paramètres sont susceptibles d'affecter cette sensibilité ainsi que nous l'avons vu précédemment. La difficulté, réelle, à dénombrer de manière fiable les levures et moisissures a conduit certains auteurs à définir un concept différent de la valeur DRD : il s'agit de la dose de rayonnements pouvant empêcher la croissance d'une population initiale connue (Tableau VII et VIII). Néanmoins, on trouve également dans la littérature certaines valeurs DRD [9].

Il est admis que les levures sont plus résistantes aux rayonnements ionisants que les moisissures. Ces microorganismes se comportent généralement comme les bactéries non sporulantes. Les traitements par rayonnements ionisants sont donc un moyen de maîtrise de ces agents pour lesquels il faudra éviter impérativement la production de mycotoxines généralement très radio-résistantes (DRD de plusieurs dizaines de kGy) [4]. En pratique, pour les produits qui s'y prêtent comme les fruits par exemple, un traitement dans de l'eau chaude (50°C) est effectué juste avant l'application des rayonnements ionisants.

EFFETS SUR LES VIRUS (ET PRIONS)

Globalement peu d'études ont été consacrées à l'inactivation par rayonnements ionisants de virus dans des aliments susceptibles de les transmettre. Il y a d'abord une difficulté technique à la réalisation de ces études mais, surtout, il est apparu très tôt que les virus devaient être considérés comme plutôt résistants aux traitements (Tableau IX). Leur élimination par la seule action de l'énergie du rayonnement n'est possible qu'à des doses qui sont généralement hors du champ dit « agro-alimentaire » (voir figure 1), sauf cas particulier de la radappertisation que l'on verra plus loin. Dans le cas de traitements dans le « champ agro-alimentaire » (0,1 à 10 kGy, grossièrement), et si l'objectif est l'élimination des virus, il faudra combiner avec un traitement thermique, beaucoup plus virucide que les rayonnements ionisants.

Suite à la découverte des prions, les équipes travaillant sur le sujet se sont penchées sur tous les moyens d'inactivation de ces agents transmissibles non conventionnels. A ce titre, les rayonnements ionisants faisaient partie de l'arsenal. Les auteurs ont développé le concept du D_{37} qui correspond à la dose nécessaire pour diminuer l'infectiosité de 37%. Sans véritable surprise, et malgré la difficulté technique de réalisation de ces travaux, les études ont montré une très

Bactérie	Valeur DRD	Milieu d'ionisation	Température
<i>Aeromonas hydrophila</i>	0,14-0,19	boeuf haché	+2°C
<i>Bacillus cereus</i> (spores)	3,2	bouillon nutritif	ambiante
<i>Bacillus cereus</i> (spores)	2	eau	ambiante
<i>Brucella abortus</i>	0,34	boeuf haché	ambiante
<i>Campylobacter jejuni</i>	0,16	boeuf haché	+0-5°C
<i>Clostridium botulinum type A</i> (spores)	3,3	tampon phosphate	ambiante
<i>Clostridium botulinum type B</i> (spores)	3,3	tampon phosphate	ambiante
<i>Clostridium botulinum type E</i> (spores)	1,4	boeuf irlandais	ambiante
<i>Clostridium perfringens type C</i> (spores)	2,1	eau	ambiante
<i>Cronobacter sakazakii</i>	1,71	Poudre de lait	ambiante
<i>Cronobacter sakazakii</i>	0,76	Poudre de lait	ambiante
<i>Cronobacter sakazakii</i>	4,83	Aliment de sevrage déshydraté	ambiante
<i>Escherichia coli O157:H7</i>	0,27	poulet	+5°C
<i>Listeria monocytogenes</i>	0,42-0,49	poulet	+10°C
<i>Listeria monocytogenes</i>	0,21	Endive	+2°C
<i>Listeria monocytogenes</i>	0,5	Brocoli	-5°C
<i>Listeria monocytogenes</i>	0,76	Brocoli	-20°C
<i>Salmonella</i> Enteritidis	0,33	oeuf entier	+15°C
<i>Salmonella</i> Newport	0,32	oeuf entier liquide	+0°C
<i>Salmonella</i> Panama	0,46	viande de poulet	+22°C
<i>Salmonella</i> Paratyphi B	0,3	viande de crabe	-
<i>Salmonella</i> Typhimurium	0,4-0,48	viande de poulet	+22°C
<i>Salmonella</i> Typhimurium	0,5-0,55	oeuf entier	+0°C
<i>S. Typhimurium</i>	0,45	Jambon	+10°C
<i>Shigella dysenteriae</i>	0,22	crevette	-18°C
<i>Shigella flexneri</i>	0,41	crevette	-18°C
<i>Staphylococcus aureus</i>	0,58	boeuf haché	ambiante
<i>Staphylococcus aureus</i>	0,39	Jambon	+10°C
<i>Vibrio parahaemolyticus</i>	0,03-0,06	poisson	ambiante
<i>Yersinia enterocolitica</i>	0,1-0,21	boeuf haché	ambiante

TABLEAU V : valeurs DRD (en kGy) des principaux dangers bactériens à transmission alimentaire d'après [9, 22, 29].

Bactérie	Valeur DRD	Milieu d'ionisation	Température
<i>Bacillus pumilus</i> (spores)	1,35	bouillon nutritif	ambiante
<i>Bacillus pumilus</i> (spores)	3	sec	ambiante
<i>Bacillus subtilis</i> (spores)	0,64	solution saline	ambiante
<i>Bacillus stearothermophilus</i> (spores)	1	tampon phosphate	ambiante
<i>Lactobacillus</i> spp.	0,3-0,88	boeuf haché	ambiante
<i>Lactobacillus</i> spp.	0,55-0,81	bouillon nutritif	ambiante
<i>Leuconostoc mesenteroides</i>	0,12-0,14	eau sur papier filtre	ambiante
<i>Moraxella</i> sp.	4,7	bouillon nutritif	ambiante
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	0,12	boeuf haché	ambiante
<i>Pseudomonas putida</i>	0,08	poulet	+10°C
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	0,07	bouillon nutritif	-
<i>Proteus vulgaris</i>	0,2	huître	+5°C

TABLEAU VI : valeurs DRD (en kGy) d'agents bactériens d'altérations alimentaires d'après [9].

Levures	Valeur DRD	Milieu d'ionisation	Dose*	Milieu d'ionisation
<i>Candida spp</i>	1,25	bouillon	-	-
<i>Candida krusei</i>	-	-	5,5	Tampon
<i>Candida tropicales</i>	-	-	10	Tampon
<i>Candida zelyanoides</i>	0,7	Peau de poulet	-	-
<i>Cryptococcus albidus</i>	-	-	10	Jus de raisin
<i>Debaryomyces klöckeri</i>	-	-	7,5	Jus de raisin
<i>Rhodotorula glutinis</i>	-	-	10	Jus de raisin

*Dose pouvant prévenir la croissance (Taux de contamination initial de 10^6 - 10^7 cellules / ml)

TABLEAU VII : valeurs DRD (en kGy) et dose d'ionisation pouvant prévenir la croissance (en kGy) de diverses levures d'après [9].

Moisissures	Valeur DRD	Milieu d'ionisation	Dose*	Milieu d'ionisation
<i>Alternaria spp</i>	-	-	6	Gélose
<i>Alternaria citri</i>	1,2	citron	-	-
<i>Aspergillus flavus</i> (spores)	0,4	eau	1,7	bouillon nutritif
<i>Aspergillus flavus</i>	-	-	5	Cacahouète
<i>Aspergillus flavus</i>	-	-	6	Graine de sésame
<i>Aspergillus candidus</i>	0,3	milieu nutritif	-	-
<i>Aspergillus niger</i>	0,45	eau	2,5	Gélose
<i>Botrytis cinerea</i>	0,6	prune	5	Gélose
<i>Cladosporium herbarum</i>	1	prune	6	gélose
<i>Geotrichum candidum</i>	0,4	citron	-	-
<i>Penicillium camembertii</i>	0,2	eau	-	-
<i>Penicillium expansum</i>	0,4	prune	-	-
<i>Penicillium roquefortii</i>	0,4	Milieu nutritif	-	-
<i>Penicillium viridicatum</i>	-	-	1,4	Gélose
<i>Rhizopus nigricans</i>	0,7	prune	2,5	gélose

*Dose pouvant prévenir la croissance (Taux de contamination initial de 10^6 - 10^7 cellules / ml)

TABLEAU VIII : valeurs DRD (en kGy) et dose d'ionisation pouvant prévenir la croissance (en kGy) de diverses moisissures d'après [4, 9].

Virus	Valeur DRD	Milieu d'ionisation	Température
Virus fièvre aphteuse types A et C	6	rein de veau	np*
Virus fièvre aphteuse type D	5	rein de veau	np
Virus fièvre aphteuse type O	6	rein de veau	-60°C
Virus maladie TESHEN	4,3	20 % peptone	np
Virus Rinderpest	< 6	np	-20°C
Virus peste porcine	< 6	np	-20°C
Virus hépatite A	2,72	laitue	+4°C
Virus hépatite A	2,92	fraises	+4°C
Virus hépatite A	4,83	Huîtres	0°C
Adenovirus	4,2-5	np	np
Coxsackievirus	4,2-5	milieu culture (MEM)	np
Echovirus	4,3-5,5	sérum bovin foetal	np
Poliovirus	4,3-5,2	sérum bovin foetal	np
Virus Herpes Simplex	4,3	sérum bovin foetal	np
Virus herpes simplex	2,92	Tampon	np
Virus Influenza A	4,7	sérum bovin foetal	np
Virus de la rage	1	émulsion 10 % cerveau	np
Virus FMD**	2,7	Tampon	np

*np = non précisée ; **Foot and Mouth Disease

TABLEAU IX : valeurs DRD (en kGy) pour divers virus d'après [2, 9, 32, 35].

forte radio-résistance de ces agents. Par exemple, 50 kGy étant nécessaire pour un abattement estimé de 1,5 Log de l'agent de la tremblante du mouton [27].

EFFETS SUR LES PARASITES

Les parasites sont des dangers biologiques que l'on retrouve essentiellement, mais pas uniquement, dans les denrées alimentaires d'origine animale ou l'eau. Ils seraient à l'origine de plus de 100 000 cas de Maladies Infectieuses d'Origine Alimentaire (MIOA) par an en France [1]. Ainsi, par exemple parmi les protozoaires, *Toxoplasma gondii* peut parasiter les viandes et indirectement l'eau et les légumes crus (contamination fécale). Il est surtout dangereux pour les nouveau-nés contaminés par leur mère durant la grossesse, entraînant décès, déficience mentale ou troubles oculaires. *Entamoeba histolytica* peut causer des dysenteries chez l'homme à travers la consommation d'eau, de fruits et légumes crus contaminés fécalement. Pour ces 2 types de protozoaires, une dose de 250 Gy est considérée comme suffisante pour les éliminer de l'aliment. Des doses plus faibles peuvent ne pas être suffisantes pour l'inactivation des parasites. De fait, Pohle et al. (2011) ne parviennent pas à inactiver des métacystodes de *Echinococcus multilocularis* après application de doses très faibles entre 50 et 100 Gy [31]. Pour d'autres auteurs, et d'autres parasites, il faut des doses très élevées pour inactiver totalement des parasites. C'est le cas notamment pour Yu et Park (2003) qui traitent des oocystes de *Cryptosporidium parvum* avec des doses de 1 à 50 kGy, puis les passent sur un modèle souris pour tester leur viabilité. Le modèle souris permet la régénération d'oocystes de *C. parvum* dans tous les cas sauf pour ceux traités à 50 kGy [38]. Le tableau X présente quelques exemples d'inactivation (Tableau X).

L'efficacité des rayonnements ionisants dépend beaucoup de leur forme comme le montre le tableau X. Si l'on veut détruire (au sens propre du terme) les parasites il faudra appliquer de très fortes doses. Par contre, si l'objectif est d'interrompre ou perturber le cycle parasitaire, des doses plus faibles suffiront. Ainsi, la dose nécessaire pour stériliser *Trichinella spiralis* est d'environ 0,012 kGy, de 0,020 à 0,030 kGy pour l'inhibition de leur maturation et de 1,4 à 6,3 kGy

pour leur destruction. De plus, les traitements peuvent être appliqués sur des produits congelés, ce qui a tendance à renforcer l'efficacité.

EFFETS SUR LES INSECTES RAVAGEURS

Les doses d'ionisation requises pour tuer un insecte dépendent de son âge pour chaque stade de développement. Ainsi, la sensibilité aux rayonnements ionisants varie énormément aux différents stades métamorphiques de l'oeuf, la larve, la pupa ou l'adulte : là encore, de même que pour la cellule, cette sensibilité augmente avec l'activité reproductrice et diminue avec le degré de différenciation. Par exemple, la sensibilité des oeufs du ver jaune du blé *Tenebrio molitor* est 250 fois plus grande à 0,5 jour qu'à un âge de 7,5 jours. Le plus souvent, en pratique, il n'est pas nécessaire d'atteindre 100 % de létalité [9]. Il peut être suffisant de prévenir la transformation des oeufs et larves en adultes ou encore de stériliser les populations de pupes ou adultes présentes. Notons que la possibilité de stériliser les insectes peut être de grande importance, dans les traitements de quarantaine ou encore dans la lutte biologique, par le lâcher dans la nature d'insectes mâles stérilisés. En général, les femelles sont plus radiosensibles que les mâles (voir Tableau XI). Les mites (Lépidoptères) sont plus résistantes que les acariens, eux-mêmes plus résistantes que les mouches (Coléoptères). Une dose de 250 Gy (0,25 kGy) a été suggérée comme traitement de quarantaine efficace contre les mouches du fruit. Il préviendrait l'émergence d'adultes viables à partir des oeufs et larves [20].

Statuts réglementaire et d'application des rayonnements ionisants

ASPECTS RÉGLEMENTAIRES

L'ionisation des produits agro-alimentaires est un procédé soumis à autorisation. Les produits autorisés font soit partie d'une liste agréée, soit l'autorisation a été donnée par l'autorité compétente sur la base d'un dossier de demande d'autorisation. La mise en œuvre des traitements nécessite des installations et/ou des équipements sophistiqués dans un

Parasite	Aliment vecteur	Forme parasitaire	Dose
<i>Ascoris lumbricoïdes</i>	Légume crus	oeuf	1 à 4,8
<i>Anisakis marina</i>	maquereau	larve	3 à 6
<i>Cysticercus bovis</i>	boeuf	larve	0,2 à 0,6
<i>Cysticercus cellulosae</i>	porc	destruction	2,8 à 10
<i>Fasciola hepatica</i>	eau, légumes	forme kystée larve oeufs	0,03 1,9 4,8
<i>Hymenolepsis nana</i>	céréales, fruits secs	larves	0,3 à 0,4
<i>Trichinella spiralis</i>	viande de porc	Larve destruction	0,03 à 0,09 1,4 à 6,3

TABLEAU X : Dose d'inactivation (en kGy) pour divers parasites d'après [9].

Espèces d'insectes (Coléoptères)	Dose de stérilité	
	mâle	femelle
<i>Attagenus unicolor</i> (Brahm)	0,175	0,175
<i>Callosobruchus maculatus</i>	0,07	0,07
<i>Lasioderma serricornis</i>	0,25	0,175
<i>Latheticus oryzae</i> Waterhouse	0,2	0,1
<i>Sitophilus granarius</i>	0,1	0,1
<i>Sitotoga cerealella</i>	0,45	0,45
<i>Tenebrio molitor</i> L	0,15	0,05
<i>Tribolium castaneum</i>	0,2	0,2
<i>Trogoderma glabrum</i>	0,25	0,132

TABLEAU XI : Dose d'inactivation (en kGy) pour divers parasites d'après [9].

Produit	Autorisé à la dose maximale indiquée (kGy)				
	Belgique	France	Italie	Pays-bas	UK
Herbes aromatiques surgelées		10			
Pommes de terre	0,15		0,15		0,2
Ignames					0,2
Oignons	0,15	0,075	0,15		0,2
Ail	0,15	0,075	0,15		0,2
Échalotes	0,15	0,075			0,2
Légumes, y compris légumes à cosse					1
Légumes à cosse				1	
Fruits (incluant champignons, tomates, rhubarbe)					2
Légumes et fruits secs		1		1	
Céréales					1
Flocons et germes de céréales pour produits laitiers		10			
Flocons de céréales				1	
Farine de riz		4			
Gomme arabique		3		3	
Viande de poulet				7	
Volaille		5			
Volaille (oiseaux de basse-cour, oies, canards, pintades, pigeons, cailles et dindes)					7
Vianes de poulet séparées mécaniquement		5			
Abats de volaille		5			
Cuisses de grenouilles congelées	5	5		5	
Sang séché, plasma, coagulats		10			
Poisson et coquillages (y compris anguilles, crustacés et mollusques)					3
Crevettes décortiquées ou étêtées	5	5			
Crevettes				3	
Ovalbumine		3		3	
Caséine, caséinates		6			

TABLEAU XII : Dose de stérilité (en kGy) pour divers parasites d'après [9, 20].

environnement parfaitement maîtrisé. Il ne s'agit donc pas d'un traitement aussi simple et aussi développé mondialement que les traitements thermiques par exemple. Plusieurs textes encadrent leur utilisation. Au niveau mondial les textes du *Codex Alimentarius* (2003a et 2003b) font référence, ils concernent le code général d'utilisation (2003a) et les pratiques d'usage (2003b) et ont été adoptés par plus de 55 pays dans le monde aujourd'hui [6, 7, 14]. Ce cadre général est souvent complété par des réglementations nationales et/ou communautaires, pour l'Europe par exemple. Le cas de cette dernière est intéressant, les textes de base sont des directives de 1999 donnant là-aussi un cadre général et fixant une liste de produits autorisés (herbes aromatiques sèches ou congelés, épices) [11, 12]. Il s'agit bien de directives et non de règlements européens, plus contraignants, permettant ainsi aux réglementations nationales, et leurs différentes listes de produits autorisés à l'ionisation, de perdurer dans le temps. Ces listes d'autorisation nationales ont été reprises en 2009 dans le Journal Officiel de l'Union Européenne [13] (tableau XII).

APPLICATIONS DES TRAITEMENTS IONISANTS

Il existe plusieurs façons d'aborder les applications agro-alimentaires des traitements ionisants, la plus courante étant de les décrire en fonction de la dose qui est appliquée. Très schématiquement, et pour les produits autorisés à l'ionisation, on a des traitements :

- A très faible dose, de 0,05 à 0,15 kGy, qui stoppent la germination (c'est-à-dire la prolifération des cellules embryonnaires) des pommes de terre, oignons, aulx, échalotes, etc... Dans ces conditions, les traitements ionisants font partie des traitements dits anti-germinations.

- A des doses plus élevées, de 0,15 à 3 kGy, qui permettent de réduire les populations d'insectes (destruction des embryons et larves, stérilisation des adultes) qui détruisent les récoltes de céréales, les fruits ou légumes secs. Dans cette gamme de dose, certains vers parasites des viandes (*Trichinella* dans la viande de porc) peuvent être éliminés et la maturation de fruits et légumes frais retardée.

- A des doses plus élevées, de 2 à 10 kGy, qui sont applicables aux traitements des viandes et produits carnés, plats cuisinés, produits de la pêche (poissons, crustacés, cuisses de grenouille, ...), fruits et légumes frais, épices et aromates, ingrédients divers (gommes, additifs, ...), afin d'améliorer et de garantir une qualité hygiénique par élimination de microorganismes pathogènes et/ou d'allonger leur durée de conservation par réduction de la population microbienne d'altération.

Les termes de radication et de radurisation sont parfois utilisés pour désigner ces applications.

Radication : application aux aliments d'une dose d'ionisation suffisante pour réduire le nombre spécifique de bactéries pathogènes viables à un niveau tel qu'elles ne soient détectables par aucune méthode connue. Ce terme s'applique également pour la destruction de certains parasites spécifiques.

Radurisation : Application aux aliments d'une dose d'ionisation suffisante pour préserver sa qualité en assurant une diminution substantielle du nombre de bactéries d'altération.

A des doses d'ionisation encore plus élevées, de 10 à 60 kGy, permettent d'obtenir des aliments « stériles ». On parle, dans ce cas, de radappertisation.

Radappertisation : application aux aliments d'une dose d'ionisation suffisante pour réduire le nombre et/ou l'activité de microorganismes vivants de telle façon qu'aucun (hormis les virus) ne soit détectable par aucune méthode reconnue. De tels produits radiostérilisés peuvent ensuite être conservés jusqu'à 2 ans (D.L.U.O. : Date Limite d'Utilisation Optimale) à température ambiante dans un emballage plastique étanche par exemple. Il est à noter néanmoins que la recherche de la "stérilité commerciale" ou "stabilité microbiologique" équivalente à celle d'une conserve reste cependant une application très marginale de l'ionisation (Tableau XIII).

Aliment	Dose	Température
Bacon	25,2	ambiante
Boeuf	41,2	-30°C
Corned beef	26,9	-30°C
Canard à l'orange (plat cuisiné)	21	-40°C
Crêpes fourrées crème pâtissière	22	-40°C
Jambonnette de volaille (plat cuisiné)	28	-40°C
Jambon	31,4	-30°C
Porc	43,7	-30°C
Poulet	42,7	-30°C
Purées de carottes et patates douces	28	-40°C
Riz madras	28	-40°C
Saucisses de porc	25,5	-30°C

TABLEAU XIII : Dose d'ionisation (en kGy) pour assurer la « radappertisation » de divers aliments d'après [9].

Une autre façon d'aborder les applications est de le faire par groupe d'aliments. De fait, Kume et al. (2009) définissent 5 groupes de denrées :

- G1 : épices et légumes déshydratés ;
- G2 : fruits et graines
- G3 : produits carnés et produits de la mer
- G4 : anti-germination pour racines et bulbes
- G5 : autres (champignons, aliment santé, miel...)

Ces auteurs comparent, pour ces 5 groupes et en 2005, les tonnages traités à travers le monde divisé en 4 régions : Amérique du nord, Europe, Asie-Océanie et Afrique (incluant Ukraine et Israël) [23] (Tableau XIV).

Il apparaît dans ce tableau, qu'en 2005, un peu plus de 400 000 tonnes de produits ont été traités dans le monde avec une nette prédominance quantitative pour les épices et légumes déshydratés. Dans ce concert mondial, l'Europe ne traite qu'environ 4% du tonnage total, pour ces auteurs, et d'autres, c'est la réglementation européenne qui explique cette faible proportion [4, 23]. C'est vraisemblablement l'une des raisons, mais ils auraient pu rajouter qu'il existe également une moindre acceptation du procédé en Europe par les populations et une moindre nécessité de traitement pour les produits du fait, notamment, de la généralisation des approches préventives dans les filières ou d'autres moyens de maîtrise, notamment. Cette particularité européenne apparaît comme une tendance stable comme l'a montré encore une fois Kume et Todoriki (2013) dans un comparatif d'évolution des tonnages traités entre 2005 et 2010 [24] (Tableau XV).

Il est clair dans ce travail que la tendance évoquée ci-dessus se confirme au regard de la diminution des tonnages traités en Europe. Il apparaît tout aussi clairement que les traitements par rayonnements ionisants se développent dans les autres régions du monde, fortement en Asie plus lentement aux USA et dans les autres régions du monde. Pour Roberts (2014 et 2016),

environ 700 000 tonnes de denrées alimentaires ont été ionisées en 2013 et, du fait de l'utilisation croissante des traitements ionisants en Chine et d'une sous-estimation globale le tonnage annuel réel d'aliments traités serait plutôt de 1 million de tonnes de nos jours [33, 34]. Ce développement a lieu avec toujours une prédominance quantitative des produits du Groupe 1 [33]. Cet aspect n'est pas à négliger puisqu'une part de ces produits pourra se retrouver sur le marché européen.

Conclusion

Les traitements ionisants des aliments ont toujours été un sujet clivant, à l'inverse des traitements ionisants des matériels médicaux et de laboratoire, largement acceptés. Le fait que les produits traités (les aliments) soient des « produits vivants » et que, après ingestion, ils deviennent « une part de nous » comme le dit Claude Fischler dans sa « pensée magique », est une des raisons principales à la controverse. L'effet microbicide du procédé n'est pas remis en cause, le résultat d'abattement, pour peu que toutes les conditions soient connues, est prévisible et fiable. On connaît les principales limites du traitement : grande résistance des toxines et virus, résistance accrue en milieux secs etc... Les partisans du procédé jouent sur cette efficacité et évoquent la « nécessité technique » de tels traitements pour différentes raisons. En premier lieu l'argument sécuritaire, l'inactivation de nombreux agents pathogènes est réelle, puis vient l'argument concernant la nécessité de prolonger la durée de vie des matières premières et éviter le gaspillage des ressources alimentaires soumises, sinon, à différentes altérations. Les opposants au procédé reprennent à peu près les mêmes arguments avec une vision évidemment différentes : (i) l'augmentation de la durée de vie des produits est en fait une tromperie sur l'âge et la fraîcheur des produits et (ii) il n'y a pas de « nécessité technique » à l'augmentation de la sécurité microbiologique des produits si l'ensemble des procédures actuelles visant à garantir le respect des règles d'hygiène est mise

Région	G1	G2	G3	G4	G5
Amérique du nord	101 400	7 000	8 000	0	0
Europe	3 649	11	9 623	0	2 137
Asie-Océanie	62 912	4 582	15 208	88 196**	12 411
Afrique	17 725	70 000*	0	0	2 310
Total	185 686	81 593	32 471	88 196	16 858

*pour la seule Ukraine ; **dont 80 000 pour la chine

TABLEAU XIV : Quantité (en tonnes) de produits traités pour chaque groupe de denrées et dans les 4 régions du monde d'après [23].

Aliment	2005	2010
Asie-Océanie	183 109	285 223
Etats-Unis	92 000	103 000
Europe	15 044	9 264

TABLEAU XV : Evolution du tonnage de denrées ionisées entre 2005 et 2010 d'après [24].

en œuvre tout au long de la chaîne de l'alimentation de l'Homme. Par surcroît, ils évoquent la problématique de la sécurité du procédé sur le plan de la manipulation de sources radioactives, mais également par l'intermédiaire de l'éventuelle toxicité de molécules stables radio-induites, les 2-alkylcyclobutanones notamment. Dans leur revue de 2014, Song et al. indiquent que des effets toxiques ont été mis en évidence lors d'essais *in vitro* mais que la toxicité pour le consommateur de l'ingestion d'aliments traités par rayonnements ionisants est très improbable. Ils indiquent également que l'éventuelle toxicité chronique reste à évaluer [36]. Il s'agit le plus souvent d'essais de mutagenèse sur souches bactériennes en boîte de pétri (tests de Ames) qui ne s'intéressent qu'à l'effet génotoxique, d'autres auteurs indiquant que c'est l'effet promoteur de carcinogénèse des 2-alkylcyclobutanones qui posent un véritable problème [37]. Décidément, il est écrit que ce sujet restera marqué par la controverse et un débat, certes animé, mais qui doit rester ouvert [33].

Références

1. - ANONYME 2004 Morbidité et mortalité dues aux maladies infectieuses d'origine alimentaire en France. www.invs.sante.fr/publications/2004/inf_origine_alimentaire/ Rapport INVS/Afssa.
2. - BIDAWID S., FARBER J.M., SATTAR S.A. : Inactivation of hepatitis A virus (HAV) in fruits and vegetables by gamma irradiation. *Int. J. Food Microbiol.*, 2000, **57**, 91-97.
3. - BUCHANAN R.L., EDELSON-MAMMEL S.G., BOYD G., MARMER B.S. : Influence of acidulant identity on the effects of pH and acid resistance on the radiation resistance of *Escherichia coli* O157:H7. *Food Microbiol.*, 2004, **21**, 51-57.
4. - CALADO T., VENANCIO A., ABRUNHOSA L. : Irradiation for mold and mycotoxin control : a review. *Compreh. Rev. Food Sci. Food Safety*, 2014, **13**, 1049-1061.
5. - CERF O. : Rappels des bases théoriques de l'inactivation des microorganismes. In : FEDERIGHI M. & THOLOZAN J.L. (eds) : Traitements ionisants et hautes pressions des aliments, Polytechnica, Paris, 2001, 1-20.
6. - Codex (2003) *Codex Alimentarius* general standard for irradiated foods (Codex Standard 106-1983, Rev.1-2003). CODEX Alimentarius Commission/FAO/WHO, Rome, Italy
7. - Codex (2003) *Codex Alimentarius* code of practice for radiation processing of food (CAC/RCP 19-1979, Rev.2-2003. Editorial correction 2011). CODEX Alimentarius Commission/FAO/WHO, Rome, Italy.
8. - DALY M.J., GAIDAMAKOVA E.K., MATROSOVA V.Y., VASILENKO A., ZHAI M., VENKATESWARAN A., HESS M., OMELCHENKO M.V., KOSTANDARITHES H.M., MAKAROVA K.S., WACKETT L.P., FREDRICKSON J.K., GHOSA D. : Accumulation of Mn(II) in *Deinococcus radiodurans* facilitates gamma-radiation resistance. *Science*, 2004, **306**, 1025-1028.
9. - DESMONTS M.H., STRASSER A., HASSELMANN C., MARCHIONI E., HAUSSER F. : Les traitements ionisants des aliments. In : FEDERIGHI M. & THOLOZAN J.L. (eds) : Traitements ionisants et hautes pressions des aliments, Polytechnica, Paris, 2001, 21-149.
10. - DESMONTS M.H. : Les modifications organoleptiques des aliments traités par ionisation. *Ann. Fals. Exp. Chi.*, 1997, **90**, 347-353.
11. - EU (1999a) Directive 1999/2/EC of the European Parliament and of the Council of 22 February 1999 on the approximation of the laws of the Member States concerning foods and food ingredients treated with ionizing radiation. *JOUE*, L66/16-L66/22.
12. - EU (1999b) Directive 1999/3/EC of the European Parliament and of the Council of 22 February 1999 on the establishment of a Community list of foods and food ingredients treated with ionising radiation. *JOUE*, L66/24-L66/25.
13. - EU (2009) List of Member States' authorisations of food and food ingredients which may be treated with ionising radiation. *JOUE*, C283/5.
14. - FARKAS J, MOHACSI-FARKAS C. : History and future of food irradiation. *Trends Food Sci Technol.*, 2011, **22**,121-1266.
15. - FEDERIGHI M., TONELLO C., De LAMBALLERIE M., RITZ M. : Les traitements hautes pressions des aliments. In : FEDERIGHI M. & THOLOZAN J.L. (eds) : Traitements ionisants et hautes pressions des aliments, Polytechnica, Paris, 2001, 151-204.
16. - GHOSAL D., OMELCHENKO M.V., ELENA K. GAIDAMAKOVA E.K., MATROSOVA V.Y., VASILENKO A., VENKATESWARAN A., ZHAI M., KOSTANDARITHES H.M., BRIM H., MAKAROVA K.S., WACKETT L.P., FREDRICKSON J.K., DALY M.J. : How radiation kills cells: Survival of *Deinococcus radiodurans* and *Shewanella oneidensis* under oxidative stress. *FEMS Microbiol. Rev.*, 2005, **29**, 361-375.
17. - GOMINET M. : Traitement des denrées alimentaires par rayonnements ionisants. *Tech. Ing.*, 2001, F3050, 1-4.
18. - GRANT I.R., PATTERSON M.F. : Combined effect of gamma radiation and heating on the destruction of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella Typhimurium* in cook-chill roast beef and gravy. *Int. J. Food Microbiol.* 1995, **27**, 117-128.
19. - HALLIWELL B., GUTTERIDGE J.M.C. : Free Radicals in Biology and Medicine, 704 pages , Ed 4. Clarendon Press, Oxford, 2006.
20. - HALLMAN G.J. : Control of stored product pests by ionizing radiation. *J. Stor. Prod. Res.*, 2013, **52**, 36-41.
21. - HONG Y.H., PARK J.Y, PARK J.H., CHUNG M.S., KWON K.S., CHUNG K., WON M., SONG K.B. : Inactivation of *Enterobacter sakazakii*, *Bacillus cereus* and *Salmonella Typhimurium* in powdered weaning food by electron-beam irradiation. *Rad. Phys. Chem.*, 2008, **77**, 1097-1100.
22. - JO C., LEE A.Y., KANG H., HONG S., KIM Y.H., KIM H.J., BYUN M.W. : Radio-sensitivity of pathogens in inoculated prepared foods of animal origin. *Food Microbiol.*, 2005, **22**, 329-336.

23. - KUME T., FURUTA M., TODORIKI S., UENOYAMA N., KOBAYASHI Y. : Status of food irradiation in the world. *Rad. Phys. Chem.*, 2009, **78**, 222-226.
24. - KUME T., TODORIKI S. : Food irradiation in Asia, the European union and the united states : a status update. *Radioisotopes*, 2013, **62**, 291-299.
25. - LEE J.W., OH S.W., BYUN E.B., KIM J.H., WOON J.H., BYUN M.W. : Inactivation of *Enterobacter sakazakii* of dehydrated infant formula by gamma-irradiation. *Rad. Phys. Chem.*, 2007, **76**, 1858-1861.
26. - MENDONCA A.F., ROMERO M.G., LIHONO M.A., NANNAPENI R., JOHNSON M.G. : Radiation resistance and virulence of *Listeria monocytogenes* ScottA following starvation in physiological saline. *J. Food Protect.*, 2004, **67**, 470-474.
27. - MIEKKA S.I., FORNGR.Y., ROHWERR.G., MACAULEY C., STAFFORD R.E., FLACK S.L., MACPHEE M., KENT R.S., DROHAN W.N. : Inactivation of viral and prion pathogens by γ -irradiation under conditions that maintain the integrity of human albumin. *Vox Sanguinis*, 2003, **84**, 36-44.
28. - NAWAR W.W. : Detection of 2 alkylcyclobutanone in irradiated poultry meat. In Mc MURRAY C.H. (éd.) : Detection methods for irradiated foods – Current status, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 1996, 241-248.
29. - NIEMIRA B.A., FAN X., SOKORAI K.J.B., SOMMERS C.H. : Ionizing Radiation Sensitivity of *Listeria monocytogenes* ATCC 49594 and *Listeria innocua* ATCC 51742 Inoculated on Endive (*Cichorium endiva*). *J. Food Protect.*, 2003, **66**, 991-998.
30. - OSAILI T.M., SHAKER R.R., ABU A.S., AYYASH M.M., MARTIN E.M. : Inactivation of *Enterobacter sakazakii* in infant milk formula by gamma-irradiation : determination of D_{10} values. *J. Food Sci.*, 2007, **72**, M85-M88.
31. - POHLE S., ERNST R., MACKENZIE C., SPICHER M., ROMIG T., HEMPHILL A., GRIPP S. : *Echinococcus multilocularis*: The impact of ionizing radiation on metacestodes. *Exp. Parasitol.*, 2011, **127**, 127-134.
32. - PRAVEEN C., DANCHO B.A., KINGSLEY D.H., CALCI K.R., MEADE G.K., MENA K.D., PILLAI S.D. : Susceptibility of Murine Norovirus and Hepatitis A Virus to Electron Beam Irradiation in Oysters and Quantifying the Reduction in Potential Infection Risks. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2013, **79**, 12, 3796-3801.
33. - ROBERTS P.B. : Food irradiation is safe : half a century of studies. *Rad. Phys. Chem.*, 2014, **105**, 78-82.
34. - ROBERTS P.B. : Food irradiation: standards, regulations and world-wide trade. *Rad. Phys. Chem.*, 2016, **129**, 30-34.
35. - SMOLKO E.E., LOMBARDO J.H. : Virus inactivation studies using ion beams, electron and gamma irradiation. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B*, 2005, **236**, 249-253.
36. - SONG B.S., CHOI S.J., JIN Y.B., PARK J.H., KIM J.K., BYUN E.B., KIM J.H., LEE J.W., KIM G.S., MARCHIONI E. : A critical review on toxicological safety of 2-alkylcyclobutanones. *Rad. Phys. Chem.*, 2014, **103**, 188-193.
37. - YAMAKAGE K., SUI H., OHTA R., TOYOIZUMI T., KAWAKAMI K., MATSUMOTO H., TAKAHASHI T., SASAKI K., IKEZUMI M., NEGISHI S., IZUMI K., TODORIKI S., TAKASHI K., FURUTA M. : Genotoxic potential and *in vitro* tumour-promoting potential of 2-dodecylcyclobutanone and 2-tetradecylcyclobutanone, two radiolytic products of fatty acids. *Mut. Res. Gen Toxic. Environ. Mutagenesis*, 2014, **770**, 95-104.
38. - YU J.R., PARK W.Y. : The Effect of γ -Irradiation on the Viability of *Cryptosporidium parvum*. *J. Parasitol.*, 2003, **89**, 3, 639-642